

解説



リアルワールドコンピューティング研究計画

2. 理論基盤の研究†

大津展之†† 麻生英樹†††

梗概

本稿では「リアルワールドコンピューティング (RWC) 研究計画」における理論基盤の研究について解説する。背景としての関連理論研究の現状と動向、RWC 研究計画における理論基盤研究の目標と役割、枠組みと取り組むべき研究課題の概要を示す。

1. はじめに

リアルワールドコンピューティング (RWC) 研究計画における理論基盤研究の目標は、柔軟な情報処理の基礎の構築である。現在の分極化した記号処理（完全情報の論理的・手続き的な処理）とパターン処理（不完全情報の総合的・直観的な処理）とのギャップを埋め、両者を統合するための理論基盤を確立し、超並列超分散的な処理システムの研究と応用のための新機能研究とを媒介することである。

そのためには、図-1 に示すように、入力情報の出力情報への変換をアルゴリズム（プログラム）として陽に与える従来の線的な情報処理の枠組みを拡張し、情報処理の基本要素である情報の表現、処理、評価、そして最適化のそれぞれを、現在よりもっと柔軟で豊かなものに拡張する必要がある。それにより、情報のパターン表現と記号表現の両者を統合的に扱えるような情報処理の一般的な枠組みを与えると同時に、そうした処理を、学習・自己組織化といったより積極的な形で適応的に実現することが必要である。

ここで、パターン表現とは、非常に多数の多値

量が空間的・時間的に分散し、全体としてまとまった意味をもつような表現であり、主にパターン間の「近さ」などに基づく位相的な処理を受けるものである。一方、記号表現とは、少数の値（コード）によって集約的に表現され、主に組合せ的・論理的な処理を受けるものである。

このような理論基盤に関連する研究としては、これまでパターン認識、多変量データ解析、確率・統計的推論、ファジィ論理、ニューラルネットワークによる計算・学習・自己組織化、人工知能、そして正則化や最適化などがあり、どちらかといえば個別的に研究が進められてきた。本研究計画では、これらの研究をさらに深く推し進めると同時に、これらの分野に潜在する共通な論理基盤として「柔軟な論理」の理論的枠組みを明らかにし、RWC の理論基盤として体系化していくことが重要課題である。

以下では、まず、研究の背景として、理論基盤に関連するこれまでの研究のいくつかについて現状と問題点をごく簡単に概観し、次に、理論基盤研究の枠組みと具体的な課題について述べることによって研究の全体像を示す。

2. 理論基盤研究の背景

2.1 パターン認識の再認識

人間のもつ柔軟な知的情報処理の基礎をなす

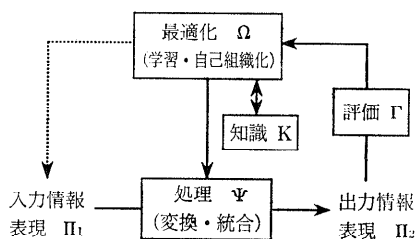


図-1 情報処理の一般的枠組みと RWC における拡張

† Research of Theoretical Foundation by Nobuyuki OTSU (Electrotechnical Laboratory, Machine Understanding Division) and Hideki ASOH (Electrotechnical Laboratory, Information Science Division).

†† 電子技術総合研究所 知能情報部

††† 電子技術総合研究所 情報科学部

「認識」, 「推論」, 「学習」の問題を再検討するにあたって, 「パターン認識の再認識」が重要である。パターン認識は, 情報処理の入口として重要であるばかりでなく, 連続的分散の情報表現 (パターン) と離散的局所の情報表現 (概念, 記号) との接点にあって, 本来, 並列的な総合判断を特色とする。またパターン情報が必然的にも曖昧さや不完全さを扱わねばならない。その意味では, 「柔らかな情報処理」の基本的な課題を含んでいる。

またそこには論理の基本的な側面も含まれている。まず, 事例 (データ, 経験) から個々のパターンの特徴と概念との確率統計的な対応関係を学習することは, 一種の帰納的推論と考えられるし, 未知パターンに対し, その特徴と知識から概念を推定する識別の過程は, 演繹的推論と考えることができる。

パターン認識の理論の研究は, これまで主に低次の認識・学習といった直観的情報処理の機械化の問題を扱ってきた。その初期においては, 統計的決定理論を誤り最小識別 (ベイズ識別) の問題に適用することにより, さまざまな成果を産んだが, そこにおいて, そうした過程を一種の論理と考えるという意識は少なかった。最近では, 認識の能力を高めるために, より高次の記号的知識を利用する方向の研究もあり, 実際の立場からパターン処理と記号処理の統合の可能性が探られているが, そうした試みを基礎づける理論基盤はまだまだ整備されていないといえよう。

2.2 統計的推測と多変量データ解析の理論

曖昧で不確かな情報を扱う手段としては, 古くから統計的な推測の理論がある。そこでは, 確率論の枠組みの上で, 多数のサンプルデータから対象の確率的な構造を推定する問題が扱われてきた。それは, 一種の帰納的な推論, あるいは学習過程であるとも考えられる。

この分野での現在までの成果の多くは, 理論的に取り扱うことが容易な種類の確率分布 (たとえば, 正規分布) を前提としたパラメトリックな推定方式に関するものであったが, 最近では, コンピュータの計算能力の発達にも支えられて, 従来よりも広い範囲の確率的構造を扱うための拡張が試みられ始めている。

一方, 多変量データ解析とは, 対象に対して観

測された多数の特性値データを, 相互関係 (相関) を考慮に入れて同時に統合的に取り扱い, データのもつ情報を効率よく要約し, われわれの的確な評価や直観的総合的な判断に有用な形にまとめる手法である。これまでは, 主に曖昧な対象を扱う人文・社会科学において, データを人間にとって理解しやすく要約する技術として発達してきたが, 今後, 柔軟な知的情報処理システムの中に積極的な形で組み込んで工学的な応用を図っていくことが重要であろう。

2.3 ニューロコンピューティング

近年何度目かの復活をみせたニューロコンピューティングの研究は, 脳の情報処理様式をヒントとする並列分散学習型の情報処理の原理的な可能性の追求, そして人間に近い柔軟な情報処理の可能性の追求の一つの方向として重要である。ニューロコンピューティングは, 制約充足的な情報処理の考え方や, 数値的最適化を用いた学習機能など, 柔らかな情報処理の多くの可能性を含んでいるが, 現在用いられている神経回路網のモデルはきわめて単純なものである。また, 学習効率も悪いため, 比較的小規模な問題を扱っている。今後, 記号処理との融合やモジュール化を含めて, より複雑な処理への対応を探ることが重要であろう。

2.4 制約充足パラダイム

いわゆる「制約充足パラダイム」は, 情報や知識を変数間の制約とみなし, 情報処理における問題解決を, 与えられた制約をできるだけよく満たす解を求める問題として捉えるものである。

実世界の多くの問題では, 制約条件が完全に与えられることは少なく, 部分的に与えられるのみであることが多い (情報の部分性・不完全性)。したがって論理的には, 解が一意には決まらないことがしばしば起こる (不良設定問題)。しかし, 制約充足パラダイムによれば, 他のなんらかの評価規準を主観的な制約条件として付け加えることによって, このような場合にも「それなりの妥当な解」を求めるということを自然に考えることができる (条件付き最適化としての正則化理論)。また, 問題の解決の手段である処理の進め方と問題の記述である制約の表現とが分離されるため, 不十分な情報だけに基づいてもある程度の処理を進めることができる。さらに, 超並列超分散処理

のための比較的汎用性の高い問題解決手法としても重要である。

2.5 人工知能・知識処理

従来の人工知能や知識処理の研究は、主に言語によって集約的に表現された知識を、記号処理の手法によって扱うという基盤の上に発展してきた。その結果として、高次の知的推論（とりわけ演繹推論）の機械化に関しては一定の成功をみたが、今後はさらに、記号に集約される以前の、生データに近いパターンの情報処理や、帰納推論との連携をとっていくことが期待される。

3. 理論基盤研究の枠組みと課題

ここでは、理論基礎の研究課題を次のようにおおまかに分類し、それぞれの具体的な課題について述べる。

- 多種多様な情報の柔軟な表現
- 情報や処理モデルの評価
- 柔軟な記憶と想起
- 情報および処理モジュールの統合
- 学習および自己組織化
- 最適化手法

3.1 情報の柔軟な表現

画像・音声など実世界の多種多様なパターン情報から言語など高次の記号情報までの広汎な情報を統一的に扱い、散層的 (heterarchical) で柔軟な情報処理システムを構築するためには、まず情報表現の柔軟な枠組みを確立することが重要な課題となる。この枠組みではまた、情報の確からしさをも扱うことができる必要がある。さらに、多種多様な情報を表現できるだけでなく、それを用いて連想記憶や学習・自己組織化といった手続きを効率よく実現できるようにしなければならない。

重要な研究課題としては以下のようなものが考えられる。

- 多次元データ表に基づく情報表現
- 分散的かつ疎な情報表現
- 個別の処理ごとの適切な情報表現
- 確率的オートマトン、隠れマルコフモデル、ランダムマルコフ場、確率的決定リストなどを用いた知識表現

- 制約としての情報や知識の表現

3.2 情報および処理モデルの評価

実世界との能動的な相互作用や学習・自己組織

化機能を実現するためには、RWC システムは、多様な入力情報、また処理の結果としての出力情報を、その価値を含めて評価するための体系だった枠組み（基準）を自らの中にもつ必要がある。これまでの真／偽中心の固い評価から、情報量基準やエネルギーといった、最適化の目的関数としての量的な柔らかな評価への拡張、そして正則化などの情報統合プロセスや処理モデルをも対象に含めたメタな評価基準も合わせて必要である。

重要な研究課題としては以下のようなものが考えられる。

- 学習や自己組織化のための入／出力情報の評価
- 実環境との能動的な相互作用のための入力情報の評価
- 適切な情報統合のための正則化条件の評価
- 処理モジュールの協調と統合のための評価
- システムの信頼性と柔軟性の評価

3.3 柔軟な記憶と想起

人間の記憶の高度に洗練された機能は、人間の柔軟な情報処理を実現する上での一つの鍵となっている。RWC システムは、柔軟な記憶機能と、連想的にさまざまな知識を取り出す機能をもつべきである。したがって、連想記憶の理論的解析と、柔軟な連想記憶のための新しい効率的なメカニズムの開発が必要になってくる。

重要な研究課題としては以下のようなものが考えられる。

- 確率的な推論による連想プロセス
- 構造的な類似性を用いた連想
- 時系列の連想記憶
- 非線形のダイナミクスを用いた動的な連想記憶

3.4 情報の統合および処理モジュールの統合

推論・予測・計画のような情報処理は、いろいろな情報・制約・知識の統合プロセスであると考えられる。このような情報統合プロセスを解析する理論的研究とともに、そのプロセスを制御する柔軟な方法を開発していくことも重要となるだろう。

多変量データ解析手法は情報統合手法の一つの候補である。しかしながら従来の手法の多くは、線形代数で陽に解けるという解析の容易さのため、線形統合（変換）に限定されたものであっ

た。その限界を打破し能力を拡大するため、また手法の本質を明らかにするためには、それらを非線形に拡張することが重要である。ニューラルネットワークモデルは非線形への拡張の一つの方向を与える。また、正則化理論も、さまざまな種類の情報を統合するための一つの理論的基礎を与えるであろう。

多数の処理モジュールによる協調的な処理も重要な問題である。これもまた統合化の問題と考えることができる。こうした情報の統合については、従来それほど多くの研究が行われていないため、人間の認知過程における高次な情報の統合機能の研究も重要であろう。

重要な研究課題としては、以下のようなものが考えられる。

- 多変量データ解析やその非線形的拡張であるニューラルネットワークモデルを用いた情報の統合
- 正則化理論にもとづく多様な制約情報の統合
- 情報統合を制御するためのダイナミクスを含んだ制約論理システム
- 人間の認知過程における情報統合の研究

3.5 学習と自己組織化

RWC の理論基盤のうち、情報統合の研究とならんで最も重要なものの一つが学習と自己組織化の理論である。変化する実世界環境に自ら適応する自律的なシステムや、複雑で散層的なシステムを構築するためには、これら学習機能と自己組織化機能が重要な役割を担うはずである。記憶や情報ベースの自己組織化機能も重要である。このような見地から、いろいろな概念や構造を学習する機構を探求するために、学習・自己組織化の計算理論を確立し、新しい効率的なアルゴリズムを開発することが研究目標となる。

重要な研究課題としては次のようなものが考えられる。

- 確率的な知識を学習するアルゴリズム
- 散層的なシステム構造を獲得するための学習・自己組織化のアルゴリズム
- 変化する環境の下での適応・学習のアルゴリズム
- 不確かな情報にもとづく学習アルゴリズム
- 質問による能動的な情報獲得を用いた学習

アルゴリズム

- 既存知識と学習プロセスを統合する方法
- 学習のためのモデルの選択

3.6 最適化の方法

情報統合化のプロセスは、本質的には最適化のプロセスとして定式化することができる。また、学習や自己組織化も処理方式の最適化プロセスと考えることができる。このような最適化問題を厳密に解くことは、通常、莫大な計算量を必要とする。この困難を乗り越えるためには、超並列超分散システム上で効率的に実行可能な、近似的最適化手法を開発することが重要である。

重要な研究課題としては次のようなものがあげられる。

- 模擬焼きなまし法 (シミュレーテッド・アニリング法)、遺伝的アルゴリズム、生態学的アルゴリズム、進化アルゴリズムなどの確率的最適化手法
- ニューラルネットワークを用いた最適化手法
- その他の非線形最適化の方法

4. おわりに

以上、RWC 研究計画における理論基盤の研究について、その目標、背景、具体的課題について述べてきた。最後に、研究スケジュールを簡単に示しておわりとしたい。研究スケジュールは大きく二つのステップに分けられている。

前期においては、並列性や柔軟性をもつ情報処理に関連してこれまでに提示された理論やモデル、たとえばパターン認識、多変量データ解析、ニューラルネットワークによる情報処理などが、情報表現や評価などの情報処理の枠組みの拡張または一般化の中で再検討される。そしてそれらの根底をなす「柔らかな論理」の統一的な観点から、理論を再構成し、さらに新たな展開を図る。同時に、情報統合や学習・自己組織化などの基礎的な機能に関する研究も行う。

現在までに、「柔らかな論理」の可能性として、パターン認識における特徴抽出に関する非線形理論の研究から、パターン認識や学習の背後にある本質的な枠組みとして、帰納的確率論理 (階層化された確率論理) の枠組みが見え始めている。また、制約充足パラダイムに従う柔軟な記号／パ

ターン情報の処理, データからの確率的知識の獲得に関する計算論的な理論, さらには GA (遺伝的アルゴリズム) を含む確率的最適化に関しても, 検討が進められている。

後期においては, これらの基礎理論を基に, 柔軟な認識, 推論, 制御といった要素的な新機能のための構成的な理論とモデルの研究を行う。ここにおいては, 新機能の研究とのインタラクションを強く保ちつつ研究開発を行うことが重要である。また, 新機能におけるシステム統合化の基盤となる, 種々の要素機能モジュールを高次のレベルで統合するための基礎となる理論・モデルの研究も行われる。

参 考 文 献

- 1) 大津: 認識と理解のための柔らかな論理, 電子情報通信学会誌, Vol. 71, No. 11, pp. 1231-1240 (1988).
- 2) Otsu, N.: Toward Soft Logic for the Foundation of Flexible Information Processing, Bul. ETL, Vol. 53, No. 10, pp. 75-95 (1989).
- 3) 大津: 理論と新機能—柔らかな情報処理を目指して, リアルワールドコンピューティング特集, Computer Today 5月号 No. 49 (1992).

(平成5年7月14日受付)



大津 展之

昭和22年生。昭和44年東京大学工学部計数工学科卒業。昭和46年同大学院修士課程修了(数理工学専攻)。同年電子技術総合研究所入所。

以来, パターン認識, 画像処理, 多変量データ解析, 人工知能に関する数理的基礎研究に従事。工学博士。昭和57年カナダ NRC 招聘研究員。情報科学部数理情報研究室長。電総研首席研究官(兼任)を経て, 現在知能情報部長。筑波大学連係大学院教授, 新情報処理開発機構つくば研究所首席研究員を併任。電子情報通信学会, 日本行動計量学会など各会員。



麻生 英樹

昭和33年生。昭和56年東京大学工学部計数工学科卒業。昭和58年同大学院工学系研究科修士課程修了(情報工学専攻)。同年電子技術総合研究所入所。現在, 情報科学部情報数理研究室主任研究

官。神経回路網の数理モデル, パターン情報処理, 多変量データ解析の研究に従事。著書「ニューラルネットワーク情報処理」(産業図書)。電子情報通信学会, 日本行動計量学会各会員。

