

「協調と制御」研究領域 領域活動 評価報告書

- 平成 15 年度終了研究課題 -

研究総括 沢田 康次

1. 研究領域の概要

人間・社会・環境のそれぞれで生成されその間で伝達される情報の特徴抽出・モデル化、「協調」的処理(コミュニケーション)する様式とその「制御」、さらにそれを実現するための手法を研究します。

例えば、インテリジェントなデバイスとシステム、ブレインコンピューティング、言語的・非言語的コミュニケーション、異種情報の統合シミュレーション、大量データの高速度処理による意思決定支援システムの研究などを含みます。

2. 研究課題、研究者名

別紙一覧表参照

3. 選考方針

募集要項ならびに選考基準を踏まえて、若手研究者らしい「野心的な」夢のある「研究」の選考をベースに、当領域分野の「情報化」を意識し、「情報化対応の問題解決につながる研究」将来的に発展の望める柔軟性のある研究」を重視。さらに当研究事業は、研究者が研究グループを構成し研究を推進することが前提であるため、研究者自身の研究に対する「活力・統率力」を重視し、よりアクティビティの高いものを採用するようにした。

4. 選考の経緯

1 応募研究提案について 3 名の選考アドバイザーがそれぞれ専門家としての立場から書類審査を行い、書類選考会において意見を述べ合うとともに研究総括の見解により面接選考の対象者を選定した。続いて面接選考および総合審査により、採用候補者を選定した。

審 査	書類選考	面接選考	採用者数
対 象 数	69 名	23 名	12 名

5. 研究実施期間

平成 12 年 10 月～平成 15 年 9 月

6. 領域の活動内容

全研究者を対象とした領域会議 6 回、研究分野毎のサブ領域会議 3 回(会議テーマ:「発達脳科学分野」、「コミュニケーションとインタラクション分野」、「脳科学 知覚 認知における身体性」分野)、研究報告会 1 回(東京)を開催し、研究進捗状況の報告と討論、研究交流を図った。また、研究総括は研究者を訪問し、研究実施場所の調査と研究進捗状況を把握するとともに研究における課

題について対応した。

7. 評価の手續

研究総括が個人研究者からの報告・自己評価を基に領域アドバイザーの協力を得て行った。また、JST が主催する一般公開の研究報告会において参加者からの意見を参考とした。

(評価の流れ)

平成 15 年 9 月	研究期間終了
平成 15 年 11 月	研究報告会を東京にて開催
平成 15 年 12 月	研究報告書及び自己評価提出
平成 16 年 2 月	研究総括による評価

8. 評価項目

(1) 外部発表 (論文、口頭発表など)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等研究成果の状況

(2) 得られた研究成果の科学技術への貢献

9. 研究結果

本領域の目的は、コミュニケーションの情報学的・工学的重要性を認識し、コミュニケーションの脳内知覚・運動系メカニズムを解明するとともに、種々のネットワークにおけるインタラクションの協調的制御方法を明らかにすることにより、新しい研究領域を創生することである。

その中で一期生 12 名は 3 年間の研究期間において、認知発達脳 (開・高谷・中村)、協調的インターフェイス (前田・小池)、インタラクション (遺伝子レベル・四方、コンピューターレベル：加藤・中小路、人レベル・大澤)、新しい計算方式 (山本・佐藤) と脳の時間順序表現 (北澤) など、顕著な成果を挙げた。高く評価したい。

グループ別に言えば、「認知発達脳」では、幼児がどのような段階を経て、外界とどのようなインタラクションを行い、自他と人工物や自然物との区別を行うかを明らかにすることである。中村は、非言語コミュニケーションには「右大脳半球の下前頭葉と上側頭溝皮質」が重要な部位であると結論を得た。開は、6 ヶ月児では TV 映像と現実世界とを区別しないが、10 ヶ月児では TV 認知・自己認知・コミュニケーションエージェント認知のすべてにおいて「時間的随伴性検出」が重要な役割を果たしていることを示した。また高谷は数多くの乳幼児の全身運動の発達過程と幼児前頭葉の近赤外分光の関連についてのデータを集積し、特徴的な変化が 5 ヶ月に見られることを示した。そのために、その中で必然的に発生する主観の客観化過程というチャレンジングなテーマを積極的に研究課題の中に取り入れた。

「協調的インターフェイス」では、前田は、新しいマン・マシンインターフェイスとして人の運動を協調的に支援する、ウェアラブルロボットの開発に必要なデバイスとシステムの開発に著しい進歩を示し、小池は介護ロボットなどの協調的な力学的インターフェイスの作成のために必要な筋電位からのスティフネスの正しい推定方法を確立した。

「インタラクション」では、四方は、突然共生することになった生物種の遺伝子代謝ネットワークの変化を追跡して、形態変化と遺伝子代謝ネットワークの再編成を明らかにすることに成功した。

加藤は、オープンネットワーク環境上でソフトウェアを安全に流通・実行させるための構成モデル「ソフトウェアポット」の実装に成功した。中小路は、ユーザにとって使い心地のいいアプリケーションシステムを作るためのインタラクションデザインを工学的に支援する三段階の枠組みを構築し、創造的知的活動を支援するアプリケーションの開発の方向性を示した。大澤は、チャンスの価値を理解し行動に移すまで、環境とどのように相互作用を行うか、またこの過程における環境を可視化する手法の開発に成功した。

新しい「計算方式」では、山本は、DNAのハイブリダイゼーションを用いたDNAコンピューティングの初期分子濃度を問題によって制御する方式を提案し、分子実験によってその有用性を示し、佐藤は、量子コンピューティングの持つ重ね合わせの原理をニューラルコンピューティングに応用することにより、並列計算実行時の問題が解決できることを提案し、核スピン系と超伝導接合により実証しようとした。北澤は、手交差によって主観的時間順序に逆転が起きる現象を発見し、計算機のようなクロックを持たない脳が時間順序をどのように表現しているかについて、新しく重要な知見を示した。

第一期生には極めて活力と個性の強い研究者が多く、そのことが研究に反映されて極めてレベルの高い研究成果を生み出したと考えている。この事業が個人型であることに加えて、ポストク採用という他には見られない恵まれた環境の中に、それに相応しい研究者が集まってこの成果に結びついたものと考えている。領域会議では、その研究範囲の広さにもかかわらず、きわめて活発な意見の交換があり、かつ異なる分野の研究のコンセプトや実験方法を利用して新しいコンセプトや実験方法を創生した例が複数見られた。領域会議が新しい研究分野をクリエイトする会議であったことも、研究者の優秀性を示していると考えている。

10. 評価者

研究総括 沢田 康次 東北工業大学通信工学科 教授

領域アドバイザー氏名

有川 節夫	九州大学 副学長
石川 正俊	東京大学大学院情報理工学系研究科 教授
伊藤 貴康	石巻専修大学理工学部 教授
乾 敏郎	京都大学大学院情報学研究科 教授
大森 隆司	北海道大学大学院工学研究科 教授
竹林 洋一	静岡大学情報学部 教授
東倉 洋一	国立情報学研究所人間・社会情報研究系 教授
徳田 英幸	慶応義塾大学環境情報学部 教授
宮原 秀夫	大阪大学 総長

(参考)

(1)外部発表件数

	国内	国際	計
論文	80	80	160
口頭	162	133	295
その他	20	9	29
合計	262	222	484

(2)特許出願件数

国内	国際	計
6	1	7

(3)受賞等

- ・Journal of Molecular Evolution, Zuckerkandl Prize(2001)
- ・日本生物工学会論文賞(2001)
- ・日本進化学会研究奨励賞 (2003) 「進化学の実験的及び理論的研究」
- ・Neuroscience Research 優秀論文賞(2003)

別紙

協調と制御」領域 研究課題名および研究者氏名

研究者名 (参加形態)	研究課題名 (研究実施場所)	現職 (応募時所属)	研究費 (百万円)
大澤 幸生 (兼任)	自然現象・社会動向の予兆発見と利用 (筑波大学社会工学系)	筑波大学社会工学系 助教授 (同上)	75
加藤 和彦 (兼任)	オープンネットワークのための基盤システムソフトウェア (筑波大学電子・情報工学系)	筑波大学電子・情報工学系 助教授 (同上)	78
北澤 茂 (兼任)	時間順序の脳内協調表現 (順天堂大学医学部)	順天堂大学医学部 教授 (工業技術院電子技術総合研究所 主任研究官)	85
小池 康晴 (兼任)	生体の力学的な信号に基づくコミュニケーション (東京工業大学精密工学研究所)	東京工業大学精密工学研究所 助 教授 (同上)	86
佐藤 茂雄 (兼任)	量子ビットを用いた知能デバイス (東北大学電気通信研究所)	東北大学電気通信研究所 助教授 (同上 助手)	109
高谷理恵子 (兼任)	感覚情報・身体制御に関する発達過程 (福島大学教育学部)	福島大学教育学部 助教授 (同上 講師)	89
中小路久美代 (兼任)	知的創造作業を支援するインタラクシ ョンパターン (東京大学先端科学技術研究センタ ー)	東京大学先端科学技術研究センタ ー 特任教授 (株)SRA 主席補)	74
中村 克樹 (兼任)	非言語コミュニケーションの脳内機能メ カニズム (国立精神・神経センター神経研究所)	国立精神・神経センター神経研究所 部長 (京都大学霊長類研究所 助手)	84
開 一夫 (兼任)	乳幼児における人工物・メディアの発 達の認識過程 (東京大学大学院総合文化研究科)	東京大学大学院総合文化研究科 助教授 (同上)	107
前田 太郎 (兼任)	人間共生型インターフェイス (NTT コミュニケーション科学基礎研 究所)	NTT コミュニケーション科学基礎研 究所 主幹研究員 (東京大学大学院情報学環 講師)	87
山本 雅人 (兼任)	濃度制御に基づくDNA コンピューティ ング (北海道大学大学院工学研究科)	北海道大学大学院工学研究科 助 教授 (同上)	92
四方 哲也 (兼任)	共生関係への移行に伴う遺伝子代謝 ネットワークの再編成 (大阪大学大学院情報科学研究科)	大阪大学大学院情報科学研究科 助教授 (同大学院工学研究科 助教授)	95

研究課題別評価

1. 研究課題名 :自然現象・社会動向の予兆発見と利用

2. 研究者氏名 :大澤 幸生

ポスドク研究員 :吉川 史子 (研究期間 2001.4.1 ~ 2002.3.31)

ホスドク研究員 :中村 洋 (研究期間 2002.4.1 ~ 2003.9.30)

3. 研究の狙い :

本研究で大澤らは意思決定のために重要となる事象・状況・または情報を「チャンス」と称し、チャンスを発見する手法を研究してきた。その目標は、ダイナミックかつ複雑に変化する実社会の中で個人および組織がリスクに負けず、むしろ変化の中から生まれ出るチャンスの価値を正しく捉えて行動する方法を確立しようというものであった。その成果は書籍や論文の他、ビジネス等に役立つ実学としての成果を生んできた。次に、これらの研究の概要について概説する。

人間の意思決定にこれまでにない影響を及ぼすようなチャンスには未知因子が関与しており、人がチャンスに働きかけた反応から初めてその未知因子を感覚的に知ることが多い。例えば、ファッションデザイナーがある青年の服装に関心を持ったら、その青年に話しかけてみることで新しい流行実現への有効なステップとなる。

このため、大澤らが確立してきたチャンス発見手法の基礎は

チャンスの価値を理解して行動するまでに人が環境と相互作用を行ってゆく過程の理解のプロセスを促進するため、環境についてのデータを解析し可視化する手法という2点である。

4. 研究結果 :

これら2点を具体的に述べ成果を示す。

[チャンス発見過程のモデル化 (論文[1]など)] (上記 に相当)

チャンスを捉えることに関心を持ち、次に目の前の事象が意思決定を左右する価値を持つことを理解し行動に至るまでの人の認知行動過程について、アンケート調査や視点軌跡の計測による実証研究を進めた。

チャンス発見の過程を人が順調に進む為には、チャンスに気付く初期の局面では信頼できる情報源などの「周辺情報」が有効であり、次にチャンスの意義を詳しく理解する局面ではチャンスとその関連事象についての因果関係、チャンスの反面に潜むリスクを具体的に説明する「中心情報」が有効となるのが一般人への意識調査から明らかとなった。また、チャンス発見の過程を注視点の遷移過程としてモデル化した。

[人と環境の相互作用の、データマイニングによる円滑化 (論文[3, 6]など)]

(上記の から を得る理論付けに相当)

「人がチャンスを発見するプロセス」についての上記モデルから派生した「チャンス発見を促進するプロセス」として「二重螺旋モデル」(図 1)を仮定し、この効果をチャンス発見の現場において評価した。このモデルでは、人は「チャンスを求める関心を持つ」「チャンスに気付く」「チャンスの意味を理解し意思決定を行う」「行動を通し環境に働きかけてゆく」「(次の)新しいチャ

ンスを求める」・・・というスパイラルな過程プロセスを辿る。一方コンピュータは、人の関心に関連して環境から獲得した「環境データ」およびその人自身がチャンスの理解を進める際の声やメモを文書化した「主体データ」に対してテキストマイニングを適用して人のチャンス発見を促進する。

チャンスらしきものと環境あるいは人の関心の中にあるさまざまな出来事との関連を可視化し、人が自分でも明示的には気付いていなかった潜在的な関心を満たすチャンスまで見出すのを促進するのが、チャンス発見におけるデータマイニングの役割である。この目的に則したデータマイニングツールを、アルゴリズムと実用性の両面から研究して構築していった。

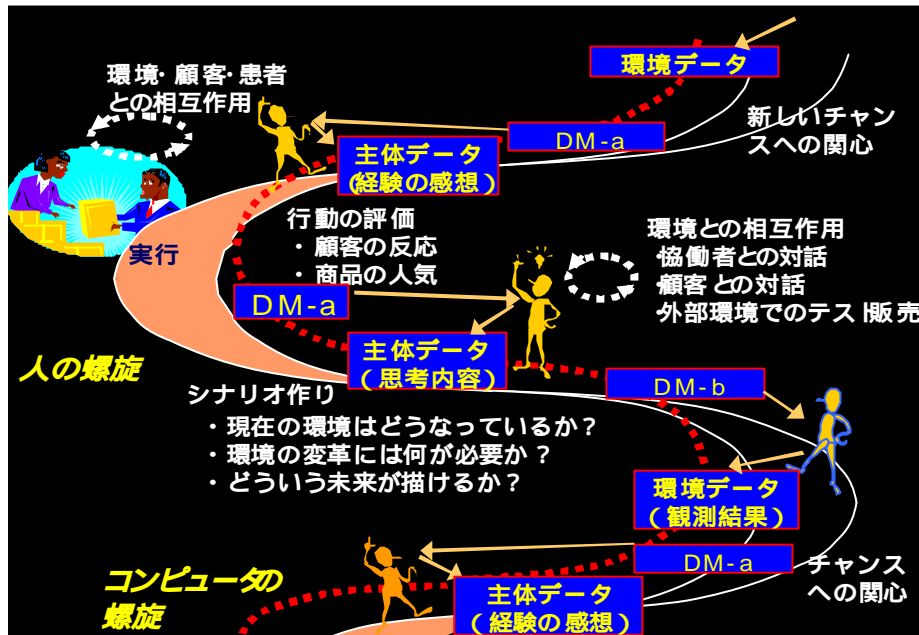


図1 チャンス発見プロセスの二重螺旋モデル

[チャンス発見志向のデータマイニングとその結果の可視化手法 (論文[3,5,6]など)
(上記 に相当)

大澤独自のアルゴリズムを初期モデルとして研究と開発を進めてきた「キーグラフ」では、データの中で高頻度に同時生起する事象たちの塊 (例えば、デパートでの客の一品の購買を1事象とするデータで、{チーズ、ワイン、クラッカー}のように同時購買される商品たち)を「島」と捉える。各島は、その上の事象たちが発生する比較的ありふれた状況を現す。さらに島と島の間を橋を渡す事象を捉えて視覚化することにより、状況を変化させるチャンスの候補を呈示する。例えば、夕食の食材からなる島とパーティの食材からなる島の間にはワインがあれば、ワインの出し方次第で夕食はパーティのような場に変えることもできるかも知れない。このようなシナリオ想像による予兆・チャンスの発見を支援するため、データ可視化の各種研究を行なった。また、WWW からのチャンス発見の手法、議論での話題展開のきっかけとなった発言を発見する手法もチャンス発見の有効なツールとなった。

さらに、データ可視化手法であるキーグラフを「触覚」でも感じ取ることのできるインターフェイスに改良し、これを用い二重螺旋プロセスに従って適用した紡績会社を新商品のヒット実現の成功まで至らせた。改良キーグラフでは既によく売れている生地として典型的な「きれいめ (お洒落な

スーツ等に使う清楚な生地」と「嗜古し(アウトドア向けの粗い生地)」という二つの客層のアイテム集合に相当する二つの島を得た。この両者の境界に位置する生地(「橋渡し」と記したアイテム)を量産したところ、それぞれのタイプの服装を交互に着用する若者らのマーケットを創出した。このアプローチは、他業種においても各種製品開発等に役立った。

5. 自己評価 :

1). 研究計画 :

研究者として自分の持つ手法、自分の創った技術を社会的に有用な問題に応用するというボトムアップな考え方だけではなく社会的ニーズから予兆発見、チャンス発見という問題を捉えたことが、自分と研究グループのメンバーたちの熱意を高めたと思う。その意味でよい課題を元に、良い計画を立てることができた。

2). 研究内容 結果 :

必ずしも万人にとって平易に理解できる内容だとは思わないが、結果的に社会において実用性を発揮するに至ったのは、元々社会性の強かった研究計画を満たす内容となり、ビジネスなどに対する強いアピールを示す結果となったものと考えている。

一方、サイエンスの研究としてみれば、万人の認める客観的な法則などではなく、あえて人の主観的な「気付き」を予兆発見・チャンス発見という問題に取り込んだことが成功要因となったと考えている。本来多数派の信念に過ぎない「客観性」に固執するよりも、人が真実を発掘するときに見逃さぬ主観的な気付きを見逃さないことが、科学的アプローチとしても今後重要となるだろう。

3). ポスドク参加型について

ポスドク研究員の参加の有効性については評価が難しい。場合によっては、リサーチスタッフとして雇用した大学院生の方がポスドクに比較して有用となり、給与面で貢献度と給与が逆転することからグループのチームワークがとりにくくなる危険性はある。可否を徹底的に議論してからこの制度を続行すべきであろう。

現実問題として、ポスドクは安定な職ではないため、有能な研究者がポスドクに就く動機づけはわが国では低い。この点は、他の職業も流動的である欧米とはいささか異なっている。

国内の助手ポストが減少したという面だけみても、わが国の科学研究にとってのダメージは大きい。大学が研究の若い主戦力を失い、かつ、博士課程修了後に国内に研究成果を還元する動機づけが若手の研究者にとって減ったことが招いている深刻な事態を、単なる現場のつぶやきとして看過するならば、わが国の未来は憂える余地さえもない。

大学の人事政策に限っても近年の改革には疑問の余地が多いが、欧米のスタイルに習う場合、日本固有の社会事情をどれだけ議論したかによって成功の可能性があまりに異なるという事実だけは第一に肝に命じねばなるまい。

6. 研究総括の見解 :

数多くのデータからいくつかのデータのかたまりを連結するキーグラフを発明し、それを何人かで議論する中から、予兆もしくはチャンスを発見しようとする極めて斬新的独創的な提案である。すでにさまざまな分野で実験・実証を行い多くの成功例を得ている。この新しい手法は情報学のみならず、統計解析・意思決定論・発見科学などに新しい風を吹き込むものとして高く評価できる。基礎付けもはじめているが、定量的な側面が加わればさらに大きく展開すると考えられる。

7. 主な論文等 :

1. Yukio Ohsawa and Yumiko Nara: Decision Process Modeling across Internet and Real World by Double Helical Model of Chance Discovery, New Generation Computing (Springer Verlag and Ohmsha), Vol.21 No.2, pp.109-122, 2003.
2. Yukio Ohsawa: KeyGraph as Risk Explorer from Earthquake Sequence, Journal of Contingencies and Crisis Management Vol.10, No.3, pp.119-128, 2002.
3. 3 .Naohiro Matsumura, Yukio Ohsawa and Mitsuru Ishizuka: PAI: Automatic Indexing for Extracting Asserted Keywords from a Document, Journal of New Generation Computing, Vol.21 No.1, pp.37-47, 2002.
4. Yukio Ohsawa: Chance Discoveries for Making Decisions in Complex Real World, New Generation Computing (Springer Verlag and Ohmsha), Vol.20 No.2 pp.143-163, 2002.
5. 松村 真宏, 大澤 幸生, 石塚 満: テキストによるコミュニケーションにおける影響の普及モデル, 人工知能学会論文誌 Vol.17, No.3, pp.259-267, 2002.
6. 臼井優樹, 大澤幸生: 組織内合意形成のためのチャンス発見 - 生地メーカーにおける触視覚補完型 KeyGraph の効果 -, 知能と情報(日本知能情報ファジィ学会誌) Vol.15, No.3, 2003

論文 22 件 (上記を含む)

出版 :12 件

口頭発表 :48 件

研究課題別評価

1. 研究課題名 :オープンネットワークのための基盤システムソフトウェア

2. 研究者氏名 加藤 和彦

ポスドク研究員 大山 恵弘(研究期間 2001.4.1 ~ 2003.3.31)

3. 研究の狙い :

本研究は、オープンなネットワーク環境で稼動することを最初から前提としたソフトウェア体系の再構築と、その体系に基づいた実的な基盤ソフトウェアを設計開発することを目的とする。具体的には以下の研究を行う

- オープンネットワーク環境を前提とした基盤ソフトウェアの構成モデルを新たに構築する。オペレーティング システム、ミドルウェア、アプリケーションソフトウェアのそれぞれが提供すべき機能の系統的な再構成を行う。
- アプリケーション独立に資源アクセス制御および資源消費制御を行うための方式を開発する。この方式は、さまざまなプラットフォームおよびアプリケーションにおいて必要となる資源の拡張的な定義技術を含む。また、資源アクセスを行うための API の統一的な記述とその安全な実行法、およびポリシーモジュールによる実行時検査機構を開発する。
- 資源アクセス制御および資源消費制御機構を有効に利用するためのポリシープログラミング技術を開発する。ポリシー記述をコンポーネントモジュール化し、再利用性を高める方法を開発する。

4. 研究結果 :

従来のオペレーティング システム環境およびアプリケーションソフトウェアの構成を根本的に変えるのではなく、従来環境との互換性を保ちながら、かつ、オープンなネットワーク環境において安全にソフトウェアを流通 実行させる方法論を研究した。その結果、以下のような研究結果を得ることができた。

1. オープンネットワーク環境上でソフトウェアを安全に流通 実行するための構成モデルの設計とその実装を行い、SoftwarePot システムと名付けた。オペレーティング システムおよびアプリケーションには変更を加えず、ミドルウェア層において実現する方式を開発した。
2. アプリケーション独立に資源アクセス制御を行う方法として、システムコールの捕捉によって実現する方式を開発した。仮想計算環境を作り上げることによって、ファイルやネットワーク等の計算機資源を仮想化し、アプリケーションの実行時のアクセスを制御する。仮想化機能においては、ユーザが柔軟に定義を与えることができるようになっている。
3. 計算機資源へのアクセス制御を行うポリシーを動的に切り替える機構、および、専門家によるポリシー作成を支援する GUI 環境を開発した。また、ポリシーを動的に生成するアプローチの一貫として、ソフトウェア・コンポーネントごとに正常動作検査ポリシーを自動作成し、コンポーネントを利用して構築されたソフトウェアの正常動作モデル作成において再利用する方

法を開発した。

5. 自己評価：

ほぼ予定した計画通りに研究を遂行することができたと自負している。最初の 10 ヶ月に、問題分析や過去の研究のサーベイや、予備的な検討、実験、試験的な設計を行い、その結果、ファイルシステムごとサンドボックスに入れ、仮想化し、移動可能とするという基本設計の着想を得ることができた。この着想により、既存のソフトウェア環境と極めて互換性高く、安全にソフトウェアを流通・実行し、セキュリティポリシー記述を比較的容易に行い、実地的な安全性を確保することが可能となった。その後の研究期間は、この着想に基づいて設計を進め、実装と評価を繰り返しながら、実用性の高いシステムへと仕上げていった。またポリシープログラミングを容易化させる研究も並行して行い、いくつかの成果を得ることができた。

試みながらも、アプローチをうまく見つけられなかったのは、資源消費制御を OS カーネルに改変を加えることなしに実現する方法である。これは世界的に見ても、未だによい方法が見つかっていない研究課題であり、今後の課題としたい。

私はこれまでに約 20 年間に渡っていくつものシステムソフトウェア開発に関する研究を行ってきたが、その中で今回の研究が最も他の同分野の研究者・開発者からの評判が高い。平成 15 年 10 月より CREST 研究（「情報社会を支える新しい高性能情報処理技術」(研究総括：田中英彦 東京大学教授)）の支援を受けているが、CREST 研究として採択となったのも、幸いにして、本さきがけ研究での研究成果が評価を受けたためである。研究総括やアドバイザーの先生方の御指導・御鞭撻があったからこそであり、心より感謝している。

本さきがけ研究においては、私の専門とする研究分野以外の数多くの研究者の発表を聞き、刺激を受け、議論をすることができた。今回の研究で開発した SoftwarePot システムは、本さきがけ研究の領域名である「協調と制御」を、ソフトウェア・セキュリティの分野において、正に実現している。外部由来のソフトウェア環境と内部由来のソフトウェア環境が、ユーザの制御下で（すなわちセキュリティポリシーの制御下で）協調し合う SoftwarePot の着想は、今回のさきがけ研究を開始して後に得たものであり、領域会議等での議論が影響を与えている部分があると思われる、大変に感謝している。CREST 研究のタイトルは「自律連合型基盤システムの構築」というものであり、「自律と連合」という発想も「協調と制御」という領域名から影響を受けている部分がある。

最後にポスドク参加型の有効性であるが、私にとって極めて有効であり、得られた研究成果は、この制度のおかげであったと言っても過言ではない。ポスドク研究員として参加して頂いた大山恵弘氏には、東京大学大学院理学系研究科博士課程情報科学専攻を修了してすぐに 2 年間、当プロジェクトに参加して頂くことができた。同氏が極めて高い才能を有することは、同氏が本年 4 月に出身研究室の助手として採用されたことから窺われよう。連日続いた同氏との白熱した議論、同氏の驚嘆すべき調査能力と実装能力のおかげで SoftwarePot の研究を立ち上げることができた。現在の CREST 研究の主要メンバーとしても参加して頂いている。ポスドク参加型の恩恵を十分に享受することができ、心より感謝している次第である。

6. 研究総括の見解：

オープンな環境における基盤ソフトウェアの基本設計を根本から見直して、そのモデルに基づいたソフトウェアである「SoftwarePot」という構成モデルを研究開発・実装し、かなり完成度の高い

レベルのソフトウェア実行システムとして実現したことは極めて高く評価できる。

SoftwarePot は従来のよりも低コストで、資源をより細かな単位で仮想化できる点、さらに、Linux, Solaris, PocketPC, Windows に対応する実装を行っている点など高い評価を得ている。

7. 主な論文等：

1. 大山恵弘, 神田勝規, 加藤和彦, 安全なソフトウェア実行システムSoftwarePotの設計と実装, コンピュータソフトウェア, 日本ソフトウェア科学会, Vol. 16, No. 6, pp. 2-12, 2002年11月 .
2. 阿部洋丈, 加藤和彦. セキュリティポリシーの動的切替機構を持つリファレンスモニタシステム. コンピュータソフトウェア, 日本ソフトウェア科学会, Vol. 20, No. 3, pp. 2-16, 2003年5月 .
3. 大山恵弘, 王維, 加藤和彦. 異常検知システムにおける正常動作データのモジュール化. 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. SIG 10 (ACS 2), pp. 36?47, 2003年7月 .
4. 阿部洋丈, 大山恵弘, 岡瑞起, 加藤和彦, 静的解析に基づく侵入検知システムの最適化, 情報処理学会論文誌 :コンピューティングシステム (採録決定) .
5. 5 .K. Kato, Y. Oyama, K. Kanda, and K. Matsubara, Software Circulation using Sandboxed File Space-Previous Experience and New Approach. Proc. of 8th ECOOP Workshop on Mobile Object Systems, June 2002, Malaga, Spain .
6. 6 .K. Kato and Y. Oyama, SoftwarePot: An Encapsulated Transferable File System for Secure Software Circulation, Proc. of Int. Symp. on Software Security, Springer, LNCS-2609, 2003. pp. 112?132 .

論文 28件 (上記含む)

口頭発表 :15件

特許

1. 出願番号 特願2001-380629, 発明者 加藤和彦、大山恵弘,
発明の名称 安全なソフトウェア流通システム, 出願日 2001年12月13日
(2002年12月に、米国出願を含むPCT出願中)

研究課題別評価

1. 研究課題名 時間順序の脳内協調表現

2. 研究者氏名 北澤 茂

ポスドク研究員 高橋 俊光(研究期間 2001.4.1 ~ 2003.3.31)

ホスドク研究員 渋谷 賢(研究期間 2003.4.1 ~ 2003.9.30)

3. 研究の狙い：

脳のニューロン間の信号の伝達には時間がかかり しかも多数のループがあるので、信号の前後関係は逆転しやすい。しかし、信号の順序の誤りは生存を脅かす可能性があるから、脳の中には、時間を安定に表現するための何らかの原理が隠されているはずだ。100-1000 億のニューロンを協調させて高度な情報処理を実現している脳の中で、信号の時間順序がいかに決定され表現されているかを明らかにし、脳の中の時間情報処理の基本原理に迫ることが本研究の大きなねらいである。

本研究では、信号Aと信号B という2個の信号の時間順序を正しく判断する、という一見簡単な課題を脳がどのように解決するのかを研究の対象にした。特に、右手と左手を短い間隔で触った時の時間順序を脳がどのようにして判断しているかを、ヒト被験者を対象にした心理物理的手法と非侵襲脳活動計測法を用いて調べた。さらに神経細胞レベルでの解明を目指して動物実験モデルを作成した。

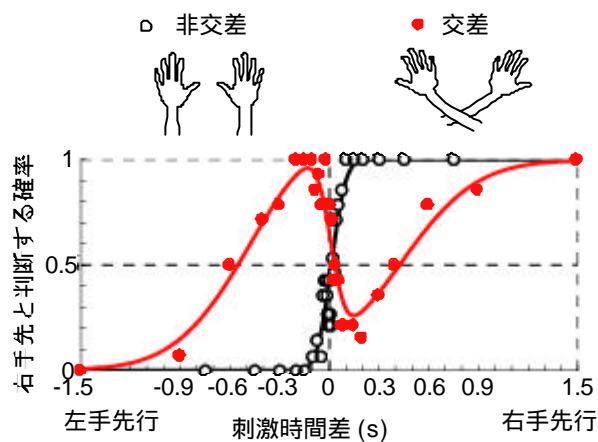
4. 研究結果：

1) 手の交差による主観的時間順序逆転現象の発見

右手と左手にそれぞれ刺激を与えて時間順序を判断させると、通常は時間差 0.03 秒程度で7割、0.1 秒で95%以上の正解が可能である(下図白丸)。しかし、腕を交差させると、刺激時間差 0.3 秒程度の範囲で時間順序の判断の逆転が増え、極端な場合には判断曲線がN字型を示す(下図赤丸)。刺激時間差が1.5秒になると再び正解することから本現象は単なる右手と左手の取り違えでは説明できない。

一方、手に持った棒の先端に与えた刺激の時間順序を判断させた場合は、手を交差することなく棒を交差するだけで時間順序が逆転した。

皮膚受容器からの信号は、手あるいは手に持った棒など、その信号の原因が生じたと推定される空間内の適切な位置に関連付けられて初めて時間的に順序付けられると我々は結論した。



手の交差による主観的時間順序の逆転

2) 非侵襲脳活動計測

脳のどこでこのような順序判断が成立するのかを調べるために、ヒトの非侵襲脳活動計測を行った。機能的磁気共鳴画像法(fMRI)を用いた実験では、主として左半球の中側頭回(動きを検出する領域の近傍)と、運動前野(空間座標の表現がある)ならびにブロードマンの44-47野に時間順序判断に関わる活動が検出された。この結果から、2つの刺激が空間で定位されるとともに、動きの情報となり、これらが統合されて時間順序が再構成されるという動き投影仮説を提出した。一方、脳磁気計測では、刺激直前の後頭葉の波の位相と腕交差時の判断の逆転の間に相関があることを示唆する結果が得られた。

3) 動物モデルの作成

ニューロンレベルでの脳内メカニズムの解明を目指して、サルとマウスについて時間順序判断課題を開発し、訓練した。マウスに関しては免疫抗体染色法による immediate early gene の発現領域の検索、サルに関しては大脳皮質からのニューロン活動計測を開始した。

5. 自己評価：

1) 研究計画

研究計画に関してはヒトの心理物理実験による時間順序判断メカニズムの大枠を掴み、非侵襲脳活動計測によって関与する領域を絞り、さらに動物実験で細胞レベルの活動を調べるといった戦略が明確であり、評価できる。

2) 内容と結果

結果については、腕交差による時間順序判断の逆転現象の発見は心理物理の発見の中でもかなり大きいと自負している。我々が Nature Neuroscience に発表した直後に、カナダとイギリスのグループも同様の現象を報告した(Shore et al., 2002)。同時期に世界の異なったグループで同様な発見が相次ぐという状況は、研究内容の重要性を示すものと考えている。一方、非侵襲脳活動計測に関しては、fMRIとMEGで重要な結果を得ているが、いまだ出版に到らなかった点が残念である。動物モデルについては、困難を極めたマウスで成功した点は評価できるが、実際のニューロンレベルの研究は着手したのみだった。今後の着実な成果に結び付けたい。

3) ポスドク制度について

本研究のように複数の実験手法を組み合わせで行う場合には、特定の実験手法に精通したポスドク研究員の参加が不可欠である。非侵襲脳活動計測のスペシャリストである高橋メンバーの貢献は特筆できる。また、残り半年で参加してくれた渋谷メンバーも、すでに論文2本に相当する実験データを蓄積してくれた。心から感謝したい。

6. 研究総括の見解：

両手を逐次刺激する場合、手交差によって主観的時間順序に逆転が起きる現象を発見し、計算機のようなクロックを持たない脳が時間順序をどのように表現しているかについて、新しく重要な知見を示したことは極めて高く評価できる。fMRIの測定から、ふたつの刺激が空間で定位されるとともに、動きの情報となり、統合されて時間順序が再構成される「動き投影仮説」を提案し検証

を試みている。脳の極めて複雑な機能のうち量的な計測が行い易い時間順序の問題を取り上げ、明快な実験データを示すことにより、問題解決の出口が見えそうな予感を与えたことは、脳研究の中でも特筆すべき成果であり、将来が期待される。

7. 主な論文等：

論文

1. Yamamoto S, Kitazawa S. Reversal of subjective temporal order due to arm crossing. *Nat Neurosci* 4: 759-765, 2001.
2. Yamamoto S, Kitazawa S. Sensation at the tips of invisible tools. *Nat Neurosci* 4: 979-980, 2001.
3. Kansaku K, Kitazawa S. Imaging studies on sex differences in lateralization of language. *Neurosci Res* 41:333-337, 2001.
4. Kitazawa S, Yin PB. Prism adaptation with delayed visual error signals in the monkey. *Exp Brain Res* 144: 258-261, 2002.
5. Kitazawa S. Optimization of goal-directed movements in the cerebellum: a random walk hypothesis. *Neurosci Res.*48: 289-294, 2002.
6. Kitazawa S. Where conscious experience takes place. *Consciousness & Cogn* 11: 475-477, 2002.

解説

1. 山本慎也、北澤茂 .道具の先端における知覚 .*脳の科学* 24: 67-69, 2002.
2. 北澤 茂 .腕交差が顕す時間順序判断の空間依存 .*VISION* 14:79-82, 2002
3. 北澤 茂 .朗読聴取時の磁気共鳴画像に対する独立成分解析 .*脳* 21 5:381-385, 2002.

学会抄録 (口頭発表)

1. Kitazawa S, Yamamoto S: Reversal in temporal-order judgement due to arm crossing: a quantitative analysis. *Neurosci Res Suppl* 25: S123, 2001
 2. Yamamoto S, Kitazawa S: Reversal of subjective temporal order due to stick crossing. *Soc Neurosci Abstr* 27: 2522, 2001
 3. Kitazawa S, Takahashi T, Kansaku K: Blind separation of brain activity during comprehension of compressed speech. *Soc Neurosci Abstr* 27: 2519, 2001
 4. Kitazawa S: Optimization of goal-directed movements: a random walk hypothesis in the cerebellum. 462.5. 2002 Abstract Viewer/Itinerary Planner. Society for Neuroscience, 2002. Online
 5. Wada M, Yamamoto S, Kitazawa S: Effects of handedness on the temporal order judgment of successive hand stimuli. 673.19. 2002 Abstract Viewer/Itinerary Planner. Society for Neuroscience, 2002. Online
 6. Wada M, Kitazawa S: Temporal order judgment in mice. 172.17 *Soc Neurosci Abstr* 29, 2003.
- 他 12 件

受賞

2003年7月24日 Neuroscience Research 優秀論文賞 (論文5 に対して)

研究課題別評価

1. 研究課題名 : 生体の力学的信号に基づくコミュニケーション

2. 研究者氏名 : 小池 康晴

ポスドク研究員 関 庚甫(ミン キョンボ) (研究期間 2001.4.1 ~ 2003.9.30)

3. 研究の狙い :

人間と機械のインタフェースを考える場合、機械の設計段階で如何に人間の特性を考えてデバイスを作るかで操作性が大変異なる。インテリジェントなヒューマンインタフェースとは、

(a) 人間が機械の特性を感じることができる。

(b) 機械が人間の特性を感じることができる。

これら両方が実現されてはじめて成り立つ。

インテリジェントなデバイスとして、自動運転が考えられる。現在、自動運転が行われている物の一つとして、飛行機の操縦があるが、今後は、自動車の運転なども ITS の進歩とともに実現されてくるものと予想される。しかし、自動操縦の結果と人間の行う操作が同じであれば問題ないが、人間が自動操縦に逆らった操作をしようとした時はどのようにするかは二つに別れる。一つは、自動操縦を優先させる、もう一つは人間の操作を優先させることである。自動操縦のアルゴリズムが複雑になればなるほど人間にとって、どうして自動操縦の操作が生成されたのか理解できない。どうして生成されたのか理解できなければ、その操作の後、機体がどのように操作されるのかを予想することもできない。人間の脳には制御対象の結果を予想するモデルと、結果を生み出した操作入力を予想するモデルがそれぞれ存在すると考えられる。簡単のため、前者を推定モデル、後者を生成モデルと呼ぶことにする。

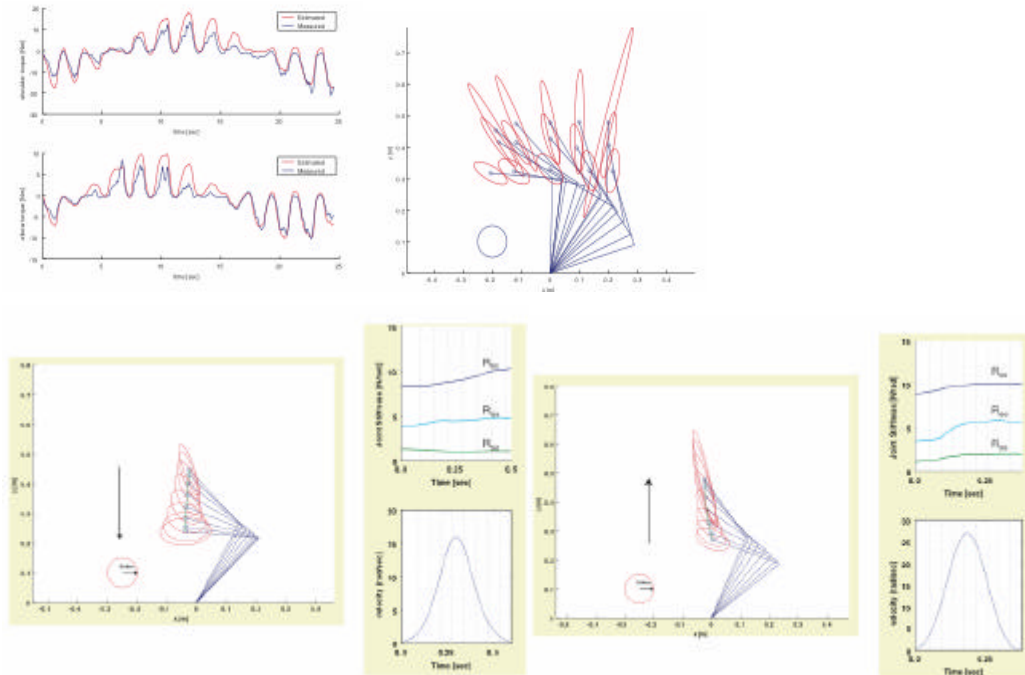
運動の学習は、これら二つの内部モデルを如何にうまく獲得するかという問題に置き換えることができると考えている。さらに、運動の学習だけでなく、高次の機能であるコミュニケーションも、推定モデルと予測モデルを組み合わすことで実現していると考えている。たとえば、(a)の人間が機械の特性を感じるということは、機械の内部モデルを人間が理解することになり (b)の機械が人間の特性を感じるということは、人間の内部モデルを機械が理解することである。人間同士のコミュニケーションでは、「あることを言えば、相手がどのように感じるのか」結果を予測し、また、「このように感じてほしいので、どのように言えば良いか」を考え、言葉を生成することができてはじめて会話が成立する。このように、協調して作業を円滑に行うためには、人間同士だけでなく人間と機械(扱う道具)とが理解しあい、適応的に順応する仕組みを構築する必要がある。例えば、初心者にとっては、熟練者のように滑らかに運動を行うことよりも、確実に目的を達成することに主眼を置くと思われるので、例えば、関節のインピーダンスを高くして自由度を下げ、操作を簡単にし、熟練者は、できるだけ関節のインピーダンスを下げ、自由度を高くし、滑らかで速い操作を実現させることができるデバイスの作成を目指す。

4. 研究結果 :

4.1 筋電信号からのインピーダンス推定

筋電信号を運動指令入力であるとし、筋肉のバネ的な性質と自然兆の変化をそれぞれ運

動指令の1次式と近似し、運動指令の2乗の項までを含んでトルクを計算する数式モデルを考える。その式の各パラメータを推定した結果、下図のように、計測したトルクとほぼ等しいトルクを推定することができた。さらに、静止中のステイフネス楕円体を計算すると、これまでマニピュラタムを用いて計算してきたステイフネスとほぼ同様の性質を持っていることが分かった。

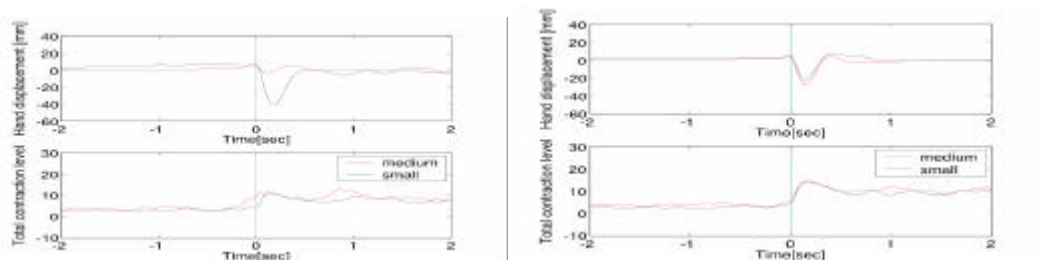


さらに運動中の関節トルクを逆ダイナミクスの計算により求め、ステイフネスを計算することで、上図のように、運動中のステイフネスの変化を時々刻々と調べることができた。

4.2 感覚入力情報と内部モデル獲得に関する心理物理実験

(1). Size-Weight illusion における重さの予測と知覚 認識

同じ重さであっても大きさが異なると小さい物体を重く感じる。この原因を探るため、物を持つときの腕の動きや筋電信号を計測した。また、計測した筋電信号から筋肉の活動を表すステイフネスと相関がある総活性度 (TCL) を計算した。下図は、左が最初に物体を持ち上げたとき、右が重さが同じと答えた20回目の記録である。重さが異なると答えたときは、物を持つ前から重さの予測に応じて腕を固くしていることが分かった。



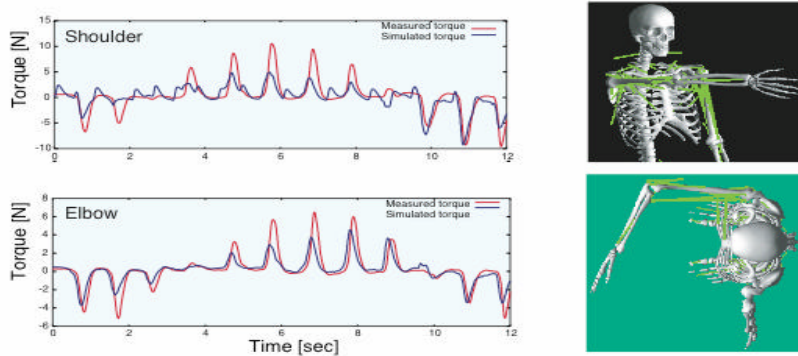
(2). Fitts' law と筋肉の活動

運動速度と精度の間には、Fitts' law と呼ばれる法則があることが知られている。具体的には、難しさが大きくなればなるほど、運動時間が長くなるというものである。

また、同時に計測した筋電信号を計測したところ、運動が終わったあと、筋肉の活動が徐々に低下していた。このことから、運動の終わりでは、同時活性化が起こっていることが示唆された。この結果は、これまで運動計画の理論として提案されている終端誤差分散最小規範では、説明ができない現象である。また、終端の精度を求めたときは、求めないときと比較して運動終端での筋肉の総活性度が増加している傾向にあることが分かった。

4.3 強化学習を用いた筋肉骨格系のモデル作成

筋肉の付着位置やモーメントアームなど、筋肉骨格系のパラメータを調整し、精度の高い筋肉骨格系のモデルを構築した。このモデルに、実際に計測した筋電信号を入力させ、出力である関節トルクを比較したところ、精度よく推定できることが分かった。



さらに、強化学習により、2関節6筋のモデルを用いて、鉛直面内の姿勢制御が可能になった。

4.4 筋電信号とハプティックデバイスによる双方向通信ヒューマンインタフェース装置の作成

(1) 電気刺激による教示

力をどのくらい出したらよいのかを他人に教えるときに、たとえば、習字を習うときのように先生に手を持ってもらって力の大きさを教えてもらう場合と、電気刺激により筋肉を収縮させ力を発生させたときで、力を再現した結果を比較した。

その結果、手を使って受動的に力を感じるよりも、電気刺激により、筋肉が活性化して、筋紡錘などのセンサにより筋張力を計測した場合の方が再現性が良かった。このことから、ヒューマンインタフェースとして、双方向のデバイスを考えたとき、電気刺激は有効な手法であることが確認された。また、スティフネスについても同様の実験を行い、電気刺激によりスティフネスも定量的に教示可能であることが分かった。

(2) 筋電信号を通信するヒューマンインタフェース装置

VR技術を用いて作成し実験装置を用いて、落下してくるボールを手の位置にあるカーソル(パドル)で打つ、パドリング実験を行った。パドルの硬さを筋電信号に応じてリアルタイムに変化させることで、パドルの動きだけでなく、打つときの硬さを調節して同じ高さにボールを打つタスクを実現した。これは、現実世界では起こりえないが、ラケットの弦の強さをリアルタイムに変化させることに対応している。今後は、評価実験を行い、より良いインタフェースの設計につなげていきたい。

5.自己評価：

最初に考えていた4つの目標は、ほぼ達成できたと感じている。一番の成果は、筋電信号だけから定量的に正しいと思われるスティフネスを推定する方法を確立したことである。この成果により、これまで分かっていなかった心理物理現象の解明につながった。さらに、今後、ヒューマンインタフェースなどへの応用にもつながっていくと思われる。また、ポスドク研究員は、他の研究費では予算的に確保が難しいため、個人の研究を行うために長期的に契約が可能なこの制度は大変有用であった。

6.研究総括の見解：

力学的なコミュニケーションという立場から、介護ロボットなどの協調的な力学的インターフェイス作成のために必要な筋電位からのスティフネスの正しい推定方法を確立した。人が機械を感じ、機械が人を感じるという最初のコンセプトの基本的な実現可能性を証明したことは評価できる。基本的なものの周りにあることや応用展開、特に機械システム側の研究に更なる進展を期待したい。

7.主な論文等：

論文誌

1. Jaehyo Kim, Makoto Sato, Yasuharu Koike (2002). "Human Arm Posture Control Using the Impedance Controllability of the Musculo-Skeletal System Against the Alteration of the Environments." The Institute of Control, Automation and Systems Engineers 4(1) 43-48.
2. 金 載然, 洪 性寛, 佐藤 誠, 小池 康晴 (2002). "SPIDAR を用いた size-weight illusion の検証." 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 7(3), 347-345.
3. 小池 康晴, 広瀬 秀顕, 飯島 敏夫 (2003)筋電信号を用いた腕の運動制御.日本神経回路学会誌,10(1),2-10

他 1 件

国際会議 (口頭発表)

1. Jaehyo KIM and Yasuharu KOIKE (2001). Human Arm Posture Control Using the Impedance Controllability of the Musculo-Skeletal System against the Alteration of the Environments. Proceedings of the 32nd ISR(International Symposium on Robotics), Seoul, Korea.
2. 2.Y.Koike, O. Shimada, T. Shin, M. Sato (2002), DIRECT ARM IMPEDANCE ESTIMATION USING SURFACE EMG SIGNALS, Neuroscience 2002. Orlando, Florida, USA.
3. Akihiko SHIRAI, Shoichi HASEGAWA, Yasuharu KOIKE and Makoto SATO (2003). Trangible Playroom. SIGGRAPH2003, SIGKIDS, San Diego.

他 24 件

特許

1. 出願番号 特願 2002-212344,発明者 :小池康晴,
発明の名称 :運動学習装置,出願日 2002 年 7 月 22 日.
2. 出願番号 特願 2002-236024,発明者 :小池康晴、嶋田修,

発明の名称 :インピーダンス測定装置および運動学習支援装置, 出願日 2002年8月13日.

研究課題別評価

1. 研究課題名 量子ビットを用いた知能デバイス

2. 研究者氏名 佐藤 茂雄

ポスドク研究員 金城 光永 (研究期間 2001.4.1 ~ 2003.9.30)

3. 研究の狙い：

量子ビットにより実現される量子力学的ダイナミクスを導入した新しい知能処理デバイスの実現を目的とする。従来の技術では不可能とされている各種情報処理を、量子重ね合わせ状態と量子相関を使った量子計算アルゴリズムによって実現する。研究はアルゴリズムの考案とデバイスの製作という2つの課題に分かれ、両者の結果を相互にフィードバックすることによってより実用的なデバイスの実現を図る。

計算量が発散してしまうような問題に対しては並列処理が有効である。しかし、最急降下法などの古典的なダイナミクスではエラーが生ずることが知られている。この原因はダイナミクスが局所的なポテンシャルに依存しているためであり、量子ビットを導入することで非局所的なダイナミクスが実現可能である。このことに着目して、知能処理と呼ばれるような各種情報処理について量子計算アルゴリズムの提案を行う。

デバイスの製作にあたっては、シリコンを材料とした各種製作技術の確立とその整合性が肝要である。固体デバイスによる量子ビット実現を目的として、ナノスケールもしくは原子オーダーにおける極微細加工基礎技術の確立とともに、量子計算特有の技術であるスピンの制御と読み出しに関する技術の開発を目指す。原子オーダーでの制御はまだまだ困難な点が多いため、基礎実験でのデータ蓄積が重要であると考えられる。

以上から、生体の神経回路とは違った原理による知能処理デバイスの実現を目的とする。

4. 研究結果：

ニューロ的手法を導入した断熱的变化アルゴリズム

Hopfield ネットワークで用いられている最急降下という手法を量子計算アルゴリズムのひとつであるハミルトニアン断熱的变化アルゴリズムに導入することで、組合せ最適化問題などが解法可能であることを示した。併せて、問題に応じた罰則関数を使ってハミルトニアンが構成できることを示した。

デコヒーレンスを導入した量子計算

量子系ではエネルギーが保存するという特性から、あるひとつの固有状態に系を導くことは難しい。上記断熱変化アルゴリズムでも、解状態の確率振幅は大きいものの、得られる終状態は他の解でない状態との混合であり、解を見出す確率は問題のサイズに対して 2^N オーダーで小さくなる。このことを改善するために、古典系であるような散逸特性をデコヒーレンスという形で導入し、解状態への収束性能を大きく改善できることを示した。また実際の物理系での実装可能性を評価するため、スピン系のハミルトニアンを使って本計算手法が有効であることを示した。実在の系ではエネルギー準位の縮退や交差があるため、ハミルトニアンを断熱的に変化しても系が最小エネルギー状態に留まることは難しい。通常の量子計算では望ましくないデコヒー

レンズであっても、本手法では逆に有効利用することが可能であることを示した。さらにデコヒーレンスの導入により量子ビット初期化の必要がなくなることも示した。一般に量子ビット実現のためには、量子ビット製作、初期化、読み出しの3技術が必要と言われているが、本アルゴリズムでは初期化の必要がなく、またある程度のデコヒーレンスも許容することからハードウェア実現が比較的容易であると考えられる。

Si系核スピン量子ビットの製作

Kaneによって提案されたSi中のドナー原子(P)を用いた核スピン量子ビットを実現するために、製作に必要な要素技術の確立を図った。まず本実験に特化した、水素クラッキングセルを内蔵するSTM-MBE装置の設計・製作を行った。大気にさらすことなく超高真空チャンバー内で単原子埋め込みのための一連の製作プロセスが実行可能となった。次に本装置を用いて、水素レジストとSTM探針を利用した単原子リソグラフィ技術、MBE法によるPの埋め込み技術などの開発を行った。除震対策が十分でなかったことから量子ビット実現には至らなかったものの各種実験条件を確定することができた。またこれら実験とは別に、核スピンの読み出しに必要な単電子トランジスタを斜め蒸着法により製作した。

超伝導位相量子ビットの製作

超伝導体で酸化膜を挟み込んだ構造を有するジョセフソン接合において2つの超伝導体間の電子波動関数の位相差を利用した量子ビットを実現することを目的として、高温超伝導体を使ったジョセフソン単接合の製作を行った。2つの高温超伝導体結晶を使い十字接合を形成し、また貼り合わせ角度を調整することにより界面上に形成される接合の電気特性を制御し、電氣的に単接合を取り出すことに成功した。さらに、交流バイアス法などにより本接合の電気特性を詳細に測定し、量子ビットデバイスとしての可能性を評価した。金属材料を使った通常の超伝導体に比べ良好なデコヒーレンス特性を有することが確認された。

5. 自己評価：

研究計画に基づいてソフト・ハードの両面から研究を遂行したものの、当初の研究到達目標には及ばなかったというのが偽らざる感想である。ソフトウェアについては、新しい量子計算アルゴリズムを提案することによって、量子計算の可能性を広げることができたと考えている。ニューロで提案されている方法を量子系に導入することにより汎用性を確保し、問題に応じたポテンシャル(ハミルトニアン)の構成方法を提案することができた。また研究の狙いでも触れているようにハードウェア実現を試みることによって、緩和効果を導入するという着想に至り、散逸がないことに由来する量子系特有の問題を解決することができた。しかし、知能処理と呼ばれるようなレベルには達していないためこれは今後の課題となった。またハードウェアでは、Si系核スピン製作のために必要な各種要素技術の開発を行った。極低温環境の実現、単原子リソグラフィ、不純物埋め込みのための単結晶成膜、スピン読み出し用の単電子トランジスタの製作などについて順次製作・測定技術の確立を図った。また当初は予定していなかった高温超伝導体を用いた新しい量子ビット製作も研究項目として取り入れ、ジョセフソン単接合の取り出しに成功した。超伝導体の場合には製作が比較的容易であるため、Si系核スピンよりも先に実現できる可能性が高いと考えている。研究期間内に量子ビットを実現できなかったことは残念であるが、これを発奮材料としてできるだけ早期の実現を目指したい。

本テーマのように実験が主体であり、先端的技術開発が必要な研究テーマでは、高度な技術

と豊富な知識を持っているポスドク研究員が大きな戦力となることは容易に想像できるものである。ポスドク参加型の本制度にあっては、より広くかつ迅速な研究遂行が可能であり、私自身このような実感を抱く機会にしばしば遭遇した。本制度が将来にわたって継続されることを期待するものである。

6. 研究総括の見解：

量子コンピューティングの持つ重ね合わせの原理をニューラルコンピューティングに応用することにより、並列計算実行時の問題が解決できることを提案し、核スピン系と超伝導接合により実証しようとした。ソフト的には、ニューロ的手法を導入した断熱変化アルゴリズム、デコヒーレンスを導入した量子計算の可能性を広げる方法を提案し、シミュレーションによってその有効性を確かめた。ハード的には、不純物埋め込みのための単結晶成膜・スピン読み出し用単電子トランジスタ製作など、シリコン系核スピン製作のための要素技術を開発した。量子計算機の製作は新しい計算機の将来として期待されているが、乗り越えなければならない技術が多く、実験的にも極めて困難な問題にチャレンジしたことは評価に値する。期間中に量子計算機に必要なハードウェアの特性を、その一端でも明確に示すことができなかったのは残念であるが、本研究で得られた技術を基礎に、近い将来に実現できることを期待したい。

7. 主な論文等：

1. 1 .S. Sato, M. Kinjo, K. Nakajima: "An Approach for Quantum Computing Using Adiabatic Evolution Algorithm", Japanese Journal of Applied Physics, vol.42, part 1, no.11, pp. 7169-7173, 2003.
2. 2 .K. Inomata, T. Kawae, S.J. Kim, K. Nakajima, T. Yamashita, S. Sato, K. Nakajima, T. Hatano: "Electrical transport characteristics of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ stacked junctions with control of carrier density", Superconductor Science and Technology, vol.16, No. 12, pp. 1365-1367, 2003.
3. 3 .H. Akima, S. Sato, K. Nakajima: "Single Electron Random Number Generator", IEICE Transactions on Electronics. (掲載予定)

他 1 件、口頭発表 12 件

特許

1. 出願番号 特願 2003-198362, 発明者 佐藤茂雄,
発明の名称 乱数発生方法及び乱数発生装置, 出願日 2003 年 7 月 17 日

研究課題別評価

1. 研究課題名 感覚情報と身体制御に関する発達過程

2. 研究者氏名 高谷 理恵子

ポスドク研究員 十河 宏行 (研究期間 2001.4.1 ~ 2002.3.31)

ホスドク研究員 緑川 晶 (研究期間 2002.4.1 ~ 2003.9.30)

3. 研究の狙い：

乳児期の随意運動に関しては、視覚刺激へ腕を伸ばす到達運動の発達研究がある。到達運動は生後 2 週の乳児ですでに観察されることが報告されている (Bower, 1970) が、その後一時消失し、4~5 ヶ月ごろから再び観察されるようになることが知られている (Hofsten, 1983)。2 週間頃にみられる到達運動と 5 ヶ月頃にみられる到達運動は、それぞれ視覚起動型 / 視覚誘導型と表現され、異なった機序によって生まれていると考えられているが、視覚誘導型の到達運動が認められるまでのあいだ、乳児にどのような変化が生じているのか明らかではない。到達運動が一時的に消失する生後 1~4 ヶ月は、脳機能の発達過程が反映されていると言われる全身運動 (General Movement, GM) が、質的に大きく変化する時期でもある。そこで本研究では運動制御に関する発達過程について、乳児の全身運動の発達の变化と、動きの制御に関する脳内活動の両面から検討することを目標とした。

本研究でこだわったのは、第 1 に、乳児の全身運動の解析を試みた点、第 2 に、動きに関係した脳内活動の変化を捉えようとした点である。乳児の全身の動きは臨床現場でもしばしば、乳児の状態を把握するための重要な指標として用いられるにもかかわらず、その判断は経験を積んだ医師や看護師が「なんとなく分かる」というような職人技に頼っているのが現状で、全身の動きの不自然さを明確に表現することは非常に困難であり、上肢や下肢のみを扱った研究が多く見られる中で、全身の動きを扱った研究は驚くほど少ない。本研究では、乳児の全身運動の変化を捉えることにこだわり、3 次元動作解析装置による計測手法の確立を目指すとともに、定量的評価手法の開発も試みた。また乳児を対象にした脳研究では、方法論上の問題が多いため、受容課題や安静時における計測が一般的であるが、本研究では乳児の動いている場面における脳内活動の変化を計測することにこだわり、近赤外分光による簡便な計測手法の確立を目指した。

4. 研究結果：

本研究では、乳児を対象に動作解析、ヘモグロビン動態測定を通して、次のような成果を得た。以下に、各項目について簡単に説明する。

- ・ 2 次元動作解析装置による早期ハイリスク児検出アルゴリズムの構築
- ・ 運動表出に先行する前頭部ヘモグロビン動態変化の発見
 - (1) 3 次元動作解析装置による計測手法の確立
 - (2) 刺激に対する運動の精緻化に関する定量的評価手法の確立
 - (3) 近赤外分光法乳児用プロープホルダーの開発
 - (4) 乳児を対象とした近赤外分光法による計測手法の確立
 - (5) 乳児の運動準備期における前頭葉活動の発見

・ 2次元動作解析装置による早期ハイリスク児検出アルゴリズムの構築

近年、新生児・乳児の全身運動には、異常なパターンがあることが示され、脳障害との関係が検討されている。乳児の全身運動において、異常なパターンが継続的に認められる場合には、発達障害を伴う可能性が高いことが示唆されている。しかし、これまでの先行研究における乳児の動きの診断的評価は、優雅で滑らかな動きはノーマルで、ぎこちないワンパターンな動きはアブノーマルといったような定性的な評価であり、臨床場面で実用的な段階にあるとは言いがたい状態である。そこでまず、我々は、早期ハイリスク児検出アルゴリズムの構築を目指した。ハイリスク児の運動を評価するためのビデオ、Spontaneous Motor Activity Diagnostic Tool(GM Trust, 1997)で紹介されている、正常な全身運動 9 例、および異常な全身運動 8 例の動画を PC に取りこみ、四肢の運動軌跡を抽出した。得られた運動軌跡の時系列データをもとに、四肢の動きの協調性を定量化した。時系列データを特定のポイントから 30 フレーム、つまり 1 秒後までのデータで区切り、相互相関関数を求めた。さらに四肢の相互相関関数がどの程度一致しているかを調べるために、各関数の x 座標 0 時点での y 座標の SD を、その時点での四肢の協調性を示す代表値とした。同様の作業を 1 ポイント毎に繰り返し、四肢全てが同期して動いていると考えられるコマの割合を算出した。典型例として紹介されていた乳児の自発運動を、四肢の協調性という視点から解析した結果、生後 2 ヶ月までの期間に、脳画像検査で異常が認められた乳児の動きでは、四肢全てが同期して動く頻度が高いことが示された。また健常乳児では、月齢とともに四肢が同期して動く頻度が少なくなることが示された。この結果より、乳児の身体制御過程は、何も無いところから 1 つ 1 つの動きを学習して積み上げていくのではなく、全身が運動して動いている状態から部分的な細かな動きへと調整され、精緻化されていくと考えられた。

・ 運動表出に先行する前頭部ヘモグロビン動態変化の発見

乳児は自発的に動くだけでなく、環境からの刺激を受けて能動的に自らの動きを変化させる。乳児期の到達運動に関する先行研究では、到達運動は生後 2 週の乳児ですでに観察されることが報告されている (Bower, 1970) が、その後一時消失し、4~5 ヶ月ごろから再び観察されるようになることが知られている (Hofsten, 1983)。本研究では、到達運動誘発場面における、脳内ヘモグロビン動態の計測と動作解析を通じて、到達運動間歇期の脳内機序を明らかにすることを目標とした。

本研究を達成するためには、次のような研究課題に取り組む必要があった。3次元動作解析装置による計測手法の確立、刺激に対する運動の精緻化に関する定量的評価手法の確立、

近赤外分光法乳児用プローブホルダーの開発、乳児を対象とした近赤外分光法による計測手法の確立、乳児の運動準備期における前頭葉活動の発見である。特に、乳児用プローブホルダーの開発は、本研究を進める上で非常に重要な課題であり、多くの工夫を要した。この乳児用プローブホルダーは、現在、特許出願中である。

上記のような研究課題を達成させた上で、視覚刺激に対する到達運動誘発場面における、前頭部の脳内ヘモグロビン動態を近赤外分光法により計測し、あわせて、3次元動作解析装置によって、乳児の動きの解析を行った。その結果、到達運動が出現しない月齢においても、刺激に同期した全身の座表上の変化が認められた。また月齢とともに、刺激に同期した部位が上肢に収束したことが明らかになった。近赤外分光法の結果については、10Hz でサンプリングしたデータを、

continuous 条件で解析し、5 秒間の移動平均の後、酸素化ヘモグロビンの濃度変化を処理の対象とした。3 回連続で、刺激呈示場面に比較して、直後の Rest 場面が有意 (t 検定, $p < 0.01$) に低下を認めたチャンネルのみを指標とした。乳児が玩具を上手につかめるようになるまでは、変化するチャンネル数は増加し、その後、減少に転じた。つまり、乳児が玩具を上手につかめるようになると、それまで確認されていたヘモグロビン濃度の変化が生じなくなるということが示された。これらの変化は、5 ヶ月以降の到達運動という随意的な動きの発現に先行して変化することから、玩具に向かって手を伸ばすという、随意的な運動の学習の基盤となる活動を捉えている可能性がある。今後は、脳障害のリスクがあり、正常とは異なる動きを示す乳児についても、随意的運動が発現するまでの動きと脳内活動の変化を検討していきたい。

5. 自己評価 :

本研究は、発達初期において乳児に与える刺激の影響を考え、当初の予定であった擬似的リーチング場面の構築という研究計画を大きく変更し、乳児にとってより自然な実験場面の確立を目指した。結果的に、能動的な動き誘発場面においても、安定して計測することができる乳児実験の手法が確立し、3 年間の研究成果として評価できると考えている。

また、これまでの乳児研究においては、安静時や受動的な課題場面中の脳内活動の計測が中心であり、能動的な課題場面中の脳内活動計測は不可能であると言われてきた。サブ領域会議にて近赤外分光法について話題提供していただいた日立製作所基礎研究所の牧敦氏からも、動きに関する乳児計測は難しいだろうとのコメントをいただいたが、本研究では様々な問題を克服し、乳児の視覚刺激に対する到達運動誘発場面の計測において、刺激の提示に対応した酸素化ヘモグロビン濃度の上昇を認めることができた。またさらに、運動として完成される前の段階が最も有意に前頭部のヘモグロビン濃度の変化が生じ、到達運動が完成 (学習) されるようになると濃度変化が生じなくなるという、発達的变化も明らかにすることができた。このような能動的な課題場面における乳児の脳計測は、発達初期における乳児の脳機能を解明するためには画期的な成果であると考えている。ただ問題点としては、3 年間という期間が、半年間の縦断的発達研究を行うためには非常に短く、研究期間ぎりぎりの時期に、ようやく研究成果が得られた点である。今回得られた成果は、今後論文として発表する予定である。

上記のような実験は、対象が乳児であるため、安全面への配慮や覚醒状態の制御などの側面から、一人では行うことができず、必ず複数名で行う必要がある。今回の研究はポスドク参加型であり、余裕を持って乳児に接することができたため、研究者それぞれが実験への工夫を重ねることができた。またポスドク参加型ということで、複数の異なるバックグラウンドをもったポスドク研究員と討論しながら研究を進めることができた。異なる研究分野からの知見を取り入れながら、新しい乳児研究の流れを作ることができたのではないかと思う。

様々な領域からの知見を取り入れながら、研究を進めることができたのは、ポスドク参加型であったためだけでなく、領域会議、およびサブ領域会議において、アドバイザーの先生方や、他の研究者、他のポスドク研究員などのコメントをいただけたためでもある。有意義なコメントをいただいた方々に深く感謝したい。

6. 研究総括の見解 :

乳幼児の全身運動の発達過程と幼児前頭葉の近赤外分光の関連について、数多くのデータを

集積し、特徴的な変化が生後5ヶ月に見られることを示した。幼児の全身運動を定量的に解析することにより、生後2ヶ月までの期間に脳画像に異常が認められた幼児は、四肢全てが強い相関を持って動く頻度が高いことなどを発見し、幼児診断の新しい手法を提案した。また、健常児の四肢の運動の変化から、乳児の身体制御過程は、全身が連動して動く状態から部分的な細かな動きに調整され精密化していくことなどを明らかにした。これらは、従来なかった定量的な結果であり、発達脳に関する全体像が研究期間中に見えてこなかった点は心残りではあるが、将来発達モデルの創生に寄与すると考えられ、その努力は大いに評価できる。

7. 主な論文等：

1. Rieko Takaya, Konishi Yukuo, Arend F. Bos, and Christa Einspieler, Preterm to Early Postterm Changes in the Development of Hand-Mouth contact and other Motor Patterns, Early Human Development, Vol.75, pp.193-202, December, 2003.

解説 2 件

口頭発表 12 件

特許

1. 出願番号 特願 2003-368232, 発明者 高谷理恵子、緑川 晶、斎藤美紀 ,
発明の名称 :プローブホルダー、出願日 2003 年 11 月 4日

研究課題別評価

1.研究課題名 知的創造作業を支援するインタラクションパタン

2.研究者氏名 中小路 久美代

ポスドク研究員 神谷 年洋 (研究期間 2001.4.1 ~ 2002.11.30)

ポスドク研究員 山本 恭裕 (研究期間 2002.4.1 ~ 2003.9.30)

ポスドク研究員 大平 雅雄 (研究期間 2003.4.1 ~ 2003.9.30)

3.研究の狙い：

アプリケーションシステムは、それが提供する<表現>と<操作>とによって、それを利用するユーザがどのように問題を捉え、解を構築してゆくに影響を与える。アプリケーションシステムを利用して知識活動をおこなう機会が増えるにつれて、利便性(usefulness)、使い易さ(usability)に加えて、使い心地(desirability)というシステムの側面が重要となると考えられる。インタラクションデザインは、ユーザが、どのような表現や操作を通してシステムとのインタラクションデザインをおこなうべきか、を規定していく。使い心地を考慮したソフトウェアを開発するためには、人間の認知特性、可視化手法、表現可能性、計算機での実現性といった、様々な要素を総合的に理解した上で、インタラクションをデザインしていく必要がある。ところが現状では、インタラクションデザインという作業そのものを系統的におこなう仕組みは確立されていない。

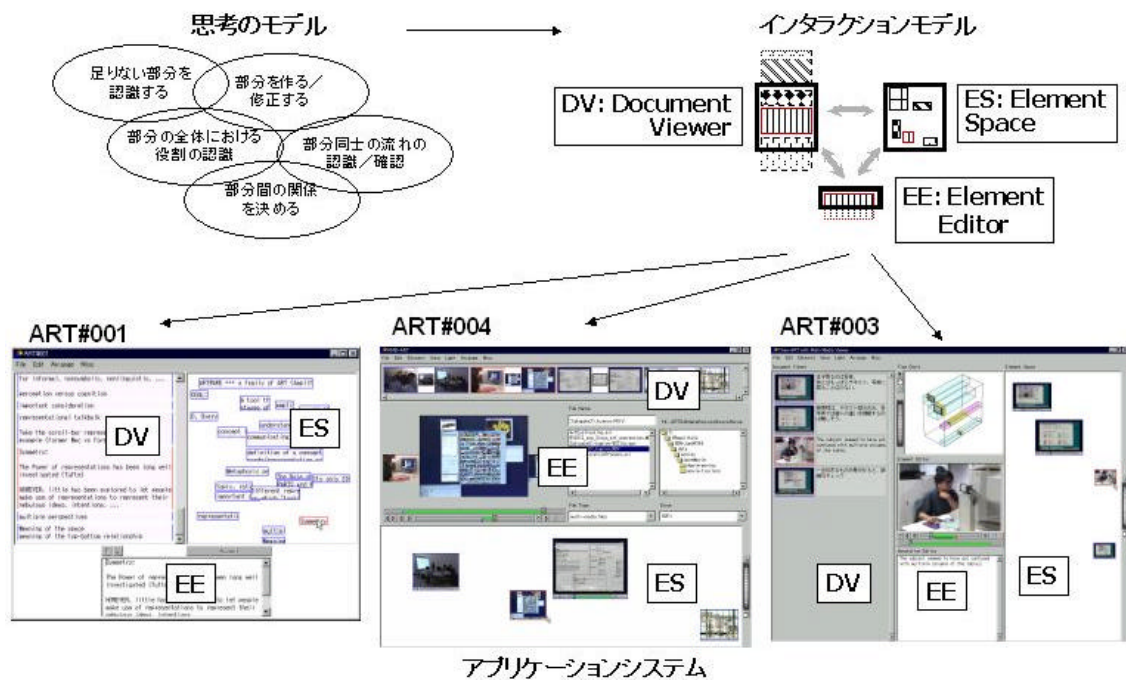
本研究の狙いは、そのようなインタラクションデザインを工学的に支援することにあった。これを目的として本研究が採ったアプローチは、優れたインタラクションデザインを創出し、それが有効に作用する利用者の認知的なコンテキストを同定した上で、そのデザインをパタンとしてモデル化し、カタログングするというものであった。アプリケーションシステムの構築時に、カタログ化したインタラクションデザインパタンを適用することで、類似した認知的コンテキストを執るユーザにとってより使い心地の良いシステムとなるようなインタラクションを、デザインすることが可能となると考えられたためである。

4.研究結果：

本研究の3年間の研究結果は、大きく以下の四つに分けることができる。

(1)インタラクションデザイン支援の枠組みの構築

インタラクションデザインを支援する枠組みとして、「ナレッジインタラクションデザイン」というプロセスモデルを構築することができた。ナレッジインタラクションデザインは、(a)ユーザの思考過程を表す思考モデルの構築、(b)それに沿うビジュアルリティとインタラクティブ性を擁するインタラクションモデルの構築、(c)インタラクションモデルに基づくアプリケーションシステムの開発、という三つのステップから成る。これらのステップを繰り返しながら、創造的知識活動のためのインタラクションデザインとそれに基づくアプリケーションシステム開発を進めた。



(2) インタラクションデザインを施したアプリケーションシステムの開発

ナレッジインタラクションデザインの枠組みに基づき、創造的知識活動のための様々なアプリケーションシステムを開発した。具体的には、文章や動画といった線形情報を創出するために、部分と全体の共発展性に着目した思考モデルと、部分を空間に配置し線形化したビューとの連携をとるインタラクションモデル、それに基づく文章編集システム、動画編集システム、といった線形構造情報創出のためのアプリケーションシステム群を開発した。この他に、ネットワーク構造情報創出、時間要素を有する情報可視化、コミュニケーションにおける共有理解構築支援といった領域において、インタラクションデザインとそれに基づくアプリケーションシステム開発をおこなった。

(3) インタラクションデザインに関わる理論の構築

システムが、その表現と操作を介して人間に対して提供する、<インタラクティブティ>を理論的に捉え、結果を表出するものとして、および操作対象として、という表現の二面性をモデル化した。

また、<インタラクション>を<デザインする>ということについて、インタラクションゲシュタルトといった視点からその課題を考察した。そして、インタラクションデザインをおこなう際の、<デザインの原則>を規定し、その役割について整理をおこなった。

(4) ソフトウェア開発モデルの構築 : ソフトウェア開発という実践的な視点から、インタラクションデザインを中心とするソフトウェア開発のモデルを構築した。

5. 自己評価 :

3年間の研究を振り返ると、思考のモデルとインタラクションのモデルから成るパターンを中心として、インタラクションデザインを施したシステム開発をおこなうための枠組み構築をおこなえたことから、当初の研究の狙いは達成できたと考えられる。その枠組み全体を支援するような環境の構築そのものには至らなかったものの、要件の同定ができ、その枠組みを、枠組みを導出した以外

のドメインにおけるアプリケーション開発に適用することができたことから、環境の枠組み自体の検証をおこなうことができたといえる。

本プロジェクトに参加してもらった三名のポスドク研究員については、それぞれが、各自の博士課程研究での専門性を活かし、インタラクション記述言語の設計、インタラクションデザインの実践、インタラクションデザインのコミュニケーション支援分野への適用、といった方面で本研究に多大なる貢献をしてもらってきた。本研究がこれだけの成果を挙げられた理由として、彼らの協力が欠かせない重要な要因となっているといえる。最後に、各ポスドク研究員は、本研究終了後、本研究での経験を活かし、それぞれが独自の分野で独立した研究活動を確立しつつあることを非常に嬉しくかつ誇りに思う。

6. 研究総括の見解：

ユーザにとって使い心地のいいアプリケーションシステムを作るためのインタラクションデザインを工学的に支援する三段階の枠組みを構築し、創造的知的活動を支援するアプリケーションの開発の方向性を示した。全体的に極めてチャレンジングな問題を掲げ、誰もやっていない問題にどんどんアタックしていることは高く評価できる。インタラクションデザインを施したアプリケーションシステムとして、文章編集システム、動画編集システムなどを開発し、実績を上げていることも評価できる。さらにインタラクションデザインにかかわる理論の構築にも歩みを進め、その手法の足場を固める努力をしている。そのエネルギーのあふれる研究態度は、周りの研究者をエキサイトさせる力を持っている。

7. 主な論文等：

1. 中小路久美代, 山本恭裕, 創造的情報創出のためのナレッジインタラクションデザイン, 人工知能学会論文誌, March, 2004 (印刷中) .
2. 高嶋章雄, 山本恭裕, 中小路久美代, 探索的データ分析のための時間的な概観と詳細の表現およびインタラクションに関する研究, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.11, pp.2767-2777, November, 2003.
3. 3 .K. Nakakoji, Y. Yamamoto, A. Aoki, Interaction Design as a Collective Creative Process, Proceedings of Creativity and Cognition2002, Loughborough, UK, pp.103-110, October, 2002
4. 4 .Y. Yamamoto, K. Nakakoji, A. Aoki, Spatial Hypertext for Linear-Information Authoring: Interaction Design and System Development Based on the ART Design Principle, Proceedings of Hypertext2002, ACM Press, pp.35-44, June, 2002.
5. 5 .K. Nakakoji, Y. Yamamoto, A. Aoki, Third Annual Special Issue on Interface Design, Interactions, ACM Press, Vol.IX.2, pp.99-102, March+April, 2002.
6. 6 .K. Nakakoji, Y. Yamamoto, What does the Representation Talk Back to You?, Knowledge-Based Systems Journal, Special Issue on Semiotic Approaches to Human-Computer Interaction, Vol.14., No.8, pp.449-453, 2001.

和文 / 英文論文誌 :10 件 (上記含む)

査読つき国際会議 :13 件

研究集会論文, 口頭発表など :39 件

研究課題別評価

1.研究課題名 :非言語コミュニケーションの脳内機能メカニズム

2.研究者氏名 :中村 克樹

ポスドク研究員 :中村 徳子 (研究期間 2000.10.1 ~ 2003.9.30)

3.研究の狙い :

ヒトには他の動物にはない高度に発達したコミュニケーション機能がある。このコミュニケーション機能を有することで、私たちヒトは他の動物に見られない高度で複雑な社会や文明を創造できた。ヒトにおけるコミュニケーションとして、まず頭に浮かぶのは「言語」である。私たちは、言語を操ることで、さまざまな概念や思想を時間や空間を超えて伝え、記録することができる。しかしながら私たちには、言語を直接介さないコミュニケーションの手段もある。例えば、相手の表情やジェスチャーや声の抑揚といった情報から、相手の感情を知ることができる。相手の視線を見ることから相手の注意の向きが解り、動作を理解することから相手の意図を知ることができる。こうした言語を直接介さないコミュニケーション(非言語コミュニケーションと呼ぶ)には、次のような特徴がある。(1)ヒトだけではなく動物にも見られる、(2)生まれて間もない乳児にも見られる、(3)国境や文化を超えて共通のものがある。こうしたことから、非言語コミュニケーションは、言語を含めたコミュニケーションの起源であると考えられる。

では、言語と異なり、このような非言語コミュニケーションはどのような役割を持っているのだろうか。社会生活を営むように進化し、複雑な社会を構成するようになった動物は、自らの命を守るために相手との不必要な争いを未然に防ぐ能力を獲得する必要性が生じた。自らの意図や情動を相手に伝え、また相手の意図や情動を知ることにより、こうした目的を達成して来た。そのことは、ヒトにいたっても変わっていない。非言語コミュニケーションは、「相互理解を深める」「不必要な争いや衝突を未然に防ぐ」「より良い社会関係を築く」といった個人対個人の関係において、もっとも重要な役割を果たしている。一方で、言語は、膨大な情報を、時空間を超えて伝達・記録することを可能とし、その結果として文化や文明を生み出した。これに対し、非言語コミュニケーションは、より良い個人関係を築き上げる役割を果たしている。例えば、近年発達した通信手段である電子メールなどでは、非言語コミュニケーションの要素がない。気持ちや感情を込めて相手に伝えつつも、それがうまく伝わらずに誤解を生じることがしばしばあるのはこのためである。こうした、非言語コミュニケーションがうまくとれなくなるのが、現代社会で非常に増加している「ひきこもる」「子供や きれん」子供、さらには凶悪犯罪や虐めにもつながると考えられる。

本研究では、非言語コミュニケーションのメカニズムを理解することが、言語を含めたコミュニケーションを理解するために重要であると考え、特に情動の伝達機能に着目して研究をおこなった。「下前頭葉はコミュニケーションの中枢であり、辺縁系は情動的なやり取りに関与している」、左下前頭葉が言語の中枢であり、右下前頭葉が非言語コミュニケーションの中枢である」という二つの仮説を持ち、それを検証することを試みた。

4.研究結果 :

情動の伝達的手段として、表情・身振り(ジェスチャー)・声の抑揚という三つの手段がある。コミ

コミュニケーションとして重要なのは、これらの手がかりをもとに相手の情動を読み取ることである。実験では、これら3種類の手がかりから相手の情動を読み取る時に、脳のどの領域が活動するのかを機能的MRI (fMRI)を用いて測定した。

表情評価課題では、右大脳半球の下前頭皮質と上側頭溝皮質に強い活動が見られた。また、両側の中側頭皮質後方領域(視覚的な運動情報の処理に関与すると考えられている領域)にも活動が認められた。ジェスチャー評価課題では、より広範の領域に活動上昇が見られた。右大脳半球の前頭皮質が外側部から下部まで広く活動し、両側の中側頭皮質を中心に大きな活動領域が認められた。さらに、右大脳半球の上側頭皮質と左大脳半球の下前頭皮質にも活動が認められた。声の抑揚評価課題では、右大脳半球の下前頭皮質と上側頭溝皮質、そして左大脳半球の後頭皮質に活動領域が認められた。

右大脳半球の下前頭皮質と上側頭溝皮質には3つの課題中すべてで活動が認められた。今回の結果を、これまでの神経心理学的な報告と比較検討してみると、「プロソディー障害」を示す患者の損傷部位は、情動評価課題で活動が認められた2ヶ所(右大脳半球の下前頭皮質と上側頭溝皮質)のいずれか一方は必ず含まれていることが明らかになった。プロソディー障害では、声の抑揚がなくなり、その理解も困難になる。また、自発的なジェスチャーも乏しくなり、その理解も困難になる。

これらの結果から、右大脳半球の下前頭皮質と上側頭溝皮質が非言語コミュニケーションに重要な脳領域であると結論した。

情動評価に関与する脳領域がどのようなタイミングでどのような機能的な結合を持って働いているのかを多チャンネルEEG装置を用いて検討した。表情刺激提示後190ミリ秒あたりに応答のピークが認められた。このピークは、顔写真刺激を上下逆さまに提示することによってなくなった。おそらく、表情の認識・評価が困難になり、神経応答のタイミングがずれてしまい、加算することによって消えたと考えられる。この190ミリ秒のピークのポテンシャルマップを見ると、右大脳半球の前頭部に特異的なパターンが認められた。おそらく、刺激を受けてから190ミリ秒ほどで情動情報が前頭葉に伝わり処理されることを示している。

健常成人で見られた情動伝達機能に関する脳の左右差(右大脳半球優位性)が、生まれながらのものであるのか、それとも経験を通じて獲得されていくものであるのかを検討するために、乳児の表情表出に的を絞ってその左右差を検討した。

表情は大きく「泣き顔」と「笑顔」に分類した。泣き顔では左顔の表情の表出が有意に強いという結果となった。これに対して、笑顔では有意な差が見られなかった。おそらく、笑顔は筋肉の痙攣が原因で起こり、情動を伝達するというコミュニケーションの役割を果たしていないためであると考えられる。

乳児の段階でも情動を伝達する機能は、右大脳半球が優位に司っていると考えられ、コミュニケーションにおける大脳半球の左右差は生まれたときにはすでに存在することを示している。

5.自己評価:

この3年間さきがけに採択していただいたおかげで、これまで不可能だった研究にも手を広げることができた。高額な装置を購入できたこともその一つであるが、ポスドクを雇用できる研究費は

初めてであったので非常に貴重な経験ができた。現在の立場での研究活動に、さきがけのこの貴重な経験がいかされることは間違いないと感謝している。

自分自身の研究を振り返ると、不満足な点ばかり目に付く。2度の所属の変更と、それに伴う実験室の引越しがあったとはいえ、もう少し形に残る成果をあげなければならなかったと反省している。ただし、今回の成果として得られたことは、これからの研究の方針を大きく左右するものであったと評価している。具体的には、非言語コミュニケーションが「言語の起源」だという主張を証明するための方針が描けたように思う。この秋からJSTのCRESTに採択していただき、コミュニケーションの発達をさらに研究させていただけることになった。その申請のアイデアは、今回のさきがけから得られたものである。また、成果だけでなく、沢田総括をはじめ多くのアドバイザーの先生方からの貴重な助言が、私の未熟な考えを成長させてくれたのだと感謝している。

さきがけで使用させていただいた装置を引き続きお借りすることを許可してもらえたので、今後、さきがけとCRESTの研究成果を次々と形にしていきたい。

6. 研究総括の見解：

情報伝達の機能として、ヒトは言語を獲得し現在の文化・文明を築いてきた。しかし、この言語発生の起源についての脳内メカニズムの研究は進んでいない。本研究者は、言語発生を明らかにするためには、まず、ヒト以外、または幼児でも情報伝達的手段として用いている非言語コミュニケーションの脳内機構を明らかにすることが肝要であると考え、NMRなどイメージング手法を活用して、脳のどの部分が相手の表情・ジェスチャー・声の抑制などを読みとるかを明らかにした。また、非言語コミュニケーションの情報処理に必要な時間をEEGにより測定した。この成果は言語コミュニケーションの将来の研究の基礎になると考えられ評価できる。しかしながら、非言語コミュニケーション研究の将来の発展イメージに不明確さが残っているので今後を期待したい。

7. 主な論文等：

1. 中村克樹、中村徳子 非言語コミュニケーションと右半球 Clinical Neuroscience 19: 410-414, 2001.
2. 中村克樹 相手の情報を読み取る 脳機能画像研究からの考察 神経心理学 19: 162-171, 2003.
3. Sato N, Nakamura K. Visual response properties of neurons in the parahippocampal cortex of monkeys. Journal of Neurophysiology, 90: 876-886, 2003.
4. 中村徳子、明和政子、松沢哲郎 母子における対象物の好みにおよぼす刺激強調の効果。チンパンジーの認知と行動の発達、京大出版、pp. 254-257, 2003.

国際学会 4件、
国内学会他 9件、
新聞掲載 3件

研究課題別評価

1. 研究課題名 乳幼児を対象とした人工物・メディアの発達の認識過程

2. 研究者氏名 開 一夫

ポスドク研究員 嶋田 総太郎(研究期間 2001.4.1 ~ 2003.9.30)

ポスドク研究員 加藤 正晴 (研究期間 2001.4.1 ~ 2003.3.31)

ポスドク研究員 安達 直子 (研究期間 2001.4.1 ~ 2002.3.31)

3. 研究の狙い：

本研究の目標は、人工物あるいはメディアが子どもの認知発達過程に及ぼす影響を認知科学的観点から明らかにすることである。情報技術革新の中、TVはいうにおよばず、コンピュータゲームやデジタル玩具といった情報メディア機器は確実に一般家庭へ浸透しており、小さな子どもはこうした機器と多くの時間対峙している。こうした人工物・メディアの殆どはごく最近出現したものであり、乳幼児がこれらをどう捉えているのか、また、認知発達過程においてどのような影響を与えるのかについての系統だった研究がほとんど行われていないのが現状である。

人工物・メディアの技術的側面に関しては今日急速に発展しつつあるが、その安全面についての基準は、瑣末な部分に関してさえ立ち遅れている。こうした基準を明確にするためには、画一的に善悪の議論を行うのではなく、まず乳幼児と人工物間における相互作用の様式を科学的に明らかにする必要がある。

そこで、本研究では、人工物・メディアと人間との相互作用の過程に関して、特に乳幼児を研究対象とし、新しい実験手法を取り入れて明らかにすることを研究の狙いとした。あわせて、実験から得られたデータに基づき人工物と乳幼児間の相互作用モデルを構築することで、概念形成やコミュニケーションといった高次の認知活動をサポートするための人工物設計原理を探求することを目標とした。

具体的には、

(1) 乳幼児におけるTV映像の認知【研究項目1】

(2) 自己映像認知の発達の变化【研究項目2】

(3) 乳幼児におけるロボットの認知【研究項目3】

の3つのサブテーマを設定し、これらの研究項目を並行的に実施することで認知科学的知見を蓄積した。また、乳幼児を対象とした研究項目に加えて、成人を対象としたTVゲーム操作中の脳活動計測【研究項目0】も実施した。本研究で実施されたそれぞれの研究項目は、TV・ビデオ映像、コンピュータゲームなど社会問題と関連付けて議論されやすいデジタル情報機器を対象としているが、小さな子どもがこれらの情報機器・メディアをどう捉えているのかについて理解することは、社会的問題への対応だけでなく認知科学における基礎的問題とも深く関連する。例えば、TV画面に映し出された自己映像の認知様式について知ることは、自己認知やボディイメージに関する研究に重要な知見を与える。また、ロボットを用いた実験研究は、「他者の理解」や「心の理論」といった認知科学の重要研究分野に示唆を与えることができる。

4. 研究結果：

一連の実験研究の結果をまとめる。

【研究項目 0】テレビゲーム操作中の脳活動計測に関しては、ゲームの種類を問わず操作中は安静時よりも前頭前野の活動が低下することが明らかになった。しかし、なぜテレビゲームをしているときにこのような変化が起きるのか、その理由を明らかにし、発達的な影響についての知見を深めるには、成人を対象とした短期的脳活動計測だけでは十分ではない。この研究項目は、長期的な視点にたった視覚・運動系の基本的発達メカニズムについての研究が重要であることを浮き彫りにしたといえる。

【研究項目 1】乳幼児における TV 映像の認知に関して、馴化・脱馴化、期待背反法といった注視時間を測度とする実験パラダイムによって：

- ・6ヶ月児は現実世界と対応付けて TV 映像を認知しているものの、現実世界における事象と TV における映像を区別できていないこと。
- ・しかし、生後 10ヶ月になると、成人と同じように TV 映像を「いま、そこ」的ではないものとして捉えはじめていること。

の 2 点が明らかになった。日常的に TV 映像に暴露されているとはいえ、10ヶ月児で TV 映像と実世界を区別可能であることを示せた点は非常に興味深い。

【研究項目 2】自己映像認知の発達的な変化に関しては、遅延自己映像パラダイムと呼ぶ乳児から成人に至るまですべてに用いることができる実験方法を考案し、自己認識の発達の変遷に関する以下の 2 点について明らかにすることができた。

- ・視覚と自己受容感覚の時間的随伴関係の検出が重要な役割を果たしていること。
- ・身体図式に関する視覚的情報（身体イメージ）と自己受容感覚の「同時性の時間窓」が発達に伴って変化する可能性があること。

この研究結果は自己身体イメージの発達過程だけでなく、視覚-自己受容感覚の統合に関して重要な知見をもたらす。つまり、【研究項目 0】で浮き彫りにした、視覚・運動系の基本的発達メカニズムの問題にアプローチする手がかりを与えるものと確信する。現在、身体イメージの時間窓に関する更なる知見を得るため、成人を対象として NIRS を用いた脳活動計測実験を実施している。

【研究項目 3】乳幼児におけるロボットの認知に関しては、10ヶ月児で、「インタラクティブ性」が、大きくロボット認知に影響することなどが明らかになった。つまり、乳児はロボットがコミュニケーションの対象としてふさわしい存在であるかどうかを、人間がロボットにどのように接するかではなく、その人間の行動に対してロボットがインタラクティブに応答するか否かに着目して判断していることが明らかになった。この知見は認知科学的に興味深いだけでなく、一般家庭に浸透しているハイテク製品・情報メディア機器の設計指針にも大きな示唆を与えるものである。

5. 自己評価：

初期計画における狙いは、人工物・メディアを幅広く捉え、これらを乳幼児がどう認知するかという点に関する知見を深めるというものであったため、個々の研究項目間の関連性が希薄な印象を与えてしまうことが危惧される。しかし、TV 映像認知・自己認知・コミュニケーションエージェントの認知のすべての研究項目において「時間的随伴性検出」が重要な役割を果たしていることを示唆できたと考える。

本研究で得られた知見は認知科学的な意味で貢献するばかりでなく、社会的な問題へ対応する

ための基礎的データを与えると確信する。今後は、行動レベルで得られたデータを脳の発達と関連付けていく予定である。このためには、乳幼児に負担をかけないように脳活動計測を行う必要があり、NIRS や高密度 EEG を用いた脳活動計測手法およびその解析手法を確立中である。

人工物やメディアの発達の影響に関しては、「ひきこもり」や「切れやすい子」といった社会問題とも呼応してマスコミ等において大きく取り上げられがちではあるが、それらの大半は科学的根拠に基づいているわけではない。本研究でかかげた「人工物・メディアを小さな子どもがどう捉えているのか」という問いは、こうした社会問題解決への糸口を探る上で大変重要であるにもかかわらず、従来の心理学・発達科学において見落とされていた点である。本研究は、短絡的な功罪論に終始するのではなく、科学的な社会問題へのアプローチによるきっかけを与えたものと確信する。

6. 研究総括の見解：

乳幼児の認知過程の研究は、ヒトの自己認識のメカニズムなどを理解するうえできわめて重要な研究テーマである。本研究者は、TV 映像・自己映像・ロボットなどの認知過程が乳幼児の発達と共に変化する様子を克明に研究した。他者と自己をどのように区別するか、またできるようになるかについては、時間的随伴関係の検出の役割が重要であることを示したことは評価できる。ロボットのような人工物と動物では「インタラクティブ性」の違いによって区別するようになるというのは興味深い結果である。また、「インタラクティブ性」の認知が発達によってどう変化するのか、何故変化するのかなど今後の問題は山積しているが、脳を理解するための重要な分野と考えられている「発達脳」を今後も勇敢に切り開いていくことを期待したい。

7. 主な論文等：

1. Kobayashi,T., Hiraki,K., Mugitani,R., and Hasegawa,T.: Baby arithmetic: One object plus one tone, *Cognition*, (in press).
2. 松田剛, 開一夫, 嶋田総太郎, 小田一郎: 近赤外分光法によるテレビゲーム操作中の脳活動計測, *シミュレーション &ゲーミング*, 13 (1), 21 - 31.
3. 小松孝徳, 開一夫, 岡夏樹: 人間とロボットとの円滑なコミュニケーションを目指して, *人工知能学会誌*, 17(6), 679-686, 2002.
4. 開一夫: 心の起源を求めて 認知発達メカニズムの探究, *精神神経学雑誌*, 第104巻, 第2号別冊, 133 - 137, 2002.
5. Hiraki,K.: Causality and Prediction, Detection of Delayed Intermodal Contingency in infancy, *Emergence and Development of Embodied Cognition*, 2, 1-2, 2001.
6. 鈴木健太郎, 植田一博, 開一夫: 自律的な行動学習を利用した評価教示の計算論的意味学習モデル, *認知科学*, Vol.9, No.2, P.200-212, 2002.

論文 :13 件 (上記含む)

口頭発表他 : 41 件

研究課題別評価

1. 研究課題名 : 人間共生型インターフェイス

2. 研究者氏名 : 前田 太郎

ポスドク研究員 : 安藤 英由樹 (研究期間 2001.4.1 ~ 2003.9.30)

ホスドク研究員 : 杉本 麻樹 (研究期間 2002.4.1 ~ 2003.9.30)

3. 研究の狙い :

近年、計算機の小型化・高機能化に伴ってウェアラブルコンピューティングの研究が開始されているが、その目的意識は通常の計算機端末を身につけて持ち歩いている域を脱してはいない。本研究で提唱するパラサイトヒューマン(以下 PH)はこれとは逆の立場をとるシステムである。PHは装着者に対する計算機端末としてではなく、装着者を含む外界環境に対して人間と同様に感覚情報を取り込み、自ら運動する代わりに装着者に対して行動要求を出すようになる共生型の装着システムである(図1)。本研究の第一段階では装着者と同次元・同スケールのセンサと効果器を持ち、同構造・同空間配置から得られた情報を統合するPHの機能によって人間の情報処理上の行動原理の第一次近似としてのモデルを得ることであり、人間の行動解析においてシミュレーションや一時的な行動記録では特定しにくい複雑度を持った知覚や行動を同一視点で継続的に計測することで、人間の身体的な構造に起因するスキルや行動ロジックを解析する一助とする。また第二段階では、PHを単体ではなく一群を形成する個体数用意して、その装着者を同一コミュニティの中で活動させることによる効果についても検証する。これは人間行動における社会性を計測・モデル化すると共に、PH間の相互作用、さらにはPHを装着した状態での共生関係にある人間同士の相互作用について検証するためである。これに加えて既存の計算機端末とPH間の通信についても準備することによって、人間と機械の共生する系によるマン・マシンインターフェイスの新たな局面を切り開くことを狙う。本研究の効果としては人間機能の工学的解明という自然科学的な基礎研究に寄与する側面に加えて、同技術の最終的な工学的応用として、こうした新しい設計思想による適応型マン・マシンインターフェイスとしての利用の側面において大きな成果と将来性が期待される。

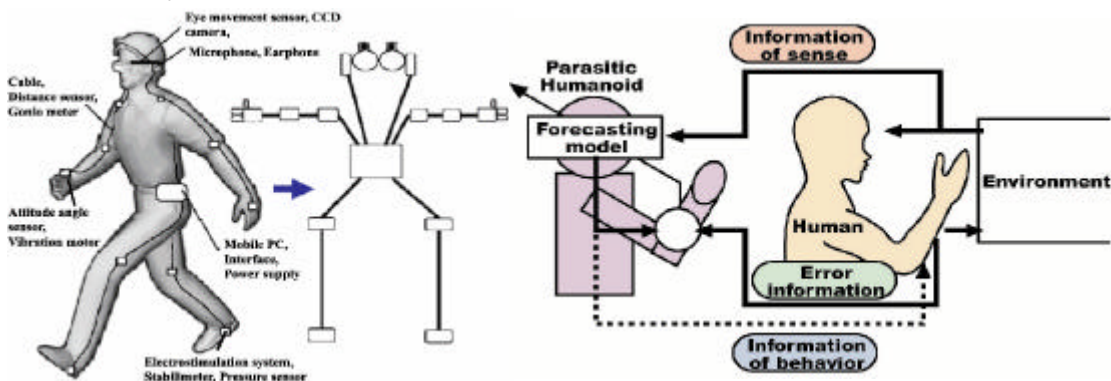


図1 PHの構成と行動モデルの獲得過程

4.研究結果：



第2図 PH 試作3号機と各部構成: 左上方より順に全身像、眼球運動検出器、眼球位置計測結果の検証写真、爪センサの実装概念図、爪センサ実装状態写真、PH 稼働状態モニタリング画面、身体運動計測用3軸姿勢センサ外形写真、前庭感覚刺激電極装着写真、身体各部電気刺激電極と電極上に固定された姿勢センサ、重心位置計測用荷重センサを配した靴底センサ部写真、装着者が片手で付け外し出来るように工夫された服の構造と電極・姿勢センサの装着過程。

PH は全身に装着されて機能するセンサ系と運動誘導刺激系を持ち、これらがそれぞれ人間の感覚系・運動系に相当するように構成した。この試作3号機とその各部構成を第2図に示す。これら装着装置系の総重量は計算機とバッテリーを除けば中継基板や配線を含めても500g以下の構成となっている。これらのデバイスはウェアラブルな実装のために小型軽量化を図るだけでなく、身体性に基づいたPH

特有の要素デバイスを多数提案・開発した。中でも前庭感覚刺激による方向誘導の手法はVRにおける加速度感覚提示などへの応用も含めて広い応用範囲が期待される刺激方法である。左右両耳後に装着した電極を介して数 mA 程度の直流電流を流す(図2中4列目中央)ことにより、装着者の感じている重力方向を電流値に応じて陽極側へとシフトさせる効果が生じる。これを利用して、図3のように歩行移動中の装着者の歩行を左右に誘導することが可能であることを被験者を用いた実験により確認した。

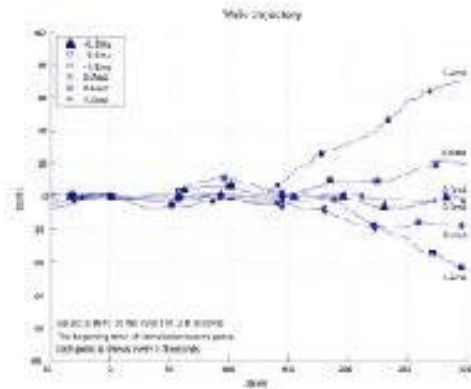
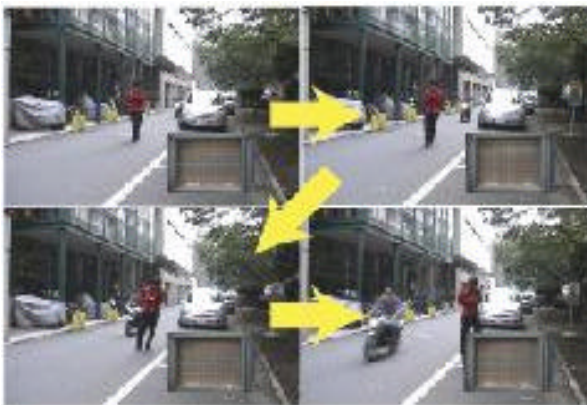


図3 前庭感覚刺激による歩行誘導実験(左)と歩行軌跡(Top View)(右)

以上の様な運動誘導を有効に行うためには、装着者の行動を同定し、予測する感覚・運動プロセスのモデルが必須である。PHではこのモデル化において観測・学習・誘導に身体性を利用したウェアラブルシステムならではの利点が活かされている。行動情報からの学習・分類を行うシステムの構成にはSOM(自己組織化マッピング)を始めとした神経回路モデルが概念上用いられているが、実際のデータの処理には神経回路網モデルの等価的な線形近似解としてICA(独立成分分析)を用いて学習の安定性と近似精度のトレードオフを図った。ジャンケン動作を用いた評価

実験においては、肘角度 + 手の甲の姿勢 3自由度の合計 4関節軸の情報から、特定装着者の出し手動作に関して、平均所要時間 0.3[s]の全行程中、1 / 3行程段階で 85%、2 / 3行程段階で 95%の確率で、出し手のリアルタイム予測に成功した。PHでは予測によって稼ぎ出される猶予時間 (このケースでは 100 ~ 200[ms])を用いてヒトの応答遅延時間 (150 ~ 300[ms]程度)を補償することで、運動誘導による教示を実動作の修正に利用する戦略をとっている。

5.自己評価：

第一目的である行動原理のモデル獲得に関しては、現時点で動作別に限定した状態で成功している。基礎的な各種知見と解析方法、ジャンケン動作、歩行、リーチング等の個別の行動予測モデルの獲得に成功した。また新しい概念に基づくウェアラブルデバイスとしての側面では多くの計測提示デバイスを開発し、新しく開発した各要素技術の優位性・有用性とそれらの連携動作の確認に関して被験者を用いた装着実験によって実証を行った。爪センサ、前庭感覚刺激、回転モーメント刺激装置などの新デバイスについても先行研究に対して多くの利点が立証でき、身体装着型のデバイス開発としては大きな成功を収めた。システム全体としても「運動解析」から「運動予測」をし、それに基づく「運動誘導」を行う一連のPHシステムの提案を介して、多くの問いかけと考察を得ることに成功した。ことに前庭感覚刺激による歩行の無意識誘導の体験に対する考察、ジャンケン動作の意識上の手形状決定と予備動作の関係などから行動発現に関する意識上・意識下の行動機能の役割と意識の表象に対する関係性についての新たな知見などがこの目標に対応する成果として得られている。二大目標のもう一方である装着型のマン・マシンインターフェイスとしての提案と実証に関しては、要素技術の前庭感覚刺激による意識下の歩行誘導が予想以上の成果をあげており、非言語情報支援を行う共生型インターフェイスの提案という目標は大きく達成されたと考えている。眼球運動利用のサッカードディスプレイや爪センサによる SmartFinger などの要素技術応用も順調でこの目標における達成度は高いと考える。複数台のPHによる実証実験に関してはPHを複数揃えて稼働状態を維持するための人的コストがかかりすぎることから、稼働 1台による時間差利用での複数の装着者間での非言語情報の共有という形で決着することとなった。また、ポスドク参加型としての本助成の体制は、チャレンジングな新分野に挑むための研究体制としては理想的であり、ポスドク雇用の出来ない個人研究や新分野への挑戦の困難なグループ研究では不可能な自由度と達成度をもたらしてくれたと評価している。

6.研究総括の見解：

本研究者の提唱する共生型インターフェイス (パラサイト・ヒューマン)は、ヒトが外界情報を捉えそこねていた場合や、成そうとしている行動に不備があった際に、ヒトの安全かつ効率の良い運動を誘導するためのウェアラブルロボットである。期間中にソフトウェアのための各運動形態に対する行動原理モデルを獲得し、ハードウェアとしては種々のウェアラブルデバイスを開発してその性能を確認している。このように要素技術に対する成果は大いに評価できる。今後、システムとしての評価を含む実用的な研究にまで進むことを期待したい。

7.主な論文等：

1. Taro MAEDA, Hideyuki ANDO, Maki SUGIMOTO, Junji WATANABE, and Takeshi MIKI:Wearable Robotics as a Behavioral Interface -The Study of the Parasitic Humanoid-,

- Proc of 6th International Symposium on Wearable Computers, pp.145-151, 2002.
2. H. Ando, T. Miki, M. Inami and T. Maeda, The Nail-Mounted Tactile Display for the behavior modeling, ACM SIGGRAPH 2002 Conference Abstracts and Applications, p.264(Sketches and Applications), 2002
 3. Taro Maeda, Eimei Oyama, Susumu Tachi: Why Is Binocular Visual Space Distorted Compared to Physical Space?, Neurocomputing, Vol.44-46, pp.907-914 (2002)
 4. 安藤 英由樹, 尾花 和俊, 渡邊 淳司, 杉本 麻樹, 前田 太郎: 回転モーメントを利用した機械ブレーキ式力覚提示装置の開発, ヒューマンインターフェイス学会論文誌 Vol.5 No.1, pp.181-188, 2003.
 5. 安藤 英由樹, 渡邊 淳司, 杉本 麻樹, 前田 太郎:独立成分分析による爪装着型センサの接触力と屈曲の分離,日本バーチャルリアリティ学会 Vol.8, No.4, pp.379-388, 2003.
 6. 杉本麻樹, 渡邊淳司, 安藤英由樹, 前田太郎:前庭感覚刺激による歩行方向の誘導 -パラサイトヒューマンの研究第 17 報-,日本バーチャルリアリティ学会 第 8 回大会論文集, pp.339-342, 2003

論文件数 :13 件 (上記を含む)

口頭発表 :査読付き国際会議 6 件 , 国内発表 17 件 .

出版 2 件

招待講演 5 件

メディア取材等 6 件

特許 :

1. 出願番号 :特願 2003-046658, 発明者 :前田太郎、安藤英由樹、杉本麻樹,
発明の名称 :身体誘導装置, 出願日 2003 年 2 月 25 日

研究課題別評価

1. 研究課題名 濃度制御に基づくDNA コンピューティング

2. 研究者氏名 山本 雅人

ポスドク研究員 亀田 充史 (研究期間 2001.4.1 ~ 2003.9.30)

ホスドク研究員 中津川 雅史 (研究期間 2003.4.1 ~ 2003.9.30)

3. 研究の狙い：

本研究では、これまでの DNA コンピューティングが抱える問題のブレークスルーとなりうる濃度制御手法を提案する。本手法は、DNA の本来持つ性質の一つである溶液性(水の中で数多くの分子が存在すること)に焦点をあて、DNA 分子の濃度を制御することで、目的とする DNA 配列(ターゲット DNA)の生成濃度を高くすることを期待するものである。具体的な例として、最短経路問題を取り上げ、DNA コンピューティングの実験過程について、シミュレーションによる分析、分子化学的実験とともに本手法の確立を目指す。ここでの狙いは、新しい濃度という概念を計算に持ち込むと同時に、対象とする問題のサイズを大きくすることを目的とし、個々の実験操作それぞれについて、計算精度や計算時間といった観点から見直しを行うことである。現在の技術における限界的な規模の問題を扱うことで、現在の技術の問題点や限界が見え、それらを解決していくことで最終的なスケールアップを狙う。

4. 研究結果：

本研究での主な研究成果は以下の通りである。

(1) ハイブリダイゼーションに基づく最短経路問題の解法アルゴリズムの提案

濃度制御 DNA コンピューティングでは濃度の大きな DNA 分子がハイブリダイゼーションにおいて、より反応に関与することを利用して最短経路問題を解く。濃度制御によって有望な解を表現する DNA のみを生成することになるが、解の抽出段階において同じ長さを持つ DNA を分離する必要があった。本研究では、そのために変性剤濃度勾配ゲル電気泳動(DGGE)、及び、変性剤定濃度ゲル電気泳動(CDGE)を利用した分離手法の提案を行い、有効性の検証を実験によって行った。また、DGGE、CDGE 法を適用する際、GC クランプと呼ばれる G と C のみからなる長さ30 の配列をプライマーに付加して分離を行った結果、分離精度の向上が見られることがわかった。

また、ハイブリダイゼーション過程によって生成される様々な種類の DNA 結合体の濃度を予測するシミュレーションモデルを構築し、シミュレータ開発を行った。シミュレーションのパラメータ調整をする際に、ハイブリダイゼーションによる経路生成が温度スケジュールと密接な関係にあることがわかり、さらなる検討が必要であることがわかった。本研究では、サーマルサイクラーを用いて温度管理を正確に行い、かつ、温度の下げ方を早くした方がミスハイブリダイゼーション等、望まない反応が起きないことを明らかにした。このような条件の下で、単純な構造を持つグラフを対象とした最短経路問題を解くことでパラメータ調整を行い、実験結果との一致が見られた。

(2) 塩基配列設計手法の確立

DNA コンピューティングにおける計算精度の向上を目指した場合、塩基配列設計は大きな課題の一つである。これまでの塩基配列設計は、ミスハイブリダイゼーション(望まない二本鎖形成)し

ないために、塩基配列間のずらしを考慮したハミング距離を一定以上に保つ配列を求める最適化問題に帰着して設計する手法が一般的であった。しかしながら、この方法では比較的安定な構造として知られているバルジ構造をとる DNA の影響を考慮していないため、DNA 塩基配列の正しい評価ができない。本研究では、ループの部分の塩基が一つであるシングルバルジ構造の安定性について検討した。具体的には、シングルバルジ構造をとる DNA の融解温度 (T_m) を予測するために、Nearest-Neighbor モデルの拡張を行い、バルジ構造部分配列の自由エネルギーを実験データに基づいて算出することを行った。本研究では、バルジ部分の位置による影響をなくすために、バルジ部分が配列の真ん中にある場合について、部分配列の自由エネルギーの算出を行った。部分配列の種類、すなわち、算出する自由エネルギーの値は全部で 64 種類あり、それらのすべてについて算出を完了した。この結果を利用することでバルジ構造をとる可能性のある DNA 塩基配列の安定性について、融解温度の予測を利用することにより評価が可能となることが期待される。

また、DNA の片側の末端部分が固相上に固定されていた場合に、固定されていない場合と比較して、バルジ構造をとる DNA の安定性が変化することを示し、固相上での DNA のハイブリダイゼーション反応を利用する DNA コンピューティングモデルを扱う際に注意が必要であることを実験によって示した。さらに、塩基配列設計を最適化問題に帰着して行う場合、厳しい制約条件を満たす配列集合を求める際に 2 段階の探索を行う方法を提案しその有効性を示した。

(3) ライゲーション、及び、カインーション反応の精度分析と時間短縮

ライゲーション反応(DNA 鎖の継ぎ目を結合させる酵素反応)において、ライゲーション反応時間と反応効率との関連を調べた。具体的には、ライゲーション時間を 10 秒から 20 時間程度まで変化させ、ライゲーション反応が実際に起こっているかを経路生成の問題に帰着させて測定した。その結果、ほぼ数秒でライゲーション反応の 90%以上が終了しており、その後はゆっくりと反応が進んでいることが確認できた。また、ライゲース(酵素)の量による影響もかなりあることがわかった。この成果により、DNA コンピューティングにおける計算(反応)時間を大幅に縮める可能性を確認できた。

(4) 化学反応の信頼性向上のための実験パラメータ調整手法の理論構築とツール開発

DNA コンピューティングにおいて計算の精度を向上させることは、化学反応が望み通りに実行され、再現性を高めることと捉えることができる。従来、化学反応の実験プロトコルは経験に基づいて構成されてきたものが多い。本研究では、実験計画法に基づいた品質工学的手法による実験パラメータの設計、分析手法を提案し、実験の再現性に基づいた信頼性尺度を導入し、PCR(ポリメラーゼ連鎖反応)における有効性を示した。また、実験データが徐々に蓄積されていく中で、これまでのデータをすべて用いることによって適切な実験パラメータ設定を出力可能な支援手法の提案を行った。すなわち、実験データの追加によって動的に最適プロトコルの変更が可能となる。本手法には、Mahalanobis Taguchi System (MTS) を利用した新しいパラメータ調整の理論構築を行った。また、実験計画法に基づいたパラメータ調整についても理論構築を行い、実験の信頼性向上のためにどのパラメータの影響が大きいかといった分析が可能となった。これらの手法を利用するためのツール開発を行った。

(5) 状態遷移 PCR による最短経路問題の解法アルゴリズムの提案

濃度制御 DNA コンピューティングの新しい計算モデルとして、状態遷移型 PCR(State Transition PCR(ST-PCR))を用いて最短経路問題を解く手法を提案した。本手法は現在の状態を

保持する状態分子と状態遷移を行うための状態遷移分子を用いて、状態分子の反応を制御する。本研究で提案したモデルでは、状態遷移分子の濃度を制御することで、溶液中に存在する状態分子の濃度を制御し、並列的局所探索が可能となる。このような状態遷移型 PCR モデルの実現可能性について検討した。この状態遷移モデルを利用して最短経路問題の解法アルゴリズムを提案し、11頂点の問題について適用した。また、状態遷移分子の3'末端側のポリメラーゼ伸長が起きないように、3'末端側を修飾する手法について検討した。また、状態分子、状態遷移分子の塩基配列の長さの検討を行った。

5. 自己評価：

研究開始時においては、濃度制御 DNA コンピューティングによって最短経路問題を解くアルゴリズムを提案し、問題のスケールアップを狙うことでDNA コンピューティングが抱えるいくつかの問題を明らかにし、それらの解決を試みることを考えて研究を行ってきた。その中で、小規模な問題でさえも予想外に多くの問題が存在することが徐々にわかってきた。そこで、解ける問題の大規模化を中心に据えるよりも、もっと根本的な DNA の性質や化学反応の特性、といった点に重点をおいて研究を進めた方が良いと考え、化学反応の正確な制御をより中心的な課題として研究を行ってきた。本研究で得られた成果は DNA コンピューティングの分野のみならず、バイオテクノロジーや DNA ナノテクノロジーなどの生体分子を正確に制御する必要のある多くの分野において、広く今後も利用可能となる有用な知見を得たと考えられる。

例えば、バルジループ構造をもつ DNA の安定性を正しく評価するための手法や、化学反応を安定化させるためのパラメータ調整手法の構築などは、地味な研究ではあるが有用な成果であると考えている。また、3年間の研究遂行上、ポスドク研究員の参加は不可欠であった。情報工学出身の研究者にとって、分子生物学専門のポスドク研究員は、実験に関する細かいアドバイスや実験遂行はもちろんのこと、日々の実験室のメンテナンスや消耗品の購入といった様々な仕事に関して協力を得られた。

6. 研究総括の見解：

エーデルマンによって提案された DNA のハイブリダイゼーションを利用するコンピューティングは、溶液の中での化学反応が計算に対応するので、ニューラルネットワークの弱点であるニューロン間の配線の多さを解決することができる有利さがある。このコンピューティング法が将来の発展性があるかについて、本研究者は、DNA 初期濃度を制御することにより、システムにバイアスかける方法を提案し、正解をより得易くすることに成功したことは評価される。またこの研究を遂行する上で、DNA 分子反応の制御に関するいくつかの新しい知見を得たことは評価できる。この段階では最大問題であるスケールアップに対する見通しが得られていないが、期間終了後も研究を継続してこの点が明らかになることを期待したい。

7. 主な論文等：

論文

1. Masahito Yamamoto, Atsushi Kameda, Nobuo Matsuura, Toshikazu Shiba, Yumi Kawazoe and Azuma Ohuchi: Local Search by Concentration Controlled DNA Computing, The International Journal of Computational Intelligence and Applications (IJCIA), Vol. 2, No. 4, pp. 447-455

(2002)

2. Atsushi Kameda, Nobuo Matsuura, Masahito Yamamoto and Azuma Ohuchi: An Analysis of Computational Efficiency on DNA Computing, Proceedings of 3rd International Conference on Unconventional Models of Computation (UMC' 02), pp. 191-198 (2002)
3. Masahito Yamamoto, Atsushi Kameda, Nobuo Matsuura, Toshikazu Shiba, Yumi Kawazoe and Azuma Ohuchi: A Separation Method for DNA Computing Based on Concentration Control, New Generation Computing, Vol. 20, pp. 251-261 (2002)
4. Masahito Yamamoto, Jin Yamashita, Toshikazu Shiba, Takuo Hirayama, Shigeharu Takiya, Keiji Suzuki, Masanobu Munekata and Azuma Ohuchi: A Study on the Hybridization Process in DNA Computing, DNA Based Computers 5, DIMACS Series 54 in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science, pp. 101-110 (2000)

他 26 件

解説

1. 山本 雅人 ,柴 肇一 ,大内 東 : DNA コンピューティングパラダイム-その原理と工学応用への課題 ,システム / 情報 / 制御 , Vol. 46, No. 5, pp. 260-268 (2002) (解説)

他 1 件

著書

1. 大内東 ,山本雅人 ,川村秀憲 ,他 ,相互作用科学シリーズ , '生命複雑系からの計算パラダイム',森北出版 ,(2003)

他 1 件

国内発表

計 7 件

研究課題別評価

1. 研究課題名 共生関係への移行に伴う遺伝子代謝ネットワークの再編成

2. 研究者氏名 四方 哲也

ホストク研究員 松山 晋一 (研究期間 2001.4.1 ~ 2003.3.31)

ポスドク研究員 早川 志帆 (研究期間 2002.5.1 ~ 2003.3.31)

ポスドク研究員 東 陽一郎 (研究期間 2000.12.1 ~ 2001.3.31)

3. 研究の狙い :

2種生物の共生系形成過程は、1つの生物にとって、過去に全く遭遇したことの無い未知の生物が環境に突然現れることから始まる。その際、生物は遺伝子代謝ネットワークを変化させて、もうひとつの未知の生物という新しい環境に柔軟に適応する必要がある。この環境変化は過去に経験したことがないので、それに対応する遺伝的プログラム、または、分子認識機構を生物があらかじめ用意していることはない。前もってプログラムが用意されていない環境変化に対して、どのように遺伝子代謝ネットワークは適応するのであろうか？この問題は、現代社会に存在する様々なネットワークを融合させる際に生じる共通問題である。独立に発達した複数ネットワークを融合するにはどのような仕組みがありえるだろうか？このプロジェクトは、新しい共生系の形成過程の解析から、生物の非線形ネットワークの示す柔軟な環境適応性の基礎的知見を得ることを当初計画とした。

具体的には独立に進化してきた2種の生物、粘菌と大腸菌の新規共生系形成過程を解析した。その結果、1)その形態変化と遺伝子代謝ネットワークの再編成を明らかにした。2)遺伝子代謝ネットワークの再編成(進化、分化、環境適応)で保存される規則として、傾き-2をもつべき乗則が発見された。

さらに、上記の当初計画に加えて、ネットワーク融合に関する上記の疑問に答えるために、より単純で解析が容易な系として大腸菌を用いて、遺伝子代謝ネットワークが安定に融合共生するための論理を探索した。その結果、3)競争関係にある大腸菌を一定環境で進化させると、細胞間相互作用によって共生関係へ移行することが分かった。4)以上の実験をもとに、非線形ネットワークがしめす環境応答機構として、「アトラクター選択」が提案され、大腸菌を用いて、実験的に証明された。

4. 研究結果 :

以下、結果1)~4)について詳細を記す。

結果1)粘菌と大腸菌の新規共生系形成過程を解析し、その形態変化と遺伝子代謝ネットワークの再編成を明らかにした。

細胞性粘菌は森の木陰で、大腸菌は哺乳類の腸内で独立に進化してきた。この2種類の生物を同じ貧栄養固体培地で培養すると、はじめに大腸菌が少し増え、それを粘菌が食べて成長する。この時点では2種の生物は捕食関係にある。しばらく時間が経過すると、個々の粘菌細胞としては、究極の選択を迫られる。大腸菌を捕食しなければ死んでしまうのだが、すべての大腸菌を食べ尽くせば、餌がなくなって集団全体が絶滅してしまう。実際に、2週間程度で、大腸菌も粘菌も、見か

け上ほとんど絶滅、または仮死状態になる。しかしながら、次に大変興味深い現象が現れる。絶滅が起きたと思われた貧栄養固体培地の上に、ぐずあん状の盛り上がった粘性のあるコロニーが数個現れる。その粘性コロニーを詳しく調べてみると、その中では、大腸菌が培地にはない必須栄養素を粘菌から貰い成長し、成長してきた大腸菌を粘菌が食べて、共に増殖しながら共生しているのである。このぐずあん状の粘性コロニーを分析すると、それぞれの細胞を単独で培養した時には見られない多糖類を大量に合成していることがわかった。また、粘菌はその大きさを半分程度まで縮めていた。大腸菌は繊維状につながっていた。共生系形成前後の大腸菌から、全遺伝子のmRNAを取り出し、アフィメトリックス社のジーンチップを用いて、各遺伝子の発現量を測定した。その結果、ゲノム全体の21%の遺伝子はその発現を増加させていた。発現量を減少していた遺伝子はゲノム中の15.6%で、解糖系、DNA RNA合成系、ストレス対応系であった。大まかには、エネルギーや物質生産を抑えて共生状態になっていた。また、興味深いのは、共生状態になることによって、ストレスから開放されて、より安定な状態に変化しているようであった。

結果2) 遺伝子代謝ネットワークの再編成(進化、分化、環境適応)で保存される規則として、同じ傾きをもつべき乗則が発見された。

共生系前後の大腸菌の遺伝子発現のデータを用いて、各遺伝子の発現量とその頻度の関係を解析した。その結果、臨界点現象など知られる傾き-2のべき乗則が発見された。ここで特筆すべきは、共生系形成過程前後で30%以上の遺伝子の発現量が変化しているにもかかわらず、同じ傾き-2をもつべき乗則が観測されたこと、つまり、共生系形成過程で保存される規則のひとつとして、べき乗則が見つかったことである。更に、大腸菌だけでなく酵母、シロイナズナ、線虫、マウス、人などで調べてみると、ほぼ-2のべき乗則を保存しながら、遺伝子代謝ネットワークが分化、進化していることが分かった。このようなべき乗則は、遺伝子代謝ネットワークだけでなく、ほかにも多くの報告があるが、その生成機構については統一的理解はない。そこで、詳細な機構にとらわれない確率拡散モデルとつかって解析を進めた結果、発現量の大きい遺伝子ほどその変化も大きいという傾向が平均として存在すれば、傾き-2のべき乗則が現れることがわかった。

結果3) 競争関係にある大腸菌を一定環境で進化させると、細胞間相互作用によって共生関係へ移行することが分かった。

大腸菌同士の競争から共存への移行過程を検討した。グルタミン合成酵素遺伝子にランダム変異を加えながら大腸菌を混合培養する。栄養は一定速度で培養槽に流入し、増殖した大腸菌を含めて培養液が一定速度で流出する。これらの変異型大腸菌は、同じえさを食べ、同じ空間を占めるので互いに強い競争関係にある。それらのうち多くは培養中に淘汰されてしまった。しかしながら、強い選択条件下でも1種類になってしまう事はなく、グルタミン合成酵素活性の少し違う大腸菌が共存した。どのようにして、競争関係から共存へ移行したのかを調べるために、数多くの競争実験を行った。その結果、グルタミン合成酵素活性の強い菌から、合成されたグルタミンが漏れ、それがもう一方の菌の増殖に影響を与えていることがわかった。生物個体は自己複製する単体なので、その内部のパラメータ変化は増殖を通して、結果的に利己的に見える。しかしながら、内部パラメータの変化は個体の増殖だけに影響するわけではない。むしろ、やわらかい生体膜を通して栄養が漏れ出したり、死亡破裂して内容物を外部に漏らしたりするので、他個体とも受動的に相互作用が生じてしまう。つまり、完全に利己的であることは不可能なのである。以上の実験結果は、このような不可避的な生物間相互作用が共生共存に重要な役割を果たしていることを示して

いる。

結果 4) 非線形ネットワークがしめす環境応答機構として、「アトラクター選択による適応応答」が提案され、そのネットワークをもった大腸菌を用いて、実験的に証明された。

共生系形成の初期過程では、1つの生物が、過去に全く遭遇したことがない生物が突然現れるという環境変化に、柔軟に適応する必要がある。この新しい環境変化に対しては、過去の進化過程で発達した遺伝的プログラムは使えない。どのように遺伝代謝ネットワークが再編されるのだろうか？これまでの実験結果を踏まえて、新しい機構、「アトラクター選択による適応応答」を理論的に提案した。非線形な遺伝子代謝ネットワークには複数のアトラクターが存在する。問題は、あらかじめ用意された情報伝達プログラムはなくいかに環境に適応したアトラクターを選択するかである。遺伝子ネットワークを表す非線形方程式の速度係数が細胞の活性に比例していることと測定された遺伝子発現のノイズ項を用いることによって、対称な吸収領域をもつアトラクターから細胞活性を高いものが選択されることが示された。そして、このアトラクター選択による環境適応を実装するために、小型遺伝子代謝ネットワークを構築して大腸菌に導入した。その結果、アトラクター選択による環境変化が理論どおりに起こった。

オペロン説の提唱以来、分子の結合解離に基づいた if then 型の分子情報伝達を中心にして、生物の機械的側面が多く解明されてきた。一方で、ノイズに対する頑強性や新規環境への柔軟な適応能力などの生物らしさは未探求のまま残されている。今回提案されたアトラクター選択は、生物のノイズに対する頑強さと環境変化に対する柔軟性を同時に満たす。よって、アトラクター選択を他の生物学の分野、特に細胞分化過程などでの細胞間コミュニケーションへ適応すれば、新しい潮流を創出すると期待される。

5. 自己評価：

当初計画にあったように遺伝子発現ネットワークの再編成が観察され (結果 1))、その中で分子生物学上の詳細な知見をこえて普遍的なルールが発見されたことは良かった。ポスドクや研究協力者に感謝したい。一方で、遺伝子網羅的解析装置の使用方法が企業によってたびたび変更されたため、詳細な時系列解析が出来なかったのは残念である。しかし、現在進行中なので今後達成されると考えている。当初計画に無かった結果 3) はアドバイザーによる建設的な批判によって励起された。この成果によって、ズッカーカンドル賞がいただけた。感謝に尽きる。また、結果 4) は、遺伝子網羅的解析装置の問題で困窮していた際に、低自由度観測系を勧めていただいた研究総括に感謝したい。

プロジェクト全体としては、ネットワークの柔軟な応答機構として、if-then-else 型でなく、ノイズに強いアトラクター選択の概念が提出できたことは大きな成果であろう。今後は共生形成過程だけでなく、他の遺伝子代謝ネットワークの応答、さらには情報科学のほかの分野にも、この新しい機構を適応し、システムの柔軟性を探求したい。

6. 研究総括の見解：

異種の遺伝子代謝ネットワークを持つ2種の生物集団が共生関係を始める時、ネットワークはどのように再編成されるかを遺伝子解析によって研究した。中でも細胞性粘菌と大腸菌のように通常は捕食関係にある種の間、また競合関係にあると考えられるグルタミン酵素活性の異なる大腸菌の間に共生関係が成立することを発見した。遺伝子解析によりその理由として究極状態では、

生物は完全には利己的ではなく利他的要素をもっているからであることを明らかにしたことは高く評価できる。また小型遺伝子代謝ネットワークを大腸菌に導入して、共生関係にはいるための経験がない生物が、環境に応じて共生関係を選択するメカニズムを明らかにしたことも評価される。この分野の研究として立派な成果が出始めたので、今後の更なる成果を期待したい。特に死滅よりは共生関係への選択を行うためのアトラクターの条件など、興味深い問題も解決されることを期待したい。

7. 主な論文等：

英論文 :17 件、招待講演 :16 件、学会発表 29 件

受賞 2002.2 Zuckerkandl Prize (The Journal of Molecular Evolution)

2003.8 日本進化学会 研究奨励賞

主な論文

1. Hiroki R. Ueda, Satoko Hayashi, Shinichi Matsuyama, Tetsuya Yomo, Seiichi Hashimoto, Steve A. Kay, John B. Hogenesch & Masamitsu Iino. Universality and Flexibility in Gene Expression from Bacteria to Human. Proc Natl Acad Sci USA (accepted)
2. Shin-Ichi Matsuyama, Chikara Furusawa, Masahiko Todoriki, Itaru Urabe and Tetsuya Yomo. Global change in Escherichia coli gene expression in initial stage of symbiosis with Dictyostelium cells. Biosystems (accepted)
3. Sato K, Ito Y, Yomo T, Kaneko On the relation between fluctuation and response in biological systems. (2003) Proc Natl Acad Sci U S A. 100(24):14086-90
4. Yomo, T. (2002) Molecular evolution in static and dynamical landscapes. J. Biol. Phys., 28(3): 471-482.
5. Todoriki, M., Oki, S., Matsuyama, S., Ko-Mitamura, E. P., Urabe, I., Yomo, T. (2002) An observation of the initial stage towards a symbiotic relationship. BioSystems., 65:105-112.
6. Kashiwagi, A., Noumachi, W., Katsuno, M., Alam, T. M., Urabe, I., Yomo, T. (2001) Plasticity of fitness and diversification process during an experimental molecular evolution. J. Mol. Evol., 52: 502-509.