

## 情報と知」研究領域 領域活動 評価報告書

- 平成 14 年度終了研究課題 -

研究総括 安西 祐一郎

### 1. 研究領域の概要

情報の面から人間の知的活動をサポートする新しい情報処理システムの構築を目指し、ソフトウェアを中心とした基盤的情報科学と先端的情報技術の研究を行う。例えば、分散処理、ネットワーク、アーキテクチャ、知的情報処理、マルチメディア、ヒューマンインタフェース、脳型コンピューティング、計算モデル、アルゴリズムなどに関する基礎研究、あるいは様々な分野への応用などの研究も含む。

### 2. 研究課題 研究者名

別紙一覧表参照

### 3. 選考方針

選考の基本的な考えは下記の通り。

- 1) 選考は「情報と知」領域に設けたアドバイザー7名と研究総括で行う。
- 2) 選考方法は、書類選考、面接選考および総合選考とする。
  - ・書類選考において、1提案につき3名のアドバイザーに査読評価を依頼する。
  - ・選考委員の所属機関と応募者の所属機関が異なるように配慮する。
  - ・面接選考では、可能な限り多くの研究提案を直接聴取し、質疑応答する。
- 3) 独創的な発想に恵まれ、活力に富み、自ら研究を実施する者を優先する。
- 4) 審査は、書類選考結果、面接選考結果および研究実施の条件等を加味して総合的観点から行う。

### 4. 選考の経緯

選考	書類選考	面接選考	採用者
対象者数	199人	28人	8人

### 5. 研究実施期間

平成 11 年 10 月 ~ 平成 14 年 9 月

### 6. 領域の活動状況

領域会議： 10回

研究報告会： 3回

領域総括 (または技術参事) の研究実施場所訪問： 研究開始に際し全研究者を訪問。その後研究実施場所を移った際に新研究実施場所を訪問、および、適宜研究者を訪問し、研究進捗を確認。

## 7. 評価の手続き

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、研究終了時に事業団が開催する一般公開の研究報告会等の参加者の意見を参考とした。

(評価の流れ)

平成 14年 9月	研究期間終了
平成 14年 12月	研究報告会を東京国際フォーラムで開催
平成 14年 12月	研究報告書及び自己評価提出
平成 15年 1月	研究総括による評価

## 8. 評価項目

- (イ) 外部発表 (論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新しい知見の取得等の研究成果の状況
- (ロ) 得られた研究成果の科学技術への貢献

## 9. 研究結果

前年度の採択数 20 名と比べると、第 3 期生は 199 名の応募者があったにもかかわらず、8 名の研究者採択と小さな集団となった。しかしながら、その採択された研究課題の内容はいずれも非常に重要であり、あるいは将来の社会還元が期待されるものである。即ち、テキストを中心とした高速データマイニングの研究(有村博紀)、視覚センサーネットワークを社会基盤として情報処理環境の次世代の形態を構築する研究(石黒浩)、広域分散環境下でも安全なオペレーティングシステムの研究(河野健二)、通信プロトコルの動的導入を許すコンピュータネットワークの研究(佐藤一郎)、プログラムの性能に対する理論的な研究(南出靖彦)などが情報科学・IT 技術の中心的課題であるが、その他に仮想的な社会・経済集団のマルチエージェントモデルを構築して計算シミュレーションを行う意思決定支援システムの研究(和泉潔)および脳科学における非線形振動子に基づくモジュール分化の研究(多賀巖太郎)、視覚認知の神経計算様式の研究(安藤広志)などが含まれており、バランスのよくとれた専門領域構成であった。

3 年間の研究期間を終了したが、8 名全員が当初より期待した研究成果を上げ、今後の土台を築き上げたと言える。また、平成 14 年 12 月 13 日、東京国際フォーラムで実施した広く一般を対象とした研究報告会での発表では多くの好意的な感想をいただいた。

研究者ごとに言えば、有村博紀は高速データマイニングの研究で、最適パターン発見に基づく高速なアルゴリズムに関して、理論・実装・応用において顕著な成果を上げた。

石黒浩は多数のセンサを持つコンピュータネットワークである視覚情報基盤の研究で、実用が今後期待される多数カメラシステムの問題を解決した。河野健二は、インターネットにおけるセキュリティ上の問題を扱い、基盤ソフトであるオペレーティングシステムからアプローチして、プロセス・モデルなどの基本的な概念の見直しを含めた一定の成果を上げた。佐藤一郎は、自律的通信パケットによる動的ネットワークとして、モバイルエージェントに代表される移動プログラム技術を利用して動的変更の可能性を持つ通信アーキテクチャを提案したが今後の発展・実用化が期待される。南出靖彦は、プログラムの性能に対する理論的な研究を推進し、コンパイラの信頼性向上に研究成果をあげた。正しさが検証されたコンパイラを構築する道筋ができつつあり、今後の研究推進が期待される。和泉潔は、人工社会・経済モデルによる意思決定支援システムの構築として、新しいアプローチの理論的・手法的な基礎を構築し、その応用研究までの成果を上げた。今後、このアプローチが様々な社会・経済現象の解明に適用されることが期待される。多賀徹太郎は、脳活動計測法として安全な非侵襲的な手法である光トポグラフィーを発達中の乳児に適用するという大きな課題に挑戦し、その先鞭をつけたことは、高く評価できる。乳児の認知や行動と脳の発達過程を明らかにすることは、脳科学や発達心理学だけでなく認知科学や計算科学へも影響を及ぼすことが考えられ、将来の研究進展が大いに期待される。安藤広志は、人間情報学の分野において、高次の視覚認知機構という複雑な研究対象に挑戦し、理論と実験の両面から重要な成果をあげたことは高く評価できる。特に、VRを用いたfMRI脳活動計測など新しい研究技法を積極的に開拓した。今後の研究の発展は「人間の知」の解明に貢献するものと期待する。

## 10. 評価者

研究総括 安西 祐一郎 慶應義塾長

### 領域アドバイザー氏名 (肩書きは現職)

久間 和生 三菱電機(株) 先端技術総合研究所 システム技術部門 部門統轄  
後藤 滋樹 早稲田大学理工学部 情報学科 教授  
田中 譲 北海道大学大学院工学研究科 電子情報工学専攻 教授  
西尾 章治郎 大阪大学大学院情報科学研究科 マルチメディア工学専攻 教授  
橋田 浩一 産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センター  
副研究センター長  
松山 隆司 京都大学大学院工学研究科 知能情報学専攻 教授  
米澤 明憲 東京大学大学院情報理工学系研究科 コンピュータ科学専攻 教授

(参考)

(1)外部発表件数

\*平成15年1月24日

	国内	国際	計
論文	34	14	48
口頭	63	57	120
その他	6	9	15
合計	103	80	183

(2)特許出願件数 : 国内出願 国際出願

1

0

(3)受賞等 :

- ・電子情報通信学会 DE 研究会 DEWS2002 優秀論文賞 2002年5月
- ・人工知能学会 2000年度論文賞 2001年5月
- ・PAKDD2000 Paper with Merit Award 2000年4月
- ・人工知能学会 1999年度全国大会優秀論文賞 1999年12月
- ・中山科学振興財団 中山賞奨励賞 2002年9月
- ・情報処理学会 論文賞 (平成12年5月受賞)
- ・情報処理学会山下記念研究賞 (平成12年10月受賞)

(4)招待講演

国際 : 6

国内 : 25

## 別紙

## 情報と知」領域 研究課題名および研究者氏名

研究者氏名 (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)
有村 博紀 (兼任)	最適パターン発見にもとづく高速テキストデータマイニング (九州大学)	九州大学大学院システム情報科学研究院 助教授 (同上)	43
安藤 広志 (兼任)	学習・生成・予測に基づく能動的な視覚認知の神経計算様式 (国際電気通信基礎技術研究所)	国際電気通信基礎技術研究所人間情報科学研究所 主任研究員 (同上)	44
石黒 浩 (兼任)	知覚情報基盤における実世界情報の獲得と表現 (和歌山大学)	大阪大学大学院工学研究科 教授 (京都大学大学院情報科学研究科 助教授)	47
和泉 潔 (兼任)	人工社会 経済モデルによる意思決定支援システムの構築 (産業技術総合研究所)	産業技術総合研究所 サイバーアシスト研究センター 研究員 (電子技術総合研究所 研究員)	44
河野 健二 (兼任)	広域分散環境のためのセキュアなオペレーティングシステム (電気通信大学)	電気通信大学電気通信学部 助手 (東京大学大学院理学系研究科 助手)	32
佐藤 一郎 (兼任)	自律的通信パケットによる動的ネットワーク (国立情報学研究所)	国立情報学研究所ソフトウェア研究系 助教授 (お茶の水女子大学理学部 助教授)	33
多賀 徹太郎 (兼任)	ヒトの発達過程における身体性とモジュール性 (東京大学)	東京大学大学院教育学研究科 講師 (東京大学大学院総合文化研究科 助手)	51
南出 靖彦 (兼任)	プログラムの性能を理論的に考慮したコンパイラの検証と構築 (筑波大学)	筑波大学電子情報学系 講師 (同上)	18

## 研究課題別研究評価

### 1. 研究課題名 :最適パターン発見にもとづく高速テキストデータマイニング

### 2. 研究者名 :有村博紀

### 3. 研究の狙い

本研究の目的は、ネットワーク上に蓄積された膨大なテキストと半構造データから、有用な情報を獲得するための高速なテキストデータマイニングシステムを開発することである。ウェブページやXMLデータ等のネットワーク上の大規模テキストデータの利用が急速に進みつつある現在、テキストデータからの効率良いデータマイニング手法の確立が緊急の課題となっている。しかしその一方で、これらの大規模テキストデータは、(1) 明示的な構造をもたない、(2) 多様な電子化文書の、(3) 膨大な量の集積であるという特徴をもっており、関係データベースを対象に開発されてきた従来型のデータマイニング技術をそのまま適用することができないという問題があった。そこで本研究では、従来型技術の活用ではなく、新しい観点からテキストマイニングの問題に正面から取り組み、テキストデータマイニングのための基本技術の研究開発を行なう。さらに、これら基本技術の開発を通じて、大規模テキストデータを対象とした高速テキストマイニングシステムのプロトタイプを構築する。研究の特色として、データマイニングを、人間による大量のデータ解析を支援する効率的な半自動的ツールとしてとらえ、従来の情報検索システムを超えた新しい情報アクセスシステムの開発を目指す。また、計算量理論と計算学習理論との最新の成果を積極的に取り入れて、大量のデータに対してきわめて高速かつ頑健に働くアルゴリズムの開発を目標とする。

### 4. 研究結果

本研究では、大規模テキストデータから、データを特徴付けるパターンを高速に発見するための、一連の高速なテキストデータマイニング手法を開発し、ネットワーク上の大規模テキストデータを対象としたテキストデータマイニングシステムの実現方式を明らかにする。本研究構想のポイントは、(1) 最適パターン発見の枠組みに基づく新しいテキストマイニングの枠組みの提案と、この枠組みに基づく一連の高速な最適パターン発見アルゴリズムの開発、(2) テキストマイニングシステムの大規模実装のための基盤技術の開発、(3) ウェブからの情報抽出と半構造データマイニングへの拡張、(4) 提案の枠組みと開発した技術の有効性を検証するための大規模テキストマイニング実験である。

さきがけ研究の3年間において、理論・実装・応用の3つの観点からこれらのポイントに重点を置いて研究を行ない、以下の研究結果を得た。

(1) 最適パターン発見に基づく高速な最適パターン発見アルゴリズムの開発。

- テキストデータマイニングを実現するための新しい枠組みとして最適パターン発見の枠組みを提案した。さらに、この最適パターン発見に基づいて、文字列アルゴリズムと計算幾何学研究の最新の成果を援用して、大量のテキストデータを特徴づけるパターンを高速に発見するテキストマイニングツール AWAP(Algorithm for Word- Association Patterns)を開発した。最適パターン発見は、多様なデータに対する頑健性と有用性が認識されている反面、高い計算

量をもつため、テキストデータに対する実用的なアルゴリズムの実現は難しいと考えられていた。今回の結果により、大規模テキストマイニングにおいても効率良い最適パターン発見が可能であることを示し、高速かつ頑健なテキストマイニングを実現するための基礎技術を確立することができた。

(2) テキストマイニングシステムの大規模実装のための基盤技術の開発。

1. 従来テキスト解析に利用されてきた接尾辞木(suffix tree)索引構造の代わりに、接尾辞配列(suffix array)と高さ配列(height array)という1次元整数配列を組み合わせ、大規模化可能で記憶効率が良いマイニング向けテキスト索引技法を開発した。このために必要な技術として、接尾辞配列の一方方向走査を用いた接尾辞木の巡回の模倣、索引構造の動的な再構成法、当時知られていなかった接尾辞配列からの高さ配列の線形時間構築法等、高速テキストマイニング実現のためのさまざまな基盤技術を新たに開発した。これらの技術開発により、AWAP アルゴリズムの2桁から3桁以上の高速化を達成した。
2. 大規模データマイニングアルゴリズムに用いられるディスク走査技法に基づいて、AWAP と相補的な性能をもち、外部記憶におかれた大規模テキストを扱うことのできるような、高速な最適パターン発見アルゴリズム LevelwiseScan を開発した。この技術により、実用的な計算資源だけを用いて、数百メガバイトを超えるような大量のテキストデータを対象としたテキストマイニングが可能になった。

(3) ウェブからの情報抽出と半構造データマイニング。

1. ウェブページやXMLデータ等の構造をもったテキスト(半構造データ)からのパターン発見問題を考察し、大量の半構造データからの頻出する部分構造を発見するアルゴリズム FREQT を開発した。さらに、これを最適パターン発見の枠組みに拡張し、情報エントロピーや分類精度等の統計的尺度に関する最適部分構造を高速に発見するアルゴリズム OPTT を与えた。また、理論的解析と実データを用いた計算機実験によって、ウェブマイニングにおける提案手法の有効性を実証した。これらの結果により、今後の半構造データマイニングのための基本的技術を確立した。
2. ウェブデータからの情報抽出問題を考察し、与えられたウェブページとそこからの切り出し例から、ウェブページの構造情報を用いて高精度な情報抽出を行なうラッパー構築手法 TreeWrapper と一連のアルゴリズムを開発した。実際のウェブページを用いた計算機実験では、従来手法に比較して精度の高い抽出結果が得られた。

(4) テキストマイニングシステムのプロトタイプ構築と応用実験。

1. 開発したアルゴリズムとデータ構造を基に、テキストマイニングのプロトタイプシステムを構築し、大規模テキストデータを用いたテキストマイニング実験を行なった。英文新聞記事データからの探索的文書ブラウジング実験と、ウェブ検索エンジンおよびウェブロボットを用いたネットワーク上のウェブページからのキーワード獲得実験を行い、最適パターン発見の有効性を示した。これにより、最適化パターン発見をもちいることで、ウェブデータのような多様な質と内容をもつ大規模テキストデータに対して、自然言語処理や領域依存の統計的経験則を用いることなく、有用なパターン発見が可能であることを示した。

5. 自己評価

さきがけ研究での最大の目標であった、高速かつ頑健なテキストマイニングシステムについて

は、そのためのテキストマイニングへの最適パターン発見の導入および、高速なパターン発見技術である AWAP と一連のアルゴリズム、大規模テキスト索引技術、XMLデータ等の半構造データに対する拡張により、大規模テキストマイニングのための基本的技術を開発することができた。さらに、プロトタイプシステムによる実験においては、大規模テキストデータの探索的ブラウジングや、ウェブからのキーワード発見等の実データを用いた応用実験によって、ネットワーク上の大規模データに対する情報獲得において、提案技術の応用可能性を示すことができたことも、本研究の有効な成果であったと考える。これらの研究成果により、最適パターン発見を用いたテキストマイニングが、従来型の情報アクセス技術を補完する新しい情報アクセス手段として有効性をもつことを示せたと考える。

このように、最適パターン発見に基づいたテキストマイニングと、そのための基盤技術の研究開発については、当初予定していた以上に研究を進めることができ、基本的技術を確立できたと考える。一方で、さきがけ研究開始時点での目標であった「並列テキストマイニングによる大規模テキストマイニング・システムの実現」に関しては、マイニング向け大規模テキスト索引の並列化を行った段階であり、完全な並列テキストマイニングシステムの構築までにははいたらなかった。

今後、この最適パターン発見技術を、ネットワーク上にあふれる膨大な量の情報から、自分が必要とする情報を得るための柔軟かつパワフルな道具とするためには、さきがけ研究の中心にすえてきたような高速なアルゴリズムの開発だけでなく、人間の知識獲得活動支援にこれらの技術をどのように埋め込むべきかといったシステム設計と人的因子等の問題も考えていく必要があると考えている。今後は、他分野・対象領域の専門家との協同研究も進めながら、研究を進めていきたい。

半構造データマイニングについては、現在急速に進展している分野であり、現在、半構造データの基本的問題の一部を解決できたという段階である。今後は、さきがけ研究で遂行したテキストマイニングの研究を、半構造データマイニング研究にどのように展開させていくべきかさらに探求をする必要がある。さきがけ終了後もさらに研究を遂行中であるが、現在、データマイニング分野では半構造データマイニングに関して、さまざまな技術提案や応用可能性が出されており、この方向にも、さらに継続して研究を進めたい。

大規模テキストデータからの知識獲得は、急速に情報社会化が進み、ネットワーク上に大量の情報があふれる中で、個人や組織が必要な情報を主体的に獲得し、迅速な決定を可能とするための鍵となる技術である。新しい型の大規模データであるXMLデータ等の半構造データ技術の急速な発展と普及は、このような情報獲得技術の重要性をますます強めるものである。本研究は、従来型技術の単なる組み合わせやアドホックな方法で一時的な解決を求めるのではなく、新しいアプローチで、大規模データに対する新しいアクセス技術を実現しようとするものである。

さきがけ研究の3年間では、本研究構想の実現に向けた基本的な研究成果を得ることができた。研究開発した技術が広く使われる有効な技術となるためには、今後も多くの問題を解決する必要があるが、理論にもとづいた応用と、応用に深く根ざした理論という正統的な計算科学の方法論にもとづいて、最終的な目標に近づいていきたい。さきがけ研究の3年間では、研究の基本構想の提案から、基礎技術の開発、応用への展望に関して、一貫した研究活動を行なうことができ、本研究構想の実現において大きく前進することができた。3年間のさきがけ研究による支援に多謝するとともに、今後も研究を発展させていきたいと考えている。



## 6. 研究総括の見解

緊急の課題となっているネットワーク上の大規模データからの知識獲得の技術に関して、膨大、多様で高速かつ頑健なテキストマイニングのための新しい基盤技術の確立を目指し、たゆまぬ努力により顕著な成果をあげた。具体的には、高速な最適パターン発見アルゴリズムの開発、テキストマイニングの大規模実装のための基盤技術の開発、また、大量の半構造データマイニングからの頻出する部分構造を発見するアルゴリズムの開発やプロトタイプ構築などがあるが、今後の研究発展が強く期待できる。

## 7. 主な論文等

### 論文]

- T. Asai, H. Arimura, K. Abe, S. Kawasoe, and S. Arikawa, Online Algorithms for Mining Semi-structured Data Stream, Proc. IEEE International Conference on Data Mining (ICDM'02), IEEE Computer Society Press, December 2002.
- K. Abe, S. Kawasoe, T. Asai, H. Arimura, S. Arikawa, Optimized Substructure Discovery for Semi-structured Data Proc. 6th European Conference on Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (PKDD-2002), LNAI 2431, Springer-Verlag, 1-14, 2002.
- T. Asai, K. Abe, S. Kawasoe, H. Arimura, H. Sakamoto, S. Arikawa, Efficient Substructure Discovery from Large Semi-structured Data, Proc. Second SIAM International Conference on Data Mining (SDM'02), 158-174, SIAM, 2002.
- H. Sakamoto, K. Hirata, and H. Arimura, Learning Elementary Formal Systems with Queries, Theoretical Computer Science, 2002. (accepted)
- 村上義継, 坂本比呂志, 有村博紀, 有川節夫 (九大), HTML からのテキストの自動切りだしアルゴリズムと実装, 情報処理学会論文誌 :数理モデル化と応用, Vol. 42, No. SIG 14 (TOM 5), 39-49, Dec 2001.
- 安積裕樹, 川副真治, 安部潤一郎, 有村博紀, 有川節夫 (九大), 分散記憶型並列計算機における大規模接尾辞配列の構築法, 情報処理学会論文誌 :数理モデル化と応用, Vol. 42, No. SIG 14 (TOM 5), 14-24, Dec 2001.
- H. Arimura, H. Sakamoto, S. Arikawa, Efficient Learning of Semi-structured Data from Queries, Proc. the 12th International Conference on Algorithmic Learning Theory (ALT'01), LNAI 2225, 315-331, Springer-Verlag, 2001.
- K. Taniguchi, H. Sakamoto, H. Arimura, S. Shimozone and S. Arikawa, Mining Semi-Structured Data by Path Expressions, Proc. the 4th International Conference on Discovery Science, LNAI 2226, 378-388, Springer-Verlag, 2001.
- A. Yamamoto, K. Ito, A. Ishino, H. Arimura, Proc. the 11th International Conference on Inductive Logic Programming (ILP'01), LNAI 2157, Springer-Verlag, 2001
- T. Kasai, G. Lee, H. Arimura, S. Arikawa, K. Park, Linear-time Longest-Common-Prefix Computation in Suffix Arrays and Its Applications, Proc. the 12th Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching (CPM'01), LNCS 2089, 181-192, Springer-Verlag, 2001.
- H. Arimura, H. Asaka, H. Sakamoto, S. Arikawa, Efficient Discovery of Proximity Patterns

with Suffix Arrays (Extended Abstract), Proc. the 12th Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching (CPM'01), Short talk, LNCS 2089, 152-156, Springer-Verlag, 2001.

- H. Sakamoto, H. Arimura, and S. Arikawa, Extracting Partial Structures from HTML Documents, Proc. the 14th Florida Artificial Intelligence Research Symposium (FLAIRS'2001), Florida, AAAI, 264-268, May, 2001.
- H. Arimura and S. Jain (eds.), Proc. the 11th International Workshop on Algorithmic Learning Theory (ALT'00), LNAI 1968, Springer-Verlag, Sydney, Dec. 2000.
- H. Arimura, J. Abe, R. Fujino, H. Sakamoto, S. Shimozone, S. Arikawa, Text Data Mining: Discovery of Important Keywords in the Cyberspace, Proc. Kyoto International Conference on Digital Libraries 2000, Kyoto University, British Library and National Science Foundation (U.S.A.), 121-126, 2000.
- H. Sakamoto, H. Arimura, S. Arikawa, Identification of Tree Translation Rules from Examples, Proc. the 5th International Colloquium on Grammatical Inference (ICGI 2000), LNAI 1891, Springer-Verlag, 241-255, Sep. 2000.
- 安部 潤一郎, 藤野 亮一, 下園 真一, 有村 博紀, 有川 節夫, テキストデータからの高速データマイニング人工知能学会誌, Vol.15, No.4, 2000 年 7 月
- H. Arimura, H. Sakamoto, and S. Arikawa, Learning Term Rewriting Systems from Entailment, 10th International Conference on Inductive Logic Programming (ILP2000) Work-in-Progress paper session, July 2000.
- H. Arimura, Text Data Mining with Optimized Pattern Discovery, Proc. the 17th Machine Intelligence - Life Long Learning and Discovery in Procedural and Declarative Knowledge, K. Furukawa, S. Muggleton, D. Michie, and L. DeRaedt (eds.), 2000.
- R. Fujino, H. Arimura, S. Arikawa, Discovering Unordered and Ordered Phrase Association Patterns for Text Mining, Proc. 4th Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (PAKDD2000), LNAI 1805, 281-293, Springer-Verlag, Nara, Apr. 2000.
- S. Shimozone, H. Arimura, and S. Arikawa, Efficient Discovery of Optimal Word-Association Patterns in Large Text Databases, New Generation Computing, 18, 49 - 60, 2000.
- A. Yamamoto and H. Arimura, Inductive Logic Programming : From Logic of Discovery to Machine Learning, Special Issue on Surveys on Discovery Science, (Eds.) S. Miyano, IEICE Transaction on Information and System, E83-D (1), 10-18, 2000.

#### 解説記事]

- 有村 博紀, 坂本比呂志, データマイニングにおける最適パターン発見, 応用数理, 応用数理学会, 第 12 巻第 4 号, 2002.
- 池田 大輔, 坂本 比呂志, 有村 博紀, ウェブデータマイニング, システム/制御/情報 「データマイニング特集号」, システム制御情報学会, 第 46 巻第 4 号, Apr. 2002.
- 坂本比呂志, 有村博紀, Web マイニング, 特集 「テキストマイニング」, 人工知能学会誌, Vol. 16, No. 2, 2001 年 3 月.
- 那須川哲哉, 河野浩之, 有村博紀, テキストマイニング基盤技術, 特集 「テキストマイニング」,

人工知能学会誌, Vol. 16, No. 2, 2001 年 3月.

受賞]

- 電子情報通信学会 DE 研究、DEWS2002 優秀論文賞、2002 年 5月受賞。
- 人工知能学会 2000 年度論文賞、2001 年 5 月受賞。
- PAKDD2000 Paper with Merit Award, 2000 年 4 月受賞。
- 人工知能学会 1999 年度全国大会優秀論文賞、1999 年 12 月受賞。

招待・依頼講演]

- H. Arimura, Efficient Text Mining with Optimized Pattern Discovery (invited talk), Proc. the 13th Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching (CPM'02), LNCS 2373, 17-19, Springer-Verlag, Fukuoka, July 2001. (招待講演)
- 坂本比呂志、村上義継、安部潤一郎、有村博紀、有川節夫、ウェブからの情報抽出と最適パターン発見, 特別セッション「データ・テキストマイニングにおける統計的モデリングの実際」, 第 4 回情報論的学習理論ワークショップ (BIS2001), 117-122, 2001. (招待講演)
- 有村博紀、最適パターン発見にもとづくデータマイニング, 統計数理とデータマイニング、統計数理研究所共同研究レポート, 142, 13-24, 統数研、2001. (依頼講演)
- 有村博紀、データマイニング - ウェブデータからの知識発見を目指して -, 電子情報通信学会 IT 研究会、2000. (招待講演)
- チュートリアル企画、発見科学とデータマイニングの最前線 金融 経済 ゲノムからウェブまで、2001 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、2001 年 9 月. (依頼講演)
- 有村博紀、テキストマイニング :ウェブデータからの知識発見を目指して、第 25 回情報化学討論会概要集, J13, 日本化学会情報化学部会、2002. (招待講演)

## 研究課題別研究評価

### 1. 研究課題名 学習・生成・予測に基づく能動的な視覚認知の神経計算様式

### 2. 研究者名 安藤広志

### 3. 研究の狙い

人間の脳は、高度に発達した視覚認知システムを有しており、外界の多様な変化を瞬時に把握できるその柔軟性において、現存する人工の視覚システムを遥かに凌いでいる。このような生体の優れた情報処理システムの計算機構を解明するために、視覚認知の研究はこれまで様々な発展を遂げてきた。しかし、まだ十分に解明されていない脳の仕組みに「能動的な視覚認知」の機構がある。すなわち、生体の視覚処理には、低次から高次へと段階的に入力情報の解釈を進める受動的な処理機構だけでなく、高次の環境認識や行動制御のシステムと協調して処理を進める能動的な視覚認知の機構が存在すると考えられる。特に、能動的な視覚認知では、入力情報を固定的に解釈するだけでなく、課題に応じた「学習」により視覚表現を獲得し、獲得した表現から視覚イメージを「生成」して情報の補完や選択を行なうとともに、迅速に行動制御を行なうために視覚環境が将来どのように変化するかを「予測」する機能を持つと考えられる。

本研究のねらいは、このような学習・生成・予測に基づく能動的な視覚認知機構に焦点を当て、その神経計算の仕組みを探ることにある。具体的には、視覚イメージ生成に基づく3次元情景認識や3次元動体予測の神経機構を研究テーマとして取り上げ、神経計算モデルの構築・シミュレーション、および視覚心理実験・脳活動計測といった複数の研究手法を用いて、これらの神経計算機構を探る。特に、本研究では、VR技術を用いた広視野立体ディスプレイによる視覚心理実験やfMRI(機能的磁気共鳴撮像)装置を用いた非侵襲脳計測実験などの新しい研究手法の開発も目標とする。このように、本研究では、モデル構成と視覚実験の両手法を用いることにより、従来の受動的な視覚処理の枠組みを打ち破って、高次の認知機能や行動制御と密接に関連した、よりダイナミックな視覚認知の枠組みの基盤を創り出すことを目指す。

### 4. 研究結果

本研究の成果は、次の4つに集約される。

1) **生成に基づく「認識」モデルの構築と展開。** 低次の画像処理と高次の認識処理の間で情報を双方向的に循環させる「生成に基づく「認識」モデル」を構築するとともに、属性を操作した画像を新規に生成する統計的手法を開発した。このモデルでは、複雑な3次元環境に対処するため、低次と高次の処理系の情報を融合した「中間統合表現」を明示的に生成しながら物体認識を行なう。特に、高次視覚系における「連続視点表現への引き込み」と低次視覚系における「画像分析(物体領域推定と注視点制御)」を同時に最適化する。このような双方向ダイナミクスに基づく計算様式は、物体画像の変換補正や分節化に役立つとともに、複数の物体が互いに重なり合っている複雑な3次元情景の認識に対して特に有効に機能すると考えられる。そのため、画像の一部が遮蔽された物体像や複数の物体が重なり合った画像の認識を計算機実験により評価し、本モデルが有効に機能することを確認した。さらに、視覚イメージ生成の新しい手法として、単一の画像に含まれる属性値を操作してさまざまな新規の画像を生成する統計的な手法を構成した。

この手法では、多数の画像から属性値の統計的な特徴を抽出し、その特徴を操作することで、与えられた画像に対してさまざまな新規の画像を合成することが可能になる。この手法を計算機に実装し、年齢の属性値を操作した顔画像の生成を試み、その有効性を確認した。

2) **生成イメージが構造推定に与える効果の実験的検証。** 記憶像から生成された心的な視覚イメージが外界構造の推定に与えるトップダウン効果を視覚心理実験により検証した。生成に基づく「認識」モデルで仮定したような「階層モジュール間の強い相互作用」が存在するとすれば、記憶から生成された高次の視覚情報も立体再構築に貢献するはずである。そこで、記憶表現から脳内で新規に生成された心的イメージ (Mental Imagery) が3次元構造知覚に与える効果について検証する実験を行なった。特に、心的回転 (Mental Rotation) を活用した新しい実験手法を考案し、運動情報から3次元形状を知覚する「運動立体視 (Structure-from-Motion)」に対して、視覚イメージが影響を与えるか否かを調べた。この実験から、3次元環境の推定には、物体の剛体性など外界の自然規則 (物理的拘束条件) だけでなく、記憶表現から内的に生成された視覚イメージ情報も貢献することが示唆され、従来考えられてきた受動的な視覚機構だけではなく、高次の学習生成過程と画像理解過程との協調処理が脳内に存在する可能性が示された。

3) **動体予測における学習効果の視覚心理実験による検証。** VR (3次元仮想空間) 技術を活用した3次元動体予測の視覚心理実験を行ない、人間の動体予測における学習効果を確認した。本研究では、高輝度広視野 (視角で  $65^{\circ} \times 81^{\circ}$ ) の立体提示システムを構築し、ヒトの3次元動体予測の精度を測定するとともに、「視覚学習の効果」を調べる実験を行った。このような実験を行ったところ、以下の結果が得られた。1) 観察者は、物体が終点に到達する時刻より前に、終点位置を一撃的に予測することができる。2) 物体消失位置が観察者に近いほど、予測の精度と確信度は高まる傾向がある。3) 学習前後の実験結果の比較から、予測の精度と確信度は、純粋な視覚学習により向上した。4) 動体予測の学習効果は、フィードバックを与えた運動方向のみ顕著に現われ、汎化効果は限定的であった。5) 脳内では、一定の重力加速度が仮定されて、動体予測の計算が行なわれている。これらの実験結果により、人間の動体予測能力は、従来、想定されてきた以上に柔軟であり、個別の環境刺激に対応して適応的な処理が行なわれていることが示された。

4) **脳活動計測による動体予測に係わる脳領野の特定。** 体性感覚と連携し、能動的な視覚処理に係わると考えられる「頭頂連合野」(特に頭頂間溝周辺) が、動体予測においては中枢的な役割を果たすという仮説を提案し、fMRI (Functional Magnetic Resonance Imaging 機能的磁気共鳴撮像) 装置を用いて、その検証を試みた。本実験では、予測課題と非予測課題を行なった場合の脳活動を統計的に比較することで、動体予測に関わる皮質領野の特定を行なった。実験データの統計的分析の結果、以下の領野に有意な脳活動が認められた。1) 頭頂間溝 (intraparietal sulcus: IPS) 前部および上下の頭頂小葉 (BA7 と BA40 に対応) 2) 運動前野背側部 (BA6) 3) 下前頭回 (BA44; Broca 野、BA47) 4) 小脳外側部 (lateral cerebellum)。この結果は、頭頂連合野を中心とした神経ネットワークが動体予測に強く関与することを示唆している。

## 5. 自己評価

本研究では、従来の受動的かつ固定的な脳の視覚認知機構の枠組みを打開し、学習による視覚情報の獲得、生成イメージに基づく視覚処理、行動制御のための動体予測といった、より能動的でダイナミックな視覚認知機構の解明を目指してきた。そのために、神経計算モデルの構成と

新しい実験パラダイムの開発を行ない、能動的な視覚認知の枠組みを構築するための「基盤」をこの3年間で確立できたと考えている。特に、1) 視覚イメージ生成の計算モデルを構成し、物体認識と構造知覚を結ぶ新しい枠組みを構築できた点、2) VRを用いた新しい視覚実験手法を開発し、行動制御に係わる高次視覚を明らかにする有効な手段を切り開いた点、3) fMRI 脳活動イメージングの実験技術を駆使し、動体予測の脳領野の特定に初めて成功した点、において、重要な成果を得ることができたと考える。これらの成果は、今後、論文・学会等においてさらに積極的に公表していく予定である。

一方、能動的な視覚認知の計算様式の全容を解明し、統一的な枠組みを構築するためには、本研究で得た成果を踏まえて、さらに研究を推進する必要がある。特に、物体認識の計算モデルに関しては、モデルの頑健性を高め、より複雑な実環境下で機能するための機構を工夫していく必要がある。また、このモデルで仮定している効果が脳内に実在するかを、より広範囲の刺激パターンを用いて、視覚心理実験および脳活動計測実験により検証していく予定である。動体予測の視覚心理実験に関しては、より現実世界に近い環境下でのヒトの動環境予測の精度と学習能力を明らかにしていきたい。特に、複数の物体が衝突を引き起こす状況、自己運動をともなう状況での動体予測など、より複雑な動環境をVRで生成し、視覚実験を進めていく予定である。さらに、動体予測の脳活動計測に関しても、活動が認められた各領野の機能特性の解明、学習により脳活動が変化する領野の特定などを今後の研究目標にしている。最終的には、環境認識と行動制御に係わる視覚処理モデルを統合して、より統一的な視覚認知の枠組みの構築を目指していきたい。

## 6. 研究総括の見解

人間情報科学の分野において、これまで解明が進んでいなかった高次の能動的視覚認知機構という複雑な研究対象に挑戦し、理論と実験の両面から重要な成果をあげたことを高く評価したい。特に、VRを用いたfMRI脳活動計測など、新しい研究技法を積極的に開拓した。本研究の成果の発展に一層努力すれば、人間の「知」の解明に向けて、将来大きな貢献が期待できる。

## 7. 主な論文等

Ando, H. (2003). Internal representation of gravity for visual prediction of an approaching 3D object. To be published in VSS03.

安藤広志 (2002) 仮想立体視空間を用いた動体予測の脳機構の研究 .VR 学会「手」探り研究会招待講演 .

Ando, H. (2002). Human Brain Regions Involved in Visual Motion Prediction. NeuroImage Human Brain Mapping 2002 Meeting, 599.

Mukaida, S., Ando, H., Kinosiha, K., Kamachi, M. and Chihara, K. (2002). Facial Image Synthesis Using Age Manipulation based on Statistical Feature Extraction. Visualization, Imaging, and Image Processing. 12-17.

- 向田茂,安藤広志,木下敬介,蒲池みゆき,千原國宏 (2002).顔画像生成のための統計的な年齢特徴抽出.日本顔学会誌 2(1). 15-24.
- 桑山妙子,金子寛彦,安藤広志 (2002) 両眼視差とテクスチャの3次元情報統合における視覚学習の効果. Forum on Information Technology 2002. K-21.
- Ando, H. (2001). Visual Learning in the Spatial Prediction of an Approaching 3D Object. Journal of Vision, 1 (3), 313.
- 安藤広志 (2001) 3次元動体の運動予測と視覚学習. 生理学会招待講演:視覚のメカニズム (生理,心理物理,計算論的アプローチ).
- Ando, H. (2000). Visual Imagery Influences Perception of 3D Structure from Motion. Investigative Ophthalmology and Visual Science, 41(4), S717
- 安藤広志 (2000) 3次元環境の視覚認知 階層間ダイナミクスと神経計算様式. 東京工業大学理工学研究科 特別講演会.

## 研究課題別評価

### 1. 研究課題名 知覚情報基盤における実世界情報の獲得と表現

### 2. 研究者氏名 :石黒 浩

### 3. 研究の狙い :

本研究では、知覚情報基盤における実世界情報の獲得と表現、特にその情報獲得に関わる基本問題を解決するとともに、プロトタイプシステムを開発することを目的とした。

知覚情報基盤とは、コンピュータネットワークにつながれた各コンピュータに、多数のセンサを備え付け、それらネットワークで結ばれた多数のセンサを介して得られる実時間の情報により、効果的に人間やロボット等、実世界で活動するエージェントの情報処理活動を支援するという次世代のコンピュータネットワークである。この知覚情報基盤の設計・開発・利用におけるコンセプトは次の通りである。

- (1)多数のカメラやマイクロフォンを環境に設置し、環境で起こる事象を実時間で解析しながら環境内で活動するエージェントを支援する。
- (2)センサの設置やネットワークの構成において、十分に柔軟なシステムを実現する。
- (3)センサは実時間で情報処理を可能とするために、それぞれ分散したコンピュータに接続され、ネットワークを介して情報交換を行う
- (4)センサから得られる情報は実世界の事象の構造を反映しながら、センサのネットワークを動的に組織化することによって、表現され利用される。

本研究では、上記のコンセプトの内、特に(1)と(2)について研究開発を行う。

知覚情報基盤の研究を展開する上で重要なのが、知覚を担うセンサである。このセンサとして研究者が開発した全方位カメラをそのキーデバイスとして用いる。全方位カメラは、その視野の広さから環境を十分に覆うのに便利であるだけでなく、視線の制約を持たないために、センサ自身の位置決めが容易となるという情報基盤には非常に有利な特徴を持つ。この全方位カメラを用いて知覚情報基盤のプロトタイプである分散全方位視覚システムを構築し、それをもとに、知覚情報基盤の基本問題に取り組む。

### 4. 研究結果 :

研究成果は、センサの同定と位置決めに関する基礎研究と、それを基に実現される分散全方位視覚システムによる人間の動作認識に大別される。それぞれについて概要を述べる。

#### 4.1 センサの同定と位置決めに関する基礎研究

分散全方位視覚システムと通常のカメラを用いたシステムとの違いは、視野の広い全方位カメラを用いることに加え、通常のカメラを用いたシステムが比較的狭い場所を多数のカメラで観測するのに対して、分散全方位視覚システムは、少ないカメラでより広い範囲をカバーすることである。具体的には以下の特徴を利用して、分散全方位視覚システムの特徴ある処理



を実現できる。

- a) 全方位カメラが比較的狭い場所に分布する場合、全方位カメラは互いに観測し合うことができる。
- b) 全方位カメラが小型で、互いの投影が小さい場合には、FOE 制約を用いて、相対的な位置決めが可能である。
- c) 環境中の動物体を複数の全方位カメラで同時に観測することができる。

このような特徴をもとに、センサの位置決めと同定に関して、以下の4つの基本アルゴリズムを考案した。これらのアルゴリズムは全てのカメラはコンピュータネットワークに結ばれており、任意のカメラ間での通信が可能であるという前提に基づいている。

1. カメラ同士の観測に基づく複数全方位カメラの同定と位置決め
2. 環境の観測に基づく複数全方位カメラの位置決め
3. 動物体の観測に基づく複数全方位カメラの同定と位置決め
4. 動物体の観測に基づく複数全方位カメラの同定と位置決め (定性的手法)

これら開発したアルゴリズムは、環境の状態に応じて使い分けたり、複数を組み合わせることで、実用的な利用が可能となる。特に、1はカメラを持つ多数のロボットの位置決め利用されている。また、4の定性的手法は、定性的な視覚情報から定性的な位置関係を導いた、純粹定性的な手法である。

#### 4.2 分散全方位視覚システムによる人間の動作認識

人間の動作認識に関しては以下の研究成果を得た。

1. N眼ステレオ視による実時間人間追跡システムの開発
2. 複数のコンピュータをネットワーク状に結合した16台のカメラを用いた実時間人間追跡システムの開発
3. VAMBAMによる位置や方位に依存しないジェスチャ認識システムの開発
4. ジェスチャ認識システムの障害物のある状況や複数人行動への拡張
5. ジェスチャ認識に基づく情報提示システムの開発

1のN眼ステレオ視は、分散全方位視覚システムの基本となる認識アルゴリズムであり、対象を観測可能なすべてのカメラを用いたステレオ視である。多数のカメラからの情報を用いることで、個々のカメラにおいて抽出すべき特徴は、背景差分程度の単純なものにとどめることができ、故に、実時間で安定した人間追跡が可能となった。このシステムは幼児の社会行動実験等にも利用している。

3のジェスチャ認識システムは、1の人間追跡システム上に実装されるものである。そこで用いた、VAMBAMは見え方に基づく全方位のアスペクトモデルという独自に考案したもので、人間のジェスチャに関して全方位からの見え方をモデル化している。故に、1のシステムと組み合わせることによって、位置や方位に依存しないジェスチャ認識が可能となった。また、そのモデルの単純さから4の複数人間による動作の認識にまで対応させることができた。

## 5. 自己評価：

3年間の研究の目標は、知覚情報基盤の基礎技術を構築することにあった。この知覚情報基盤に関して、当初イメージしていたものは、環境が人間の行動を見ながら逐次情報提供し、それに人間が反応するという知的な情報基盤である。センサ情報処理の問題においても、多数のセンサを用いることで認識の問題が容易に解決できるという見通しを持っていた。しかしながら、情報基盤と人間の相互作用において知的と感じられるものを作ることの難しさを痛感したというのが、全体的な反省である。この難しさは以下の問題に起因すると考えている。

1. センサの数の少なさ
2. センサによる人間行動理解の難しさ

本研究では、カメラは最大 24 台まで用いた。既存のコンピュータと組み合わせて用いた数としては多いが、センサ情報処理の手法を根本から変える数としては少なすぎた。既存のコンピュータの枠を離れて独自にセンサネットワークのハードウェアを考案し、さらに一桁二桁多い数のセンサを扱う必要があったと反省している。

2つ目の反省点は、最初に認識システムを手がけたことである。ロバストな認識システムを作ることが、人間と相互作用可能な知覚情報基盤実現への早道と考えたが、その結果、人間に情報を提供する出力デバイスの研究に着手する時間がなくなった。人間行動をモデル化することが多数のカメラを用いても予想以上に難しく、またそこから読みとれる情報にも限りがある。簡単な相互作用から、視覚認識を含んだより複雑な相互作用へとくみ上げていくアプローチが必要であったと考えている。現在、センサの数を増やし、後者のアプローチの可能性を引き続き探求している。

一方で、カメラや対象物の位置決めと同定問題に関して一連のアルゴリズムを考案したことと、古典的手法の延長ではあるが、多数のカメラを用いた実時間人間追跡システム、さらに、全方位のジェスチャモデルに基づく位置や方位に依存しないジェスチャ認識システムを完成させたことは、コンピュータビジョン研究、カメラネットワーク研究を前進させるものであったと確信している。一連の位置決めと同定問題に関するアルゴリズムは、多数カメラシステムの基本アルゴリズムであり、また、ジェスチャ認識システムにおいても、広範囲をカバーするジェスチャ認識システムとしてはこれまでにないパフォーマンスを示すことができたと考えている。

本研究の成果は、知覚情報基盤の一つの形態である多数カメラシステムに関して、新しい情報基盤構築に役立つものである。

## 6. 研究総括の見解：

多数のセンサを持つコンピュータネットワークである知覚情報基盤の研究は、次世代の情報基盤として必要不可欠かつ重要なものである。本研究はその中で特に今後実用化が期待される多数カメラシステムの問題を扱っており、得られた研究成果は、今後の多数カメラシステムの研究開発、さらには未来社会で重要になると考えられる知覚情報基盤の研究開発に貢献するものと考えられる。

また、本研究は招待講演も多く、その研究内容や研究者本人は広く認知されている。研究

者としての独立を支援することが、さきがけ研究の目的でもあるが、その意味において、本研究者は有効にこのさきがけ研究の枠組みを利用できたと考える。

## 7. 主な論文等：

### 7.1 主な招待講演

1999年10月15日	分散視覚認知,情報処理学会知能と複雑系研究会,情報処理学会
2000年1月24日	環境知能,異分野研究者交流ワークショップ,科学技術振興事業団 主催
2000年3月9日	分散全方位視覚システムによる知覚情報基盤,第1回動画処理実 利用化ワークショップ,精密工学会
2000年5月26日	知覚情報基盤による情報発信,メディアフォーラム京都2000(主催: 京都市,京都高度情報化推進委員会,NHK 京都放送局,京都新聞社)
2000年7月11日	知覚情報基盤にむけて,情報統合(SIG-CII)研究会,人工知能学会
2000年9月27日	相互依存構造,未来開拓プロジェクト「インタラクションによる相乗効 果を用いた感性想像世界の構築」,日本学術振興会
2001年2月19日	分散全方位視覚の研究,コンピュータビジョンとイメージメディア研究 会,情報処理学会
2001年8月11日	Studies on distributed omnidirectional vision, Advanced Science Institute 2001 "New Frontiers of Intelligent Robotics", Organized by Japan Society for the Promotion of Science and Association of International Education

### 7.2 主な解説 論文 国際会議 本

1. 石黒浩,ロボットビジョンのための視覚システム,光学,Vol. 30, pp 720-724, 2001.
2. 十河卓司,石黒浩,分散全方位視覚の研究,情報処理学会論文誌コンピュータビジョンとイメージメディア, 2001. Vol. 42, No. SIG 13 (CVIM 3), pp. 33-40, 2001.
3. 西村拓一,十河卓司,小木しのぶ,岡隆一,石黒浩,動き変化に基づく view-based aspect model による動作認識,電子情報通信学会論文誌,D-II, Vol. J84-D-II, No.10, pp. 2212-2223, 2001.
4. 十河卓司,石黒浩,M. Trivedi, 複数の全方位センサによる実時間人間追跡システム電子情報通信学会論文誌, Vol. J83-D-II, No. 12, pp.2567-2577, 2000.
5. H. Ishiguro, T. Nishimura, VAMBAM: View and motion based aspect models for distributed omnidirectional vision systems, Proc. Int. J. Conf. Artificial Intelligence, pp. 1375-1380, 2001.
6. K. Kato, H. Ishiguro, Matthew Barth, Town digitizing: Recording of street views by using omnidirectional vision sensors, Proc. Int. Conf. Industrial Electronics, Control and Instrumentation, pp.2571-2576, 2000.

7. T. Sogo, H. Ishiguro, M. Trivedi, Real-time target localization and tracking by N-ocular stereo, Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision (OMNIVIS'00), pp. 153-160, 2000.
8. T. Nishimura, T. Sogo, R. Oka, H. Ishiguro, Recognition of human motion behaviors using multiple omni-directional vision sensors, Proc. Int. Conf. Industrial Electronics, Control and Instrumentation, pp.2553-2558, 2000.
9. T. Nakamura, A. Ebina, M. Imai, T. Ogasawara, H. Ishiguro, Real-time identifying spatial configuration between multiple robots by triangle and enumeration constraints, Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.2048-2054, 2000.
10. T. Sogo, H. Ishiguro, M. Trivedi, N-ocular stereo for real-time human tracking, In Ryad Benosman and Sing Bing Kang Eds., Panoramic Vision: Sensors, Theory and Applications, Springer-Verlag, Berlin, 2001.
11. H. Ishiguro, K. Kato, M. Barth, Identification and localization of multiple omnidirectional vision sensors, In Ryad Benosman and Sing Bing Kang Eds., Panoramic Vision: Sensors, Theory and Applications, Springer-Verlag, Berlin, 2001.

## 研究課題別評価

### 1. 研究課題名 :人工社会 経済モデルによる意思決定支援システムの構築

### 2. 研究者氏名 和泉 潔

### 3. 研究の狙い:

本研究の目的は、社会 経済システムに参加している一人一人の行動が、社会や経済全体の動きとどのようにつながっているのかということを解明するために、人工社会・人工経済と呼ばれる新たなアプローチを提唱することである。

人工社会および人工経済とは、その言葉の通り 計算機上に人の手によって人工的に作りだされた架空の社会現象や経済現象のことである。より具体的には、エージェントを基本単位とした、社会 経済構造を持つ、計算機プログラムのことである。

いままでの社会 経済理論ではこれらの問題をうまく解明することは出来なかった。特に今までの経済理論では合理的な人間だけが存在する経済を想定して、個性の違いや、心理的な側面を軽視していたため、非現実的な経済しか仮定することが出来なかったからである。

そこで私は、コンピュータの中に“人間の心理”を取り入れた架空の社会 経済現象、すなわち人工社会や人工経済を作り出し、それを分析することで現実の社会 経済現象を探ろうと考えた。

### 4. 研究結果:

本研究では、最初に金融市場を題材として人工社会 経済アプローチによる市場現象の分析と金融 為替政策に関する意思決定の支援を行うシステムの実装を行った。

#### 人工市場プロジェクトの概要

近年、計算機上に仮想的なディーラーの役割をするコンピュータプログラムを作り、これらのエージェントが自由に取引を行なう仮想市場で実験を行なう人工市場研究が、多くの研究者の注目を集めている。人工市場モデルを考える際に、エージェントのモデルをどのように決定するのかということは、人工市場のパフォーマンスに大きな影響を与える。より本物らしい人工市場を構築するためには、現実の市場参加者が行なっている情報処理プロセスの分析を行ない、そこから得られた知見にもとづき、現実の意思決定法を反映させたエージェントを実装するというアプローチが有効である。そこで我々は、フィールドワークと人工市場モデルの統合による研究プロジェクトを提唱した。

#### 模擬市場によるフィールドワーク

現実の市場参加者の特徴をつかむために、我々は次のような模擬市場実験を行った。10人程度の参加者に、ネットワーク上の模擬市場システム VDS (Virtual Dealing System)を通して、仮想的な為替取引を行ってもらった。実験の参加者は VDS のウィンドウで不定期にニュースを受け取る。そのニュースを解釈し、将来のレート予測して、ブローカー取引またはインターバンク取引により、利得を上げるように意思決定を行う。また、過去のニュースを参照したり現在の自分の資産持高や含み損益を知ることができる。

実験により以下のデータを得ることができる: (1)レートログ、(2)取引ログ、(3)取引時の会話ログ、(4)データ参照時間、(5)予想アンケート。これらのデータを用いて、人工市場でのエージェントの戦略決定や学習に関する構造を決定した。

#### 人工市場モデルの構築

フィールドワークの結果に基づき、外国為替市場のマルチエージェントモデル AGEDASI TOF (A Genetic-algorithmic Double Auction Simulation in TOkyo Foreign exchange market)の構築を行った。本モデルは100個の仮想的なディーラーからなるコンピュータ上の人工的な市場である。

人工市場モデルの一期間は現実の市場の一週間に対応しており、各期間は以下の5つのステップよりなる。

- (1) 知覚: 各エージェントは金利や貿易など様々なレートの予想材料に対して、現在の市場では為替レートを予想するのにどれほど重要視すべきかという市場の状態に対する認識を持つ。
- (2) 予想形成: 各エージェントはさきほどの認識をもとに今期の情報を用いて、将来のレートの予想を行う。
- (3) 戦略決定: 自分なりの予想を基に、市場に通貨取引の注文を行う。
- (4) レート決定: 市場全体の需要と供給が均衡する値にレートが決定される。
- (5) 学習: レート決定の後に、各エージェントは市場の認識を遺伝的アルゴリズムを用いた学習により変更していく。

人工市場によって現実の金融市場に関するデータを、人工市場によって再現することも可能である。また人工市場に参加しているエージェントが出した需要と供給のデータも得られる。そして人工市場の中で、金利や貿易収支などのニュースのうち何がエージェントたちに重要視されているのかも知ることができる。これらの需給曲線や重要度のデータのように、現実の金融市場では入手が難しいデータも、人工市場なら手にいれることができる。

#### 現実のデータを用いたシミュレーション

本稿で紹介した人工市場を使うことによって、これまでに、理論・実証・応用の3種類の研究成果が得られている。

##### (1) 理論: 既存の経済理論の検証

人工市場に経済理論の前提条件を与え、金融価格の動きを調べることによって、理論の検証を直接行うことができる。効率的市場仮説(市場は情報を取り入れるのが極めて迅速でありある者が情報を先駆けすることによって他の者より有利になるという状況は生じないとする説)という既存の経済理論の定量的な検証を行った。効率的市場仮説によると、金融価格の動きはランダムウォークになり、サルの予測も専門家の予測も当たり外れのパフォーマンスは同じになる。相関次元分析と呼ばれる手法で人工市場のシミュレーション結果を分析したところ、エージェントが学習していても、人工市場の相関指数は、効率的市場仮説とは異なりランダムウォークの理論値に近づくことはなかった。

##### (2) 実証: 現実の市場現象の分析

人工市場シミュレーションを行うことにより、既存の市場理論ではうまく説明がつかなかった下記のような市場現象のメカニズムの解明が可能になった。

- (a) 為替レートバブルのメカニズムの解明。

1990,95,98年の為替バブルを25-45%の確率でシミュレートし、これらの時期のバブルは、トレンドへの同調と需給の偏りが原因であることを明らかにした。

(b) 市場の創発的現象のメカニズムの解明。

レートの変動分布の中央が尖って裾が厚くなる現象など、経験的には見つけていたがメカニズムがよく分からなかった市場現象の原因を解明した。

(3) 応用: 現場の支援ツールの構築

人工市場に金利などの政策的に操作できる様々な条件を与え、価格変動の評価を行うことができる。人工市場による為替政策の決定支援システムの構築を行った。人工市場モデルに1998年当時の経済状況を入力し、複数の為替政策のシナリオを評価したところ、景気とドル・マルク相場に関するニュースの直後に(1) 介入による為替安定化(2) 小規模な金利操作による為替安定化の2つのシナリオが有効であることが分かった。

他の社会 経済現象へ

人工市場研究の成果を踏まえて、他の社会 経済現象への人工社会・人工経済アプローチの応用のための基礎調査を行った。その結果、石油市場や電力市場などの金融市場以外の経済市場やマーケティング(購買行動)、そして人の流れがある場所での誘導などに、本アプローチの有効性が高いことが分かった。現在、これらの現象への人工社会・人工経済アプローチを用いた、意思決定支援システムの構築を進めている。

## 5. 自己評価:

本研究の最大の評価ポイントは、個人の行動や情報処理プロセスと社会 経済システム全体の挙動の間にある“失われた環”を解明するために、人工社会・人工経済という全く新しいアプローチを具体的に提唱した点にある。まず本研究では、実際の人間の意思決定過程を観察・分析するための実験・フィールドワーク手法を、金融市場を題材にして、模擬ディーリング実験という手法を構築した。実験に必要なシステムを新たに開発し、意思決定論や認知科学の知見を用いて、測定方法、解析手法を特定した。さらに、本研究では、フィールドワークで得られたデータより、計算機上にマルチエージェントシステムを構築して、計算機シミュレーションにより実際の社会 経済現象の分析を行う一連の手法も新たに構築を行った。本研究で確立した人工社会・人工経済のアプローチは、これから他の社会 経済現象に応用されていくと期待され、この分野の研究の発展において基礎になるとと思われる。

本研究で得られた個別の研究成果に関して、当初の研究計画では意思決定支援システムの構築という応用研究のテーマのみを想定していたが、最終的には、当初の予定に加えて、理論的研究テーマ(効率的市场仮説と呼ばれる経済理論の検証)と実証研究的テーマ(現実の経済現象のメカニズムの解明)という予想以上の成果も得ることができた。これらの具体的な成果も、人工社会・人工経済アプローチの大きな可能性を示すことができたと思っている。

本研究では、主に金融市場を題材とした分析が中心となってしまう、当初予定の投票行動やマーケティングなどの他の社会 経済現象への人工社会・人工経済アプローチの適用は、基礎的な調査と理論的なモデル構築を行い、さきがけ研究の3年間では具体的な意思決定支援システムの構築にまではいたらなかった。しかしながら、さきがけ期間中に終えた理論的

準備を土台にして、複数の企業との共同研究という形で、石油市場や電力市場などの金融市場以外の経済市場やマーケティング（購買行動）、そして人の流れがある場所での誘導などに、本アプローチを適用することを進めている。

今後、人工社会・人工経済の研究がさらに発展すれば、人間は複雑な社会的状況の中でどのように情報を解釈して行動し学習を行っているのかということを知り、これを解明する新しい社会科学そして新しい情報科学として、社会学・経済学と心理学や人工知能とを結ぶ架け橋となると考えている。本研究が、このような壮大な夢のための、第一歩となることを期待している。

#### 6. 研究総括の見解：

フィールドワークとマルチエージェントシミュレーションとの融合による社会・経済現象の分析という今までにないアプローチの理論的・手法的な基礎を構築し、理論的テーマから実証研究そして応用研究までの成果をあげ、将来への可能性を示したことは、高く評価できる。また、人工社会・人工経済という新たなアプローチを幅広く知ってもらい、さらなる発展のために、積極的に外部に対して研究成果の発表も行った。今後、さらに本アプローチが様々な社会・経済現象の解明に適用されていき、この研究分野自体の進展のみならず、将来の経済社会の発展に寄与することが大いに期待できる。

#### 7. 主な論文等：

##### 書籍（単著）

1. 和泉 潔 (2002 年 12 月発刊予定), 『人工市場: 複雑系アプローチによる金融市場の分析』, 森北出版.

##### 書籍（共著）

1. K. Izumi and K. Ueda (2002), "Analysis of Exchange Rate Scenarios Using an Artificial Market Approach", in S.-H. Chen (eds.), "Evolutionary Computation in Economic and Finance", Springer Verlag, pp135-157.
2. 安富 歩・池上 高志 和泉 潔 (2002), 『複雑系という科学』, 吉田 和男編, 『複雑系経済学へのアプローチ』, 東洋経済新報社, pp. 21-48.
3. K. Izumi (2002), An Artificial Market Analysis of Development of Market Complexity, in A. Namatame and T. Terano and K. Kurumatani (eds.), Agent-Based Approaches in Economic and Social Complex Systems, IOS Press, pp. 47-58.
4. K. Izumi (2001), Complexity of Agents and Complexity of Markets, in T. Terano, T. Nishida, A. Namatame, S. Tsumoto, Y. Osawa, and T. Washio (eds.), New Frontiers in Artificial Intelligence, Springer Verlag, pp110-120.
5. K. Izumi and K. Ueda (2000), Learning of Virtual Dealers in an Artificial Market: Comparison with Interview Data, in K.S. Leung, L.-W. Chan., and H. Meng (eds.), Intelligent Data Engineering and Automated Learning, Springer Verlag, pp 511-516.
6. 和泉 潔 植田 一博 (2000), 『金融市場における意図せざる協調現象: 人工市場アプローチによる分析』, 植田一博 岡田猛編, 『協同の知を探る: 創造的コラボレーションの認



知科学』, 共立出版, pp 199-227.

#### 学会誌・ジャーナル

1. K. Izumi, S. Nakamura, and K. Ueda (to appear), Development of an Artificial Market Model Based on a Field Study, Information Sciences.
2. 和泉 潔 (2002), 人工市場の作り方：ヤッコーにならないために, システム/制御/情報 (システム制御情報学会誌) Vol.46, No.9, pp. 547-554.
3. K. Izumi and K. Ueda (2001), Phase Transition in a Foreign Exchange Market: Analysis Based on an Artificial Market Approach, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.5, No. 5, pp 456-470.
4. 中村 茂雄・和泉 潔・植田 一博 (2001), 人工市場と実験市場の出会い: 模擬トレーディング実験による新しいエージェントモデルの提唱, オペレーションズリサーチ, Vol. 46, No. 10, pp 549-554.
5. 出口 弘・和泉 潔・塩沢 吉典・高安 秀樹・寺野 隆雄・佐藤 浩・喜多 一 (2000), 人工市場を研究する社会的および学問的意義, 人工知能学会誌, Vol.15, No. 6, pp 982-989.
6. 和泉 潔・植田 一博 (2000), 人工市場入門, 人工知能学会誌, Vol.15, No.6, pp 941-950.
7. 和泉 潔・植田 一博 (2000), 人工市場アプローチによる為替シナリオの分析, コンピュータソフトウェア Vol.17, No. 5, pp 47-54.

#### 学会論文集 (査読あり)

1. K. Izumi (2002), Micro-macro relation in artificial market models, in A. Namatame, D. Green, Y. Aruka, and H. Sato (eds.), Proceedings of the 6th International Conference on Complex Systems 2002, pp.36-43.
2. K. Izumi (2002), Does Learning by Market Participants Make Financial Markets Complicated?, Multi-Agent Modeling and Simulation of Economic Systems: Papers from the AAI Workshop Technical Report WS-02-10, AAAI Press, pp. 11-15.
3. K. Izumi, S. Nakamura, and K. Ueda (2002), Identification of Agents' Strategy Making Process by an Experimental Market, in H. Caulfield, S.-H. Chen et.al. (eds.), Proceedings of the 6th Joint Conference on Artificial Intelligence, vol. 2, pp 1081-1084.
4. K. Izumi (2001), Analysis of the Relation between Complexity of Agents and Complexity of Markets in an Artificial Market, Proceedings of Fourth International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications (ICCIMA 2001), IEEE Computer Society, pp. 29-33.
5. K. Izumi (2001), Complexity of Agents and Complexity of Markets, in Proceedings of JSAI 2001 International Workshop on Agent-based Approaches in Economic and Social Complex Systems (AESCS 2001), pp. 201-208.
6. K. Izumi and K. Ueda (2000), Phase Transition in a Foreign Exchange Market: Analysis Based on an Artificial Market Approach, in Proceedings of Symposium on Empirical Science of Financial Fluctuations, pp 33-34.

7. K. Izumi and K. Ueda (2000), Analysis of Thought Processes of Virtual Dealers in an Artificial Market, in P.P. Wang (eds.), Proceedings of the Fifth Joint Conference on Artificial Intelligence, vol. 2, pp 891-894.

学会論文集 (査読なし)

1. 和泉 潔 (2002), 人工市場：シミュレーションとフィールドワークの統合を目指して, 日本シミュレーション&ゲーミング学会 2002 年度秋季大会 発表論文集, pp. 148-153, (基調講演).
2. 和泉 潔 (2002), 人工社会 経済ソフトウェアの現状と展望, 2002 年度情報科学技術フォーラム, pp. 63-64.
3. 和泉 潔 内田 勇輔 植田 一博 (2002), 人工市場 模擬市場プロジェクトの紹介, 2002 年度情報科学技術フォーラム, pp. 73-74.
4. 和泉 潔 (2002), 人工市場研究について, 日本応用数理学会 2002 年度年会 プログラム/要旨集, pp. 51.
5. 和泉 潔 (2002), 人工市場と実験市場の出会い, 第 48 回シンポジウム論文集, オペレーションズリサーチ学会, pp. 39-43.
6. K. Izumi (2002), Analysis of the Relation between Complexity of Agents and Complexity of Markets in an Artificial Market, 情報処理学会研究報告 2002-ICS-127, pp63-70.
7. 和泉 潔 (2001), 人工市場におけるエージェントの複雑さと市場の複雑さの関係の分析, 社会組織のマルチエージェントシステム分析, 計測自動制御学会, pp 33-38.
8. 和泉 潔 (2001), 個人の複雑さ市場の複雑さ, 情報処理学会研究報告 2001-ICS-123, pp19-24.
9. 中村 茂雄 和泉 潔 植田 一博 (2001), 為替ディーラーの意思決定の分析, 情報処理学会研究報告 2001-ICS-123, pp37-42.
10. 和泉 潔 植田 一博 (2000), 人工市場入門, 情報処理学会研究報告 2000-ICS-119, pp9-17.
11. 和泉 潔 植田 一博 (2000), 人工市場アプローチによる為替シナリオの分析, 情報処理学会研究報告 2000-ICS-119, Vol.99, pp1-8.

## 研究課題別評価

1. 研究課題名：広域分散環境のためのセキュアなオペレーティングシステム

2. 研究者氏名：河野 健二

3. 研究の狙い：

本研究の目的は、インターネットなどの開放性の高い分散環境においても、高いセキュリティを保証し、安心して利用できる計算機環境を提供することにある。インターネットなどの広域分散環境は、不特定多数のユーザが利用する環境であり、ユーザの匿名性がきわめて高い。従来のオペレーティングシステム (OS) は、あらかじめ登録された利用者のみから利用されることを想定しており、不特定多数のユーザにサービスを提供することは想定していない。そのため、広域分散環境の匿名性を悪用した不正アクセスに対して、従来の OS が提供する保護機構はきわめて無力である。本研究のねらいは、従来の OS が提供してきたプロセス・モデル、保護のモデル、資源の管理方式を見直し、開放的分散環境に適した OS のモデルとその実現方式を確立することにある。開放的分散環境を念頭において、それらの諸概念を基本から設計し直し、新たなモデルに基づいた OS カーネルを提供する。

4. 研究結果：

本研究の成果は、1) 細粒度保護ドメインに基づく新しいプロセス・モデルの実現とその応用による新たな保護機構の実現、2) 資源を濫用する攻撃に対し、耐性を有する資源管理方式を実現した点、3) 高い堅牢性を有するインターネット・サーバの実現手法を提案した点の3点である。

### 4-1 細粒度保護ドメインとその応用

細粒度保護ドメインに基づいた新たなプロセス・モデルを実現し、その機構を応用したさまざまな保護機構の実現を行った。プロセス・モデルは、OS の提供する抽象化の中でもっとも基本的な抽象化のひとつである。本研究では、そのプロセス・モデルを変革することにより、さまざまな保護機構の基盤となる機構を提供することができた。このプロセス・モデルを用いると、プログラムの実行を詳細にかつ効率的に監視できるようになり、従来では実現が困難であったさまざまな保護機構が実現可能となる。そのような保護機構の例として、実行可能コンテンツの監視、柔軟かつ効率的なサンドボックス機構、UNIX における setuid プログラムの堅牢性向上が可能であることなどを示すことができた。

### 4-2 資源濫用攻撃に耐性を有する資源管理方式

資源濫用攻撃と呼ばれる不正攻撃に対し、耐性を有する資源管理方式の実現を行った。資源濫用攻撃とは、意図的に計算資源を濫用し、他のプログラムの応答性を著しく低下させる攻撃である。本研究では、資源濫用攻撃に耐性を有する資源管理方式として、優先度付き横取り可能な資源管理方式の提案を行った。この方式では、あるプロセスが資源を占有しても、ほかのプロセスが占有された資源を横取りすることができ、結果として資源の占有ができない。提案方式を Linux カーネルに実装し、資源濫用攻撃が行われても、プログラムの応答性が低下しないことを実証した。

#### 4-3 堅牢性の高いインターネット・サーバの実現手法

インターネット・サーバの脆弱性は広く知られている。特に、バッファ溢れなどの常套的な攻撃手段の多くは、サーバの実装上の些細な誤りに起因する。本研究では、ドメイン特化言語の手法を用いて、インターネット・サーバの堅牢性を向上させる手法の開発を行った。

#### 5. 自己評価：

細粒度保護ドメインに基づくプロセス・モデルを実現したことや、資源濫用攻撃に耐性を有する資源管理方式を実現したことによって、高いセキュリティ機構をもつオペレーティングシステムを実現するという当初の研究構想はある程度達成できたと考えている。特に、細粒度保護ドメインに基づいたプロセス・モデルはその柔軟性がきわめて高く、当初の予想を超えた応用性をもつことがわかった。さきがけの研究期間中にもいくつかの応用例を示したが、他にも多くの応用例があることが期待できる。今後はこれらの応用例を示し、細粒度保護ドメインに基づいたプロセス・モデルの有効性や有用性を実証していきたい。

資源濫用攻撃に耐性を有する資源管理機構は、十分に満足の良い結果が得られたとは言い難い。さきがけ研究期間中に提案・開発を行った機構は、既存のオペレーティングシステムの提供するプロセス・モデルをベースに資源割り当てモデルの設計や実現を行った。しかし、現実のアプリケーションは、複数のプロセスが互いに密接に連携しながら処理をすすめるため、既存のプロセス・モデルをベースとした資源管理方式では限界があることが判明した。この限界を打ち破るには、新たな資源割り当てモデルの考案、資源管理方式の実現、既存のアプリケーションとの親和性の問題などを解決しなければならず、多くの問題が山積みとなっている。さきがけ研究期間中にこれらの問題を解決できなかったことは残念であるが、新たな研究の鉞脈を発見できたことでよしとしている。

堅牢性の高いインターネット・サーバの実現手法は、安全性の高いオペレーティングシステムの実現手法を考察する中で、副産物として得られた成果である。研究課題名にあるオペレーティングシステムの研究とは若干異なり、プログラミング言語の分野で用いられる手法をプラグマティックに適用した結果である。オペレーティングシステムの分野に、プログラミング言語の分野で発達しつつある手法を取り入れることができたという点で満足している。こうしたハイブリッド的なアプローチは今後ますます重要になってくると期待され、これからの研究手法の中に積極的に取り入れていきたいと考えている。

さきがけの研究期間中は、めぐまれた環境の中で存分に研究を進めることができ、多謝するとともに、これを糧に今後も研究活動を続けていきたい。

#### 6. 研究総括の見解：

インターネットにおけるセキュリティ上の問題に対し、コンピュータを支える基盤であるオペレーティングシステムからのアプローチを行い、プロセス・モデルなどの基本的な概念の見直しからはじめ、コンピュータ科学の基幹的分野において重要な成果をあげたことは評価できる。また、今後の目標もすっかり定めており、将来の研究推進が大いに期待できる。

7. 主な論文等：

K. Kono, T. Masuda: Efficient RMI: Dynamic specialization of object serialization, In Proceedings of IEEE 20<sup>th</sup> Int'l Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS), 308-315 (2000).

河野 健二 ,益田 隆司：オブジェクト整列化の動的特化による効率的なRMIの実現 ,情報処理学会論文誌 41 巻 10 号 ,2916-2925 (2000 年) .

品川 高廣 ,河野 健二 ,益田 隆司：実行可能コンテンツの安全な実行環境 ,情報処理学会論文誌 43 巻 6 号 ,1677-1689, (2002 年) .

T. Shinagawa, K. Kono, T. Masuda: Flexible and Efficient Sandboxing Based on Fine-Grained Protection Domains, In Proceedings of Int'l Symp. on Software Security, 2002. Post proceedings will be published in Hot-Topic Series of the Springer LNCS.

W. Kaneko, K. Kono, T. Masuda: Preemptive Resource Management: Defending against Resource Monopolizing DoS, In Proceedings of Int'l Conf. on Parallel and Distributed Computing and Networks, 2003. To appear.

河野 健二: アプリケーション層プロトコルの実現を容易にするフレームワーク ,情報処理学会プログラミング研究会論文誌 (掲載予定) .

## 研究課題別研究評価

### 1. 研究課題名 :自律的通信パケットによる動的ネットワーク

### 2. 研究者名 :佐藤一郎

### 3. 研究の狙い

本研究の目的は、通信処理方法を動的に変更可能なネットワークアーキテクチャ及びその通信プロトコルを開発することである。通信ネットワークの発展・普及にともない、ネットワークサービスの多様化・高度化が要求されるが、その通信処理を規定する通信プロトコルは固定化され、それが通信処理の発展の障害になっている。これを解決する方法として、ルータなどの通信ノードの処理を規定する通信プロトコルを動的に変更すると同時に、通信対象である通信パケットに経路制御プロトコルを埋め込むことにより、パケット単位でもプロトコル変更可能な枠組みを提案するとともに、モバイルエージェントを利用しながら実際のネットワーク上にこの枠組みを構築し、その有効性を評価していく。

### 4. 研究結果

モバイルエージェントに代表される移動プログラム技術を利用して、動的変更可能性をもつ通信アーキテクチャを提案した。本研究構想のポイントは、現代計算機の基本アーキテクチャであるフォンノイマン型計算機のモデルを通信ネットワークに導入することにある。フォンノイマン型計算機は計算対象（データ）と計算処理（コード）を区別しないために、計算処理をデータとして書き換えできるという特徴を持つが、この研究では通信処理に相当するプロトコルとその対象となるパケットを統一的に扱える新しい通信アーキテクチャを提案することにある。そして、さきがけ研究の3年間において、次の手順で実現を図った。

自律的通信パケット:モバイルエージェント技術を利用することにより、プログラム埋め込み可能な通信パケットを設計した。これは静的な経路制御だけでなく、そのデータ部分もアクセスできることから、データ側コンテンツに応じた経路制御やデータ部分の暗号化処理も可能となる。

通信プロトコルの記述言語:通信パケットという限られた空間にプログラムを埋め込むため、そのパケット自身の経路制御に特化した言語をプロセス代数をもとに設計し、その言語によるプログラムを実行するインタープリタを開発した。

通信パケットの転送機構:モバイルエージェントの実行システムを利用するものとなるが、ここでは再送信やパケット合成などの基本機構を導入することにより、パケット転送に特化した拡張を行った。

自律的通信パケットによる通信プロトコル:当初予定していた隣接ノード間通信、ストリーム通信、マルチキャスト通信などの基本通信に加えて、ネットワーク管理用プロトコルやグループウェア用プロトコルなども設計・実装した。

### 5. 自己評価

アクティブネットワークなどの名称で通信プロトコルの動的変更を扱う研究はいくつかあるが、この研究ではプロトコルとパケットを統一的に扱う枠組みを提案したことにより、従来のアクティブネ

ネットワークと比較して変更可能性が極めて広いものとなった。ただし、プロトコルとパケットの混在は自由度があがる一方で、複雑さの原因となりうる。そこで、パケットに階層構造を導入することにより、パケットがプロトコルとして他のパケットを転送・搬送できるのは内包するパケットに限定する方法を提案した。これにより既存のアクティブネットワーク研究では困難とされてきたプロトコル階層と拡張性の両立に成功し、既存のデータ通信向けの階層プロトコルも容易に再現できるようになるなど当初予定を超えた成果を上げる起点となった。

なお、階層機構の導入は各プロトコルの機能を明確に分離可能にするとともにプロトコル記述言語の設計においても有益であった。研究当初は多様な通信プロトコルの記述ができる汎用的な言語を想定していたため、記述性とプログラムサイズのトレードオフとなっていたが、この階層化により各プロトコルの機能が細分化され、言語の記述対象も絞り込むことができるようになった。当初計画では言語プログラム実行のコストを考慮してバイトコードにコンパイルしてから実行する予定であったが、言語プリミティブの最小化によりインタープリタ方式とコンパイル方式の性能差が少ないことが判明したことから、インタープリタ方式に特化して研究をすすめた。

一方、研究当初から懸案であった通信性能に関しては、さきがけ研究の3年間では大きな改善を図ることができなかった。このため、応用範囲としてネットワーク管理やグループウェアなどの性能よりも機能が優先される通信プロトコルを取り上げ、性能的制約を最小化することとした。ただし、今後の応用を考えると性能向上は必須であり、今後、さきがけ研究で得た成果を踏まえて改善をはかりたいと考えている。

本研究における通信処理と通信対象の統一化は、計算機の基盤アーキテクチャであるフォンノイマン型計算機及びその理論モデルであるチューリングマシンのデータとコードの混在化と対応するものとなる。今後の理論的解析を待たなければならないが、フォンノイマン型計算機と同等な自己変更能力をもつ新しい通信システムとなっていると予想される。さきがけ研究の3年間では、本研究の基幹部分において大きく前進することができた。多謝するとともに、実用化に向けて今後も研究を進めていきたいと思う次第である。

## 6. 研究総括の見解

通信ネットワークのプロトコル動的変更は今後のネットワーク発展において必須な技術である。既存技術ではアドホックな手法にとどまっていたが、計算機科学における基盤概念との融合をはかることにより、理論的限界を明らかにするとともに記述性と柔軟性を両立したシステムを実現したことは大きな成果であり、高く評価できる。また、外部に対する成果の発表にも積極的であった。今後の発展・実用化も期待されており、将来の研究推進が大きく期待できる。

## 7. 主な論文等

### 論文]

Ichiro Satoh, "MobileSpaces: A Framework for Building Adaptive Distributed Applications using a Hierarchical Mobile Agent System", Proceedings of IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'2000), pp.161-168, IEEE Computer Society, April, (2000).

Ichiro Satoh, "MobiDoc: A Framework for Building Mobile Compound Documents from

Hierarchical Mobile Agents", Proceedings of International Symposium on Agent Systems and Applications/International Symposium on Mobile Agents (ASA/MA2000), pp.113-125, Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Vol. 1882, Springer, September, (2000).

Ichiro Satoh, "Flying Emulator: Rapid Building and Testing of Networked Applications for Mobile Computers", Proceedings of 5th International Conference on Mobile Agents (MA'2001), Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Vol. 2240, pp.103-118, Springer, December, (2001).

Ichiro Satoh, "MobiDoc: A Mobile Agent-based Framework for Compound Documents", Informatica (International Journal of Computing and Informatics), Vol.25, No. 4, pp.493-500, (2001).

Ichiro Satoh, "Physical Mobility and Logical Mobility in Ubiquitous Computing Environments", Proceedings of 6th International Conference on Mobile Agents (MA'2002), LNCS, Vol. 2535, pp.186-202, Springer, October, (2002).

Ichiro Satoh, "Reusable Mobile Agents for Managing Networks", Journal of Information Processing Society of Japan, Vol.43, No.11, (2002).

Ichiro Satoh, " Flying Emulator: 携帯端末用ソフトウェアの開発試験環境 ", Journal of Information Processing Society of Japan, Vol.43, No.12, pp.3765-3774, (2002).

Ichiro Satoh, "Network Protocols for Mobile Agents by Mobile Agents", to appear in Journal of Information Processing Society of Japan, Vol.44, No.3, pp. 3448-3457, (2002).

Ichiro Satoh, "Configurable Network Processing for Mobile Agents on the Internet", to appear in Cluster Computing (The Journal of Networks, Software Tools and Applications), Vol. 6, Kluwer, (2003).

#### 【特許】

特許(申請中) 佐藤一郎(発明者) 『モバイル・エミュレータシステム』特 2001-365830(平成 13 年 11 月 30 日)



## 研究課題別評価

1. 研究課題名 :ヒトの発達過程における身体性とモジュール性

2. 研究者氏名 :多賀蔵太郎

3. 研究の狙い :

ヒトの様々な認知や行動は、大脳の局在した領域の活動、すなわち機能的モジュールによって営まれていると考えられている。しかし、モジュールの統合に関するバインディング問題や、モジュール自体の生成過程はわかっていない。一方、脳も身体も環境も、それぞれ固有のダイナミクスに従って変化する動的システムとして捉えられる。本研究では、ヒトというシステムが有するダイナミックな「身体性」と脳の「モジュール性」とが、乳児期の認知や行動の発達過程で果たす役割の解明を目的とする。そのために、生後数カ月間に起こる知覚や行動の動的な変化、特に、バインディング問題に関わる知覚を行動学実験により明らかにする。また、その過程での脳の発達を新しい非侵襲脳機能計測技術、光トポグラフィーを導入して可視化する。特に、大脳皮質における発達過程でのモジュールの分化と統合過程を明らかにする。

4. 研究結果 :

(1) 乳児の視覚のパフォーマンスに関するU字型変化の発見

乳児の視覚系における色と形の組み合わせの知覚の発達過程を調べた。視覚刺激への注視時間を測定し、馴化脱馴化法を用いた実験を行ったところ、1ヶ月児は2個の同時に提示された図形の色と形の組み合わせを識別できるが、2ヶ月児で識別の成績が低下し、3ヶ月児で再び良い識別を示すようになるというU字型の発達変化が明らかになった。また、3ヶ月児には2個の物の間を繰り返しサッカドするという1ヶ月児には見られない眼球運動パターンがあること、成績の悪い2ヶ月児には特定の刺激への非常に長い時間にわたる強制注視が見られることもわかった。このようなパフォーマンスのU字型変化とそれに伴う眼球運動パターンの変化から、新生児において色と形のモジュールは未分化であるが故に統合されていて、組み合わせの違いをも識別できる可能性が考えられた。そして、脳のモジュールによる分析的な知覚の発達にともなってバインディング問題が生じて識別が困難になるが、選択的に注意を移動する機構の発達によってバインディング問題を解決するというシナリオが考えられた。

(2) 光トポグラフィー (近赤外分光法) を用いた乳児の脳機能計測の成功

近年、fMRI 等による脳機能計測の研究が進み、成人の脳の働きについて多くの知見がもたらされてきた。しかし、そういった手法では計測時に頭部を厳密に固定することが必要であるため、覚醒した乳児への適用は困難であった。一方、光トポグラフィーは、頭皮上から近赤外線を照射・検出するという原理で脳機能画像を得る手法で、頭部の強い拘束を必要としないために乳児等の脳機能計測に有効であると考えられた。そこで、この方法を乳児の研究に初めて導入し、その有効性を示した。その過程で次のような課題を行った。

(a) 成人における事象関連測定法の確立

先行研究では、刺激20秒、休止20秒の繰り返しなどのブロックデザインが刺激パラダイムとし

て使われてきたが、より自然な短い事象に関連した応答を光トポグラフィーで計測できることを確かめた。例えば、1秒以下の視覚刺激の変化に対する応答が得られることが明らかになった。また、得られた信号から変化に関する統計値を利用して脳の活動部位を空間的にマッピングする手法の検討を行った。

#### (b) 成人における様々な視覚、聴覚刺激に対する応答の検討

脳のモジュール的な機構を明らかにすることを目的として、チェッカーボード 同心円状の運動刺激、バイオロジカルモーション、ランダムドットステレオグラム、聴覚刺激、など様々な刺激を与えた時の応答を調べた。その結果、視覚野、MT 野、側頭連合野、聴覚連合野などが、それぞれの刺激に対応した特徴のある応答を示すことが明らかになった。

#### (c) 睡眠時の乳児の自発的变化とそのパターンの月齢変化の発見

光トポグラフィーの乳児研究への第一歩として、睡眠時の脳の状態を計測した。15秒程度の周期の自発的な揺らぎがあること、その時間的・空間的特徴が新生児から1ヶ月、2ヶ月と変化していくことが明らかになった。

#### (d) 覚醒時の乳児の視覚反応の機能的脳イメージング

覚醒して視覚刺激を見ている乳児の脳活動のイメージングを光トポグラフィーで計測するのに成功した。特に、生後2? 4ヶ月の乳児の後頭葉の視覚野が成人と同じように視覚刺激の輝度の変化に対して反応し、それにとまなう脳血流と脳代謝を反映した脳血液の酸素化状態の変化が生じることが示した。

#### (e) 覚醒時の乳児の聴覚反応の機能的脳イメージング

覚醒して聴覚刺激を聴いている乳児の脳活動のイメージングにも成功した。成人では聴覚野や言語野があると考えられている左右の側頭葉の計測を行った。女性の日本語の音声を刺激として与えた時には、生後2? 7ヶ月の乳児で特に右半球が強く活動することが明らかになった。

### 5. 自己評価：

乳児の行動発達の研究を行い、視覚認識や眼球運動に関して生後2~ 3ヶ月頃のダイナミックな変化、特に、パフォーマンスのU字型変化を明らかにすることができた。このことは、この時期に大脳皮質が果たす機能が質的に変化していることを示唆するものであり、さらなる脳機能イメージング研究を行うための指針が明確になった。

本研究の成否を決める問題として、乳児が自然な状態でものを見たり聞いたりしているときの脳活動を光トポグラフィーで計測することに重点的に力を注いだ。その結果、覚醒時の乳児の脳機能イメージングに成功した。計画段階では乳児の脳機能イメージングの先行研究は世界的にみてもほとんど皆無であり、私自身にとっても脳機能計測は全くゼロからのスタートであった。成人での計測、乳児の睡眠中の計測、覚醒した乳児の注意を持続させるための刺激の工夫など多くの予備的な実験を積み重ねる必要があった。そして、この3年間に、現在のように乳児の脳活動が可視化できるようになった。この成果は、この分野における大きな一歩といえるのではないかと考えられる。

ただ、現在でも、乳児が頭を振ったりするような状況での計測は難しく、実験パラダイムにも様々な制限がある。そのため、今後計測手法に関しても様々な改良が必要である。研究計画当初の大目標として掲げたモジュールの分化や統合機構に関して、3年間で決着をつけるには至らなかったが、本研究の成果は、その問題解決への重要な足掛かりを確立したものであるといえよう。

#### 6. 研究総括の見解：

乳児の認知や行動と脳の発達過程を明らかにすることは、脳科学や発達心理学だけでなく、認知科学や計算機科学へも将来影響を及ぼすと考えられる重要なテーマである。多賀氏は、脳活動計測法として安全で非侵襲的な手法である光トポグラフィーを、発達中の乳児に適用するという大変チャレンジングな課題に挑戦し、3年間に独創的な成果を得たことは高く評価できる。さきがけ研究の成果を土台として、将来の研究の進展が大いに期待される。

#### 7. 主な論文等：

##### 論文]

G.Tagu, T.Ikejiri, T.Tachibana, S.Shimojo, A.Soeda, K.Takeuchi, Y.Konishi: Visual feature binding in early infancy. *Perception*, 31, 273-286, 2002

G. Tagu, K. Asakawa, A. Maki, Y. Konishi, H. Koizumi: Functional imaging of visual cortex of awake infants using optical topography, *International Conference on Infant Studies*, Toronto, Canada, 2002

G. Tagu, Y. Konishi, A. Maki, T. Tachibana, M. Fujiwara and H. Koizumi: Spontaneous oscillation of oxy- and deoxy- hemoglobin changes with a phase difference throughout the occipital cortex of newborn infants observed using non-invasive optical topography, *Neuroscience Letter*, 282, 101-104, 2000

多賀徹太郎 眼球運動と知覚の初期発達, *児童心理学の進歩*, 41: 243-261, 2002

多賀徹太郎 脳と身体の動的デザイン 運動 知覚の非線形力学と発達, 金子書房, 2002

##### 受賞]

中山科学振興財団 中山賞奨励賞 (2002年9月)

## 研究課題別評価

1. 研究課題名：プログラムの性能を理論的に考慮したコンパイラの検証と構築

2. 研究者氏名：南出 靖彦

3. 研究の狙い：

プログラムが期待したように動作することを保証するためには、ソース・プログラムからわかるプログラムの実行時間、メモリーの使用状況などプログラムの性能に関連した様々な性質が、実行コードでも成り立つ必要がある。そこで、本研究では、プログラムの性能を理論的に扱い、性能を考慮した上で期待したように動作する実行コードを生成するコンパイラを構築できるようにする。そのために、まず、プログラムの性能を理論的に議論するためのプログラミング言語の意味論を確立する。その上で、コンパイラで用いられる様々なプログラム変換が、性能に関して期待される性質を満たしていることを厳密に証明していく。

また、コンパイラの性質の証明を厳密に行う場合には、その証明は非常に複雑かつ冗長なものになり、今度は、その証明自体の正しさを確認することが非常に困難になると思われる。そこで、本研究では、プログラム変換の正当性をより確実に示すために、証明をコンピュータのプログラムとして実現されている定理証明システムで行い、証明の検証を行うことも目指す。

4. 研究結果：

コンパイラの性能に関する正当性を議論するためのプログラムの意味論を構築し、正当性の基準を示した。その意味論の上で幾つかのプログラム変換について実行時間や必要な記憶領域について正当性を証明し、正当性の証明法を明らかにした。さらに、プログラムの性能に関する性質を型情報として推論し、その情報に基づきプログラムをコンパイルする手法を提案した。また、プログラム変換の正当性の証明を定理証明システムで行う場合の幾つかの問題点を明らかにし、その解決策を示した。以下にそれぞれの研究の成果を述べる。

1) プログラムの意味論と正当性の基準

実行時間、スタック空間、ヒープ空間をモデル化した操作的意味論を与えるとともに、コンパイラの正当性の基準として幾つかの性質を定義した。実行時間、スタック空間に関する意味論は、既存の意味論の拡張として得ることができたが、スタック空間に関してはコンパイラによる実行、インタプリタによる実行のどちらをモデル化するかで、2種類の意味論が得られた。この2種類の意味論については、スタックの大きさがプログラムの大きさで関係づけられることを示した。ヒープ空間に関しても、幾つかの意味論を与えたが、まだ、どの意味論が正当性の証明に適しているか十分に議論できていない。

また、コンパイラが満たすべき性能に関する正当性の基準として、性能を定数倍の範囲で保存する、計算量を保存する、など幾つかのレベルの性質を定義した。これらの基準の中で、どの基準が適当であるかは、プログラミング言語や議論する性能の種類(実行時間や記憶領域)などに依存することを示した。

## 2) 正当性の証明法

プログラム変換の正当性の証明法及びプログラミング言語の型システムの正当性の証明法が、プログラム変換の性能に関する正当性の証明法に拡張できることを示した。型付のプログラミング言語のプログラム変換の正当性の証明で用いられる論理関係 (logical relation) を拡張し、実行時間、スタック空間に関する正当性を証明した。ヒープ空間に関しては、より詳細な議論が必要になり論理関係を用いることはできなかった。しかし、参照型を持つプログラミング言語の型システムの正当性の証明法に基づき、ヒープ領域に関する正当性の見通しのよい証明を与えることができた。

## 3) 型情報に基づくコンパイル法

最悪の場合の性能を保証するようにコンパイラを作ると高性能な実行プログラムを生成することが困難になる。この問題の一つの解決策として、プログラムの性能に関する情報をプログラムの型として推論し、その情報に基づきプログラムをコンパイルする方法を提案した。この方法に関数型プログラミング言語 ML から Java のバイトコードへのコンパイラに実装し、末尾呼び出しを効率的に、かつ性能に関して正当に実現できることを示した。

## 4) 定理証明システムによる検証

関数型プログラミング言語のコンパイラで用いられる CPS 変換と呼ばれるプログラム変換の検証を Isabelle/HOL と呼ばれる定理証明システムで行った。この検証で、変換によって導入される変数の扱いとプログラムのアルファ同値の扱いが問題になることがわかった。これらについて定理証明システムによる検証に適した形式化を見つけ、検証を行った。この形式化によって、CPS 変換の正当性の検証では、多くの補題の証明を自動化することができた。

## 5. 自己評価：

性能を理論的に考慮したコンパイラの検証と構築に関して、様々な面で研究を進めることができた。コンパイラで用いられるプログラム変換の性能に関する正当性の証明法に関しては、いくつかのプログラム変換の正当性の証明を行い、どのように正当性を証明するか明らかにできたと考えている。特に、ヒープ空間に関する正当性の証明は、これまで、非常に複雑になり困難であると考えられていたが、本研究で十分に可能であることを示せたことは大きな成果であったと考えている。しかし、本研究で用いた証明法を容易に他のプログラム変換に応用するためには、さらに証明法の体系化が必要であると考えている。

研究構想では、Java などオブジェクト指向言語のコンパイラに研究成果を応用していくことを目指していた。しかし、さきがけ研究の中では、関数型プログラミング言語のコンパイラで用いられるプログラム変換の検証のみしか行うことができなかった。しかし、本研究の成果は Java などの高度なコンパイル技術が必要となる言語のコンパイラへ直ちに应用できるものであると考えている。

定理証明システムに関する研究では、コンパイラで用いられるプログラム変換の検証が比較的容易にできることを示せた。このことから、コンパイラ全体を定理証明システムで検証することも可能であると考えており、今後、そのような方向で研究を進めれば、完全に検証されたコンパイラが構築できるようになると考えている。

6. 研究総括の見解：

性能について正しいコンパイラを構築する上で重要となる基礎理論について研究成果をあげており、高く評価できる。ソフトウェアの信頼性の向上は、ますます、重要になってくる課題であり、本研究はコンパイラの信頼性向上からこの課題に大きく貢献するものである。正しさが検証されたコンパイラを構築する道筋ができつつあり、今後の研究の推進に期待できる。

7. 主な論文等：

1. 大熊浩示, 南出靖彦, 定理証明システムを用いた CPS 変換の正当性の検証, ソフトウェア科学会第 17 回大会, 2000.
2. Yasuhiko Minamide, A New Criterion for Safe Program Transformations, In Proceedings of the Forth International Workshop on Higher Order Operational Techniques in Semantics (HOOTS), ENTCS 41, 2000.
3. Yasuhiko Minamide, Runtime Behavior of Conversion Interpretation of Subtyping, In Proceedings of the 13th International Workshop on the Implementation of Functional Languages, LNCS 2312, pages 155-167, 2001.
4. Yasuhiko Minamide, Selective Tail Call Elimination, In Proceedings of the 14th International Workshop on Implementation of Functional Languages, 2002.