

協調行動におけるタイミング制御に関する研究

武藤 ゆみ子^{*}, エルンスト・ペッペル[†], 三宅美博^{*}

^{*}東京工業大学 総合理工学研究科 知能システム科学専攻

[†]ミュンヘン大学 医学的心理学研究所 ヒューマンサイエンスセンター

yumiko@myk.dis.titech.ac.jp

要旨: 人間の協調行動においてタイミングを合わせることは必要不可欠である。本発表では、まず、タイミングが協調行動に与える影響を述べるため、人間とアバタの対話実験結果について紹介する。さらに一方で、協調行動の実現には動的変動に柔軟に対応できる人間のタイミング機構の存在が関与していると推測される。そこで、本研究では複雑な外的イベントに対するタイミング機構を明らかにすることを目的として、同期タッピング課題を用いて実験を行った。その結果、複雑な外的イベントとの同期には認知が関与したプロセスが働いていることを示唆する結果を得た。本発表では、これらの結果について、人間と共存可能なエージェント設計を考慮に入れたうえで考察していく。

キーワード: 協調行動, タイミング制御, 時間認知, 同期タッピング課題

1. はじめに

人間の協調行動において、互いのタイミングを合わせることは不可欠である。たとえば、2人で並んで歩くとき、互いの歩行速度を調節することによって協調的な歩行が実現する。また、他者との対話の際にも互いの発話タイミングを調節することにより、円滑な対話コミュニケーションが達成される。本研究では、このような協調行動における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応用す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][2]}。特に最近では、表情や身振りなどの非言語チャンネルを持たないアバタを用い、人間と人工物のやりとりで多く観察される「指示-応答」場面を想定し実験を行った。その結果、発話タイミングや発話長を変化させることにより、人間側がアバタに対して抱く印象が変化していることを示した^[1]。この結果から、人間と共存可能なエージェント設計にタイミングを考慮することの必然性がさらに明らかになった。

しかしながら、協調行動におけるタイミングの重要性が明らかにされる一方で、人間のタイ

ミング機構に関して未だ明らかにされていない部分が多い。特に、これまでのタイミング機構の解析は、単調で人間にとって合わせやすい理想的な外的イベントを対象に行われてきている。しかし、現実世界で人間が合わせている外的イベントは動的に変動し複雑であり、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、単調で一定なリズム音にステップを合わせることは、容易に自動的に行うことができる。しかし、難易度の高い複雑なリズム音に合わせて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章において既に明らかにされている主観的時間知覚の階層性と同期タッピング課題について説明する。第3章では本研究の研究方針を示し、第4章では環境変動の複雑さを制御する実験方法の詳細を記す。第5章でその結果を示し、第6章でタイミング機構に関して考察する。最後に第7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。

※武藤、ペッペル、三宅：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、計測自動制御学会論文集、43-11(2007)

2. 先行研究

2.1 主観的時間知覚の階層性

協調行動においてのみならず、そもそもわれわれ人間が知覚する時間は物理的なものとは異なる。たとえば、2音の連続音を提示したとしても、その提示時間間隔が非常に短ければ人間には1音にしか聞こえない^{[5][6]}。また、聴覚においても錯覚が観察されることも多数報告されている^[7]。そして、このような人間の運動において重要な役割を果たしている主観的時間知覚（時間順序(temporal order)、予測(anticipation)、同時性(simultaneity)、連続性(successiveness)、主観的現在(subjective present)、主観的時間間隔(temporal duration)等)は、30ミリ秒の時間順序判断に関する知見と3秒の時間統合に関する知見を中心に階層的かつ相互に関連している^[8]。連続した2つの音刺激を提示した際、2つの音間隔が4ミリ秒以上であれば分離した2音が聞こえるが(同時性判断)、その2音の前後関係を正確に知るには30~40ミリ秒要する(順序判断)^{[5][6]}。他感覚器官(視覚・触覚)においては、聴覚に比べ時間分解能が低いため同時性判断にはさらに時間を要し、同時性の範囲は感覚により全く異なる^[9]。しかしながら、時間順序を決定するための時間間隔は感覚システムが異なっても同じである。すなわち、同時性の判定は感覚器官の機能に依存されるが、順序の判定には脳の中樞が関連すると考えられている。実際に、脳の損傷が同時性判断には影響を与えないが時間順序判断には影響を与え、脳損傷により時間順序の閾値が広がることが発話に影響をもたらしているという報告もある^[10]。また、時間的に連続する事象を約3秒の限界まで1つの単位に結合しているという脳の統合メカニズムが、人間の対話における互いの発話量に影響を及ぼしているということも示唆されている^{[8][11]}。

2.2 同期タッピング課題

同期タッピング課題は、周期的な感覚刺激に合わせて指でボタンを押すという課題である。タイミング機構を解析する手法として1910年にDunlapに提案^[12]されて以来、多くの研究者によって用いられてきた。特に、同期タッピング課題では一般的にタップ時刻が音刺激の開始時刻に数十ミリ秒先行するという現象が観察され、この現象は一般的に「Negative asynchrony (負の非同期現象)」^[13]と呼ばれている。また、このタップ時刻と音刺激の開始時刻のズレは、同期誤差SE(Synchronization Error)として、被験者のタップ周期ITI(Intertap-onset interval)と共に、タイミング機構解析指標として使用されている(Fig.1)(Table 1)。なぜなら、同期タッピングのようなリズム運動における円滑な同期の遂行・維持には、誤差修正機構と周期修正機構の2種類の誤差(位相)修正が重要な役割を果たしているからである^{[15][21]}。そして、このような修正機構に基づき提案されたモデルの中で最も基本的で有名なものがMatesモデル^{[16][17]}であり、最近では、このモデルでは十分説明しきれない認知的プロセスによる影響が明らかになりつつある^{[22][24]}。

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

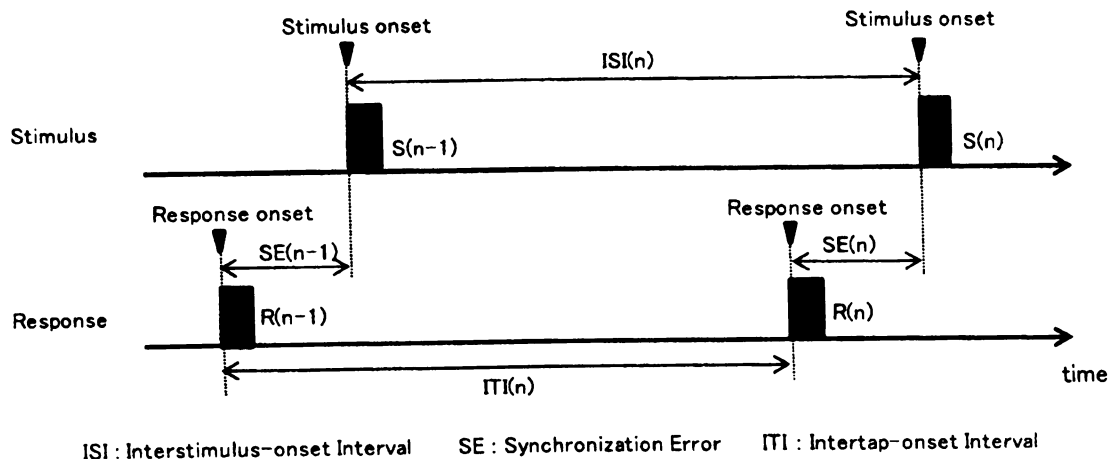


Fig.1 Time scheme and definition of temporal variables

3. 研究方針

本研究では、人間の動的環境に対する柔軟性に着目し、等間隔で音刺激が与えられる環境下から、徐々に音刺激がランダムに変化するような状況を人工的に構築し、その際の人間の音刺激に対する気づきと挙動データを解析する。以下に実験方針の詳細を示す。

1. タイミング機構解析手法として同期タッピング課題を用いる。感覚入力として音刺激を提示し、その際の人間の応答を観察する。
2. 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。試行ごとにその標準偏差 σ の値を変えらることにより、等間隔の刺激群から徐々に音間隔のばらつきが大きいものの提示が可能となり、 σ を客観的な複雑さの指標とすることが可能である。
3. 刺激周期の変動に対して被験者がどの条件で気づいたかを測定すると共に、客観的な数値として応答データを取得し解析する。

4. 実験方法

4.1 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^[25]、特別な音楽訓練を受けたことがない被験者を募った。

4.2 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(500Hz, 100ms)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。

4.3 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 800ms 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 800ms に設定した^[26]。

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 $S(n)$ を以下のように定義する。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} 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。周期ゆらぎ 1 種類に対し、 ISI を 110 個発生させた。

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^[27]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。

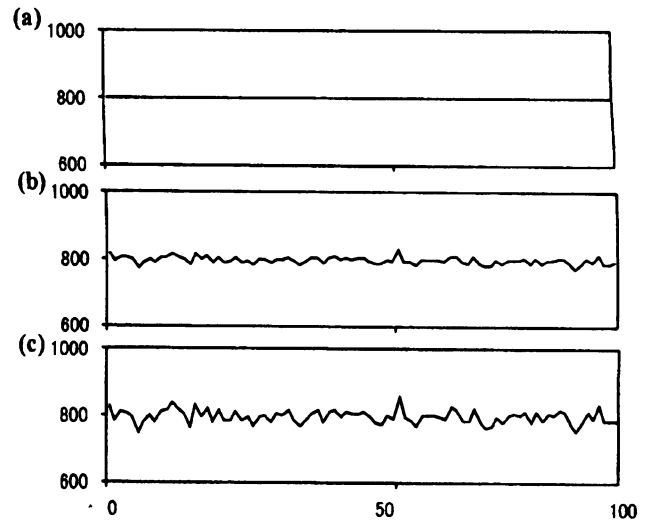


Fig.2 Examples of time series of ISIs
(a) $\sigma_{ISI}=0$ ms, (b) $\sigma_{ISI}=10$ ms, (c) $\sigma_{ISI}=20$ ms

4.5 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(等間隔) $\sigma_{ISI}=0$ 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.2に示す。なお、被験者が行った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かった。第4試行($\sigma_{ISI}=30$ ms)終了後、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報告が挙げられる。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知られている^[19]。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)後が質問を行う上で妥当であると予想し、実験を行った。

5. 結果

5.1 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。

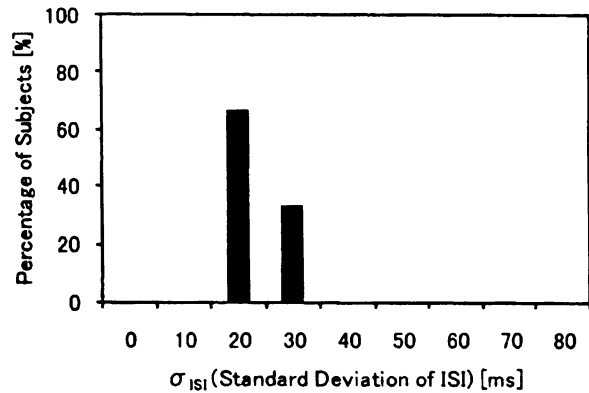


Fig.3 Threshold value of the cognitive awareness

5.2 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 が次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 の相関解析を行った。以下、6.2.1 節では SE と ITI の相関係数についての結果を示し、さらに 6.2.2 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。

5.2.1 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、その上下で相関係数の比較を行った。被験者間で平均された相関係数に関し、一元配置分散分析を用いた結果($F(8,88)=10.609$, $p<0.01$)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、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を除き、その他全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($p<0.05$)。

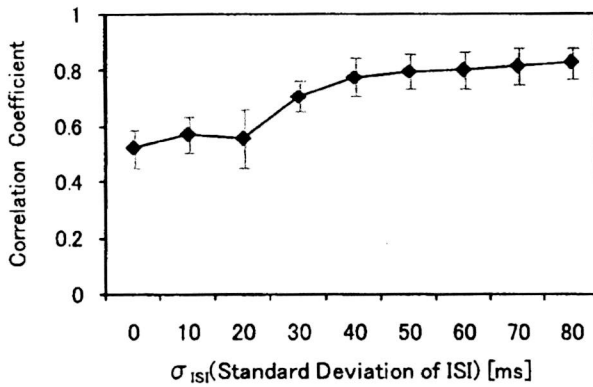


Fig.6 Average correlation coefficients

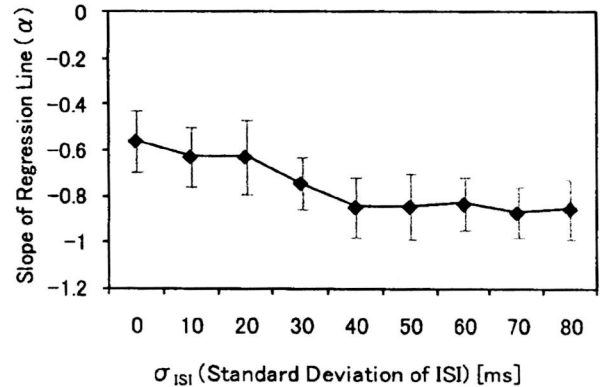


Fig.8 Average slopes (α) of regression lines

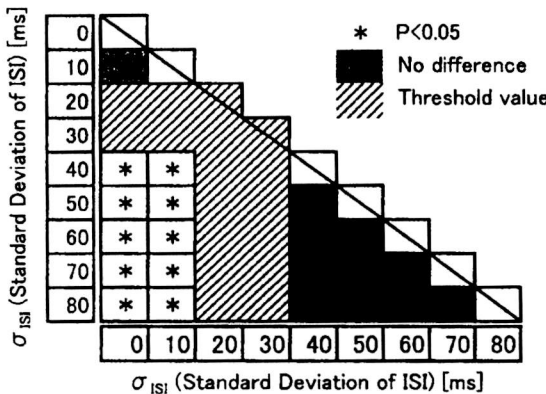


Fig.7 Pairwise comparison (correlation coefficient)

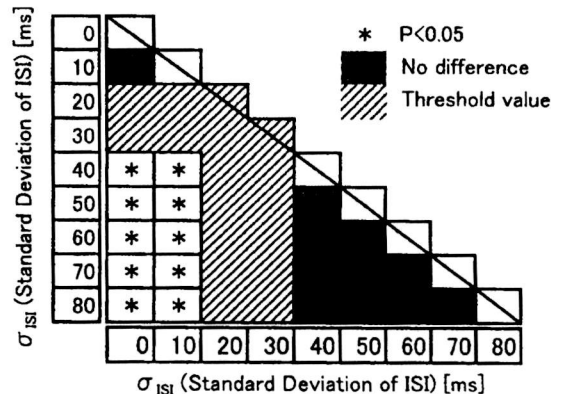


Fig.9 Pairwise comparison (slope alpha)

5.2.2 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、 $\sigma_{ISI} = 20-30ms$ の区間を除いて、その上下で比較を行った。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 $\sigma_{ISI} = 0-10ms$ と被験者が刺激提示周期の変化を認知した $\sigma_{ISI} = 40-80ms$ 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。 $\sigma_{ISI} = 20-30ms$ を除外し、その他全ての条件について比較したところ、 $\sigma_{ISI} = 0ms$ と $\sigma_{ISI} = 10ms$ の間、 $\sigma_{ISI} = 40ms$ から $\sigma_{ISI} = 80ms$ 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、 $\sigma_{ISI} = 0-10ms$ と $\sigma_{ISI} = 40-80ms$ 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 $\sigma_{ISI} = 0-10ms$ と認知を伴う $\sigma_{ISI} = 40-80ms$ 領域の 2 種類に分類できることが明らかになった。