

機関番号：53203

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20500180

研究課題名（和文）視覚運動系における二者間実時間相互作用の制御機構の解明

研究課題名（英文）A study on control mechanism of mutual real-time interaction in visual-motor system

研究代表者

石田 文彦 (ISHIDA FUMIHIKO)

富山高等専門学校・専攻科・准教授

研究者番号：20345432

研究成果の概要（和文）：

視覚目標追跡運動実験および二者間実時間相互作用実験において、運動速度にリズム成分が存在すると、視覚目標運動に比する運動先行性が強調され、かつ、協調的な相互作用が観測されることを見いだした。追跡運動モデルによる運動先行性再現計算により、感覚運動制御システムがフィードバック要素とフィードフォワード要素が相補的に動作している可能性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The enhancement of proactivity and cooperative behavior of hand-motion with rhythmic hand-velocity were found in target-tracking and mutual-tracking experiments in visual-motor system. Numerical simulation of hand-tracking motion revealed the complementarity between the feedforward and feedback mechanisms contributes the proactive behavior in visual-motor system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学 知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：生体生命情報学 知能ロボティクス 神経科学 コミュニケーション

1. 研究開始当初の背景

コミュニケーションの補助手段としての ICT が盛んに研究されており、様々な場面での応用が進んでいる。現状では、テクノロジーの側面が主に強調されているが、今後は、そのテクノロジーがどのように人と人とのコミュニケーションに影響を与えているかなどを明らかにする、人サイドからの研究を推進する必要がある。このとき、人と人との

コミュニケーションをどう定義し、どのように定量的に研究していくかが重要となる。

コミュニケーションが成立するとは、「二者ないし複数者間で言語や運動を通じて相互作用し、自らの主張や意図を伝え、かつ、他者の主張や意図を理解し、互いの他者に関する理解が共有されていること」である。これには、一方への情報の流入や相互に時間をおいた情報処理よりはむしろ、個々の情報処

理過程をふまえた複数者間の協調的、かつ、実時間同時的な情報処理が必要である。

人運動制御の実時間情報処理に関して、これまでに明らかになっていることは、以下である。

(1). 個々の感覚運動系の実時間情報処理についてプロアクティブ制御とよぶ特徴が備わっていること。プロアクティブ制御は、脳内の予測機構により外部環境に比して自らの運動系を先行させ、環境変化によって生じる過渡誤差を最小にする制御様式である。

(2). 二者間の感覚運動系の実時間相互作用実験において、お互いに相手の運動を予測し先行するように運動を行うと、両者の運動の相関が高くなる。一方、お互いの運動に合わせるように運動を行うと、両者の相関は低くなること。

(3). 位置誤差フィードバック項とターゲット速度フィードフォワード項から構成される個々の感覚運動系のプロアクティブ制御を再現できること。

特に(1)(2)は、プロアクティブ特性を示す個々の感覚運動系の相互作用(=コミュニケーション)はうまくいき、プロアクティブ特性を示さない個々の相互作用はうまくいかないことを示している。

これらの実験結果の理解は、コミュニケーション成立条件の数理的理解に向けた人の実時間情報処理の特徴解明への切り口と考えられる。また、それを支える感覚運動系の制御メカニズムの詳細な理解は、コミュニケーション支援ツールの設計指針に資することが期待できる。

以上のことから、人の実時間情報処理の制御機構の解明を目的とした、「個々の感覚運動系ならびに二者間の相互作用実験と数理モデルにより、実時間情報処理の基本的特徴としての運動先行性を手がかりに、人の感覚運動系の挙動と制御要素としてのフィードフォワード成分とフィードバック成分との定量的関係を明らかにする」申請研究を実施した。

2. 研究の目的

本研究は、人と人とのコミュニケーション成立条件の数理的理解とその工学的応用に向けての基礎研究である。生物の生存に不可欠な実時間情報処理とコミュニケーションが密接に関係していることに着目し、実時間情報処理の数理的本質を理解し、それを支える処理要素を探求することを目的とする。

申請研究では、定量計測が可能な視覚運動系に焦点をあて、外界視覚刺激運動と被験者運動との相互関係が定義しやすい視覚目標追跡運動を題材にする。人の実時間情報処理の特徴を探求し、その制御機構を明らかにすることを目的とする。特に、人の実時間情報

処理について、環境に比する自らの運動先行性を切り口に以下のことを明らかにする。

(1). 運動先行量と視覚刺激の提示条件との定量的関係

(2). 運動先行量とフィードフォワード要素--フィードバック要素間の連携ダイナミクスとの関係

具体的に、定量計測が可能な視覚運動系に焦点をあて、外界視覚刺激運動と被験者運動との相互関係が定義しやすい視覚目標追跡運動を題材にして、個々の視覚運動系(人対コンピュータ)および二者間(人対人)の実時間相互作用について以下のことを行う。

(1). 運動先行量と視覚刺激の提示条件との定量的関係を求める。具体的には、視覚刺激運動を1次元から2次元運動までパラメトリックに変化させる、刺激提示を断続化させるなど、モデルの制御要素と密接に結びついた実験条件を変化させ実験を行い、被験者運動の先行量、位相分布、位相速度パワースペクトル、などを計測する。このデータを基に、人の実時間情報処理の特徴を定量化するとともに、運動先行性を通じて二者間相互作用の状態を実験条件によりコントロールする術を探る。

(2). 運動先行量とフィードフォワード要素--フィードバック要素間の連携ダイナミクスとの関係を求める。具体的には、プロアクティブ制御を再現する手動運動ミニマムモデルの挙動と上記の実験結果を詳細に比較する。特に、フィードフォワード項とフィードバック項との連関ダイナミクスの違いが被験者の挙動にどのような影響を与えるか、ならびに、フィードフォワード項が視覚刺激のどのような情報に基づくのかに着目し、人の実時間情報処理を支える制御機構の特徴を明らかにする。

3. 研究の方法

個々の視覚運動系における実時間情報処理ならびに二者間実時間相互作用を可能とする制御機構を明らかにするため、実験装置の構築、個々の運動系および二者間相互作用時のデータ収集、個々の運動系について実験結果の再現を通じて、その制御機構の詳細を調査する。

(1). 視覚目標追跡運動実験の構築

現有の実験装置をベースに視覚刺激の提示条件を変化できるように構築し直す。個々の運動系に対する実験と二者間の相互作用実験とを共通の装置を使用して行えるようにする。

(2). 視覚刺激条件を変化させた場合の運動先行性の測定

実験では、被験者運動の特徴や視覚刺激運動(コンピュータ or 人が制御)との関係を定量的に定義しやすくするため、被験者の追跡

運動は、調和振動的な物に限定する。被験者が見るスクリーン上の視覚刺激の提示を連続的なものから断続化していく。各条件で、被験者手動運動と視覚刺激運動間の位相差、被験者運動の位相速度パワースペクトル、位相差や位相速度と手動運動の位相との関係、被験者運動と刺激運動間の相互相関などを求める。特に位相差に着目して、被験者の運動先行性と実験条件との関連を見だし、運動先行性をコントロールする可能性を探る。

(3). 追跡運動モデルを用いた実時間情報処理の制御機構の探求

追跡運動モデルであるの一種の Delayed FeedForward (DFF) モデルを基に考える。DFF モデルは、被験者運動と視覚刺激運動との誤差フィードバック項と視覚目標運動速度に関するフィードフォワード項からなる。フィードフォワード項は予測要素であり、この強度の調節により、個々の感覚運動系の特徴であるプロアクティブ制御が再現可能となる。

個々の感覚運動系の制御機構の詳細を明らかにするため、誤差情報項と予測情報項との連携ダイナミクス、つまり、この二項の関係が単純な足し算によるものなのか、確率的にスイッチするのか、外部要因によりスイッチするのかなどや視覚目標運動速度に関する予測情報が実際にどのような外的もしくは内的要因により生成されているかなどを明らかにする。

ならびに、二者間実時間相互作用を可能とする制御機構を明らかにするため、DFF モデルの結合により二者間相互作用のミニマムモデルを構築し、安定的に相互作用するための条件などを解析する。

4. 研究成果

(1). 視覚目標追跡運動実験について

①. 1 次元直線運動に対する現有の視覚目標追跡運動実験システムを 2 次元運動に対しても実験が可能となるようにコンピュータマウスカーソルまたは LED マーカを用いたカメラシステムを利用し手動位置を測定できるシステムに改変した。同時に、視覚目標の提示条件を制御できるようなシステムを導入した。

②. 円運動追跡実験において目標周波数を 0.1Hz, 0.3Hz, 0.5Hz, 0.7Hz の 4 件、円軌道に対し視覚目標の提示割合が 100%, 40%, 20% の 3 条件、計 12 条件の実験条件を設定し実験を行った。

③. 目標運動に対する手動運動の位相差、特に手動運動の先行性と目標追跡時の手動(位相)速度スペクトルに着目し解析を行った。目標運動が低速の時、目標提示条件の違いによって手動運動の振舞いは大きく異なった。100%条件では明らかに先行性は観測されない、40%条件、20%条件では先行性が現れた。

この目標提示条件による振舞いの違いは、高速条件ではそれほど顕著ではなく、どの条件においても位相速度にリズム成分が見られ、先行性が観測された。また、手動(位相)速度スペクトルを求め、先行性との関係を実験条件により分類した。その結果、速度スペクトルに現れる 1-2Hz のブロードなピークが誤差修正フィードバック制御に対応し、目標運動周波数やその倍周波数に現れるシャープなピークがフィードフォワード制御に対応していると推測できた。

④. 二者間実時間相互作用実験を行った。これは、既に予備実験として行っていた二者間の目標運動追跡運動実験を対象とした。円運動に目標運動、手動運動の運動起動として、基準円運動の周波数を 0.3, 0.5, 0.7, 0.9Hz の 4 種類に実験参加者への追跡方針条件として、相手に正確にあわせる条件(Reactive 条件)、相手より先に進む条件(Anticipatory 条件)、軌道円中心を注視しつつ相手に合わせる条件(Eye-Fixation 条件)の 3 種類、計 12 種類の実験条件を設定した。

⑤. 運動周波数は、Eye-Fixation 条件と Anticipatory 条件ではほぼ基準円運動周波数であったのに対し、Reactive 条件では、基準運動周波数より約 0.2Hz ほど小さかった。円軌道に対する位相に着目し、位相速度のスペクトル解析を行った。その結果、結果、基準周波数が大きくなると位相速度に円軌道運動に対応するリズムが生じ、かつ、その成分は強くなることがわかった。また、追跡条件間では、Eye-Fixation 条件、Anticipatory 条件、Reactive 条件の順でリズム成分の大きさは変わり、Anticipatory 条件と Reactive 条件との差は大きい結果となった。さらに、二者間の位相速度相互相関を求めた。相互相関特性は、相関時間ゼロに極大のピークがあるものと極小ピークがあるものの 2 種類に分かれた。大まかに、運動周波数が大きく Eye-Fixation, Anticipatory 条件では前者が見られ、運動周波数が小さく Reactive 条件では後者が見られた。これらの結果より、手動運動に見られるリズム成分と二者間相関特性には相関があることが示唆された。

⑥. 二者間位相速度相互相関特性において、相関時間ゼロに極大ピークがあるときに二者間の運動に対する協調性がよいと考えられる。運動にリズムがあるとき、運動先行性が観測され、かつ、二者間協調性もよいことから、運動先行性と二者間相互作用の良さ、つまり、コミュニケーションの良さとは関連があると考えられる。また、速度相関により二者間相互作用の定量評価できる可能性がある。

⑦. 二者間実時間相互作用実験においても、視覚目標を運動軌道に対して一部分だけ提示する(断続的提示)実験を行った。その結果、

視覚目標運動表示を断続的にすると、二者間位相速度相互相関が相関時間ゼロで極大ピークをとる特性，すなわち，速度相関がよくなり，協調的に動作する様子が見られた。視覚目標運動表示を断続的にした視覚目標追跡運動では先行性が強く観測されるので，二者間協調には運動先行性が重要な役割を担い，かつ，視覚提示を変化させることで，被験者の予測強度を変えることで二者間協調状態を制御できる可能性が示唆された。

(2). 追跡運動モデルについて

①. 視覚目標追跡運動において，位置(位相)誤差フィードバック要素と視覚目標速度フィードフォワード要素が重要であることが知られており，視覚目標速度フィードフォワード要素の強度を強めることで，運動先行性が再現できることはこれまでの研究で明らかになっている。本研究では，実験で得られた結果をこの2要素の関係から再現することを試みた。

②. 誤差フィードバック要素と視覚目標速度フィードフォワード要素にリズム成分を与え各リズム要素の周波数，位相差を変え数値実験を行った。その結果，視覚目標運動の位相に対する手動運動の位相プロファイルの形状はフィードフォワード要素の影響が強く，両者のリズム周波数がターゲット周波数と同一もしくは2倍のときで，かつ，ある程度相補的に働くときに運動先行性を示した。これは，生体の感覚運動システムにおいて，フィードバックとフィードフォワード制御が同時ではなく，相補的に働いていることを示唆する。

③. 追跡運動モデルを相互に結合させ，二者間実時間相互作用モデルを構築した。数値実験で，安定的に相互作用状態を保持する条件を探索しているが，研究期間中にその条件を見つけるにはいたらなかった。

本研究で得られた成果は，感覚運動系の運動先行性を通して，実時間情報処理を特徴づけた。個々の感覚運動系，および，その相互作用において，実時間情報処理の特徴である運動先行性が外界視覚刺激の違いに応じてどのように変化するかを系統的にまとめたデータが得られた。と予想される。このデータを活用することにより，視覚刺激を変えたときの運動先行性を予測できるようになる。さらに，二者間相互作用を様相を変え，力学的なコミュニケーションの状態を実験者がコントロールできる可能性があり，学術的にコミュニケーションの定量的研究が開けるものとなり非常に意義深い。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計1件)

(1). 沢田康次, 石田文彦, 予測と行為 - 主体的行為はいかにして可能か -, 計測と制御, Vol.48, pp.60-65, 2009, 査読無し.

[学会発表] (計10件)

(1). 石田文彦, 沢田康次, 視覚運動系は過渡誤差を最小にする過程で運動先行性を獲得する, 第23回自律分散システムシンポジウム, 2011, 札幌市.

(2). 石田文彦, 運動先行性とその役割, とやまロボット技術研究ネットワーク第6回ロボット研究セミナー, 2010, 富山市.

(3). 石田文彦, 林叔克, 高地康宏, 浦上大輔, 沢田康次, 相互視覚目標追跡運動における手動運動の振舞い, 第22回自律分散システムシンポジウム, 2010, 名古屋市.

(4). 石田文彦, 浦上大輔, 高地康宏, 沢田康次, 二者間視覚目標追跡運動課題における手動運動の振る舞い, 日本神経回路学会第19回全国大会, 2009, 仙台市.

(5). 石田文彦, 林叔克, 高地康宏, 沢田康次, 目標追跡運動におけるフィードフォワードフィードバック機構の相補性と先行性との関係, 第24回生体・生理工学シンポジウム, 2009, 仙台市.

(6). 石田文彦, 感覚運動システムの運動先行性, 身体性情報学研究会・身体知機構研究会シンポジウム, 2009, 東京.

(7). 石田文彦, 林叔克, 高地康宏, 沢田康次, 手動追従運動制御における誤差フィードバックの断続化と先行性との関係, 第21回自律分散システム・シンポジウム, 2009, 鳥取市.

(8). 石田文彦, 村田哲, 阪口豊, 手操作運動中のサルF5-AIP野神経活動の情報量解析, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 2008, 仙台市.

(9). 林叔克, 石田文彦, 浦上大輔, 菅原研, 沢田康次, 「先行制御」とリズムの自己生成の必要性, 日本物理学会秋季大会, 2009, 盛岡市.

(10). Shimizu, T., Ishida, F., Murata, A., Sakaguchi, Y., Information analysis of neuronal activities related to hand manipulation in the monkey parietal area AIP, Neuroscience2008, 2008, 東京.

[その他]

ホームページ等

<http://www.ishidaflab.com>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石田 文彦 (ISHIDA FUMIHIKO)
富山高等専門学校・専攻科・准教授
研究者番号：20345432

(2) 研究分担者

なし.

(3) 連携研究者

なし.