

学位論文題名

A Study on Parallel Constraint Satisfaction
for Distributed Knowledge Processing

(分散知識処理の並列的制約充足に関する研究)

学位論文内容の要旨

近年、PDPモデルや遺伝的アルゴリズムなどに代表される新しい情報処理メカニズムが注目を集めている。それらは基本概念を自然界における情報処理メカニズムに求め、従来のシステム工学的手法とは異なった独自のものであり、理論及び応用の両面で多くの研究がなされてきた。PDPモデルや遺伝的アルゴリズムでは、分散表現と呼ばれる問題表現形式が、並列的に実現される制約充足のアルゴリズムと相補的に作用して、知識処理に適した様々な性質を生み出す長所を持つ一方、構造化された知識空間における推論問題や、既存知識の統合化問題等に対しては、そのメカニズムの単純さや表現の一様性により、問題へのアプローチが困難になるという短所が存在する。以上の現状認識の下に本研究は、分散的に表現された知識を並列的な制約充足メカニズムにより処理する手法の短所の克服を目的として、その表現および処理能力の拡張を試みたものである。本研究では、基本的枠組みとして、PDPスキーマ理論の実現メカニズムとして提案されているボルツマンマシンと、多目的の探索アルゴリズムとして知識処理分野においても注目されている遺伝的アルゴリズムを取り上げ、各々の知識処理能力に応じた拡張を行っている。

前者に対しては、その柔軟でロバスタな制約充足システムとしての性質を活かし、さらに高度な処理能力を付与するため、ネットワークの構造化によるアプローチを試みている。まず、非構造化ネットワークを集合論的に記述し、知識に存在するとされる概念間の全体部分、および抽象-具体関係という2種類の階層性に基づく構造化ネットワークを定義しており、従来は困難であった知識の階層性を陽に扱うことを可能としている。また、既学習概念の検索能力を拡張するために、ネットワーク間の演算の枠組みを構築し、従来の完全な分散表現では困難な検索条件による概念検索を可能としている。さらに、演算の枠組みを応用し、複数のネットワークに独立に学習された同類の知識を、再学習を用いずに統合するネットワークを構築している。

一方、後者に対しては、より明示的に制約を扱えるような拡張を試みている。すなわち、CADに代表されるような実時間の対話的な知識活動の支援を想定し、提案されている局所的制約伝播法に遺伝的アルゴリズムを適用することにより、過去の経験により新たな探索過程の効率化を試みである。アルゴリズム自体の拡張として、制約を伝播するためのルール系列を直接扱える問題依存型の遺伝的オペレータが提案されている。

本論文は以下の7章から構成されている。

第1章においては本論文の概要を述べている。

第2章は「分散表現に基づく知識処理」と題し、まず、本研究のベースとなるPDPモデ

ルと遺伝的アルゴリズムのそれぞれについて、知識处理的応用に関する従来のアプローチを概観し、分散知識処理システムとしての性質を議論した上で、本論文で行うアプローチの位置付けを示している。

第3章は「構造化ボルツマンマシンによる構造的概念の表現」と題し、まず、概念の記述を集合論的に与え、PDPモデルにおける概念間の全体-部分関係と抽象-具体関係に基づく知識の階層性の表現について議論し、ネットワークの構造化の必要性を明らかにしている。次に、そのベースとなるボルツマンマシンを概観し、知識処理のための並列的制約充足システムとしての性質について議論している。その上で、前述の2種類の階層性のそれぞれに基づく構造化ボルツマンマシンを構築している。全体-部分関係に基づく構造化は、一つ概念を同時に分散のおよび局所的に表現するボルツマンマシンをモジュールとして定義し、それを階層的に結合することにより実現している。モジュール内結合の学習に競合学習を導入して自己組織的な表現変換を行うことにより、階層間にわたる分散表現の性質の保持を実現し、このネットワークの挙動を計算機実験によって示している。結果として、分散表現と制約充足システムとしての性質により、未学習概念の検索に対しても尤もらしい概念が推論的に想起されることが実験的に確認されている。一方、抽象-具体関係に基づく構造化は、PDPスキーマ理論において上位概念に相当するサブスキーマに対応する部分ネットワークをボルツマンマシンから抽出し、それを新たなユニットにより置換し、置換された部分ネットワークを新たな層としてそのユニットへ結合するという過程を繰り返すことにより行なっている。階層化されたネットワークについて、分類学的階層を持つ例題を用いた計算機実験を行い、例外的特徴を持つ対象に対しても妥当な挙動を示すことを確認している。

第4章は「構造化ボルツマンマシンによる概念の検索」と題し、まず最初に、PDPモデルにおける既学習概念の検索能力の限界を示し、関係データベース理論における関係表とモジュールとのアナロジーによる演算の枠組みにより、より複雑な検索条件の指定を可能とする理論を構築している。演算は被演算モジュール間に結合を与えて一つのネットワークとして動作させることにより実現している。その際、一部の演算は完全な分散表現では実現不可能であり、モジュールの2レベル表現が不可欠であることが議論されている。さらにこの枠組みの工学的有効性を示すために、単純化された形状特徴モデリングに適用した計算機実験を行っており、論理的演算の結果に対して柔軟性が高く、また演算パラメータの調整により容易に演算結果の質を変化させることが可能であることを明らかにしている。

第5章は「構造化ボルツマンマシンによる知識の統合」と題し、まず、学習により獲得された知識の統合問題について議論し、再学習による方法の問題点として学習の時間的コスト、分散表現知識の明示的抽出の困難さ等を明らかにしている。それに対し、付加的な学習を要せずに独立に獲得された既学習知識を統合する枠組みとして、前章のモジュール間の演算の枠組みを利用し、ネットワークの競合・抑制作用により知識を統合する枠組みを構築している。この枠組みの有効性を確認するために、簡単な移動物体のナビゲーション問題とマニピュレータの経路生成問題に関する計算機実験を行っており、知識の増加に対する性能の向上を確認している。

第6章は「遺伝的アルゴリズムによる制約充足」と題し、まず、遺伝的アルゴリズムによって解かれる問題のクラスとして、系列的な遺伝子型を扱う逐次的制約充足問題を定義し、定義された問題に対する従来の遺伝的アルゴリズムによるアプローチを概観している。次に、そのような問題の一つである設計などの知識活動の対話型支援を想定した手法の一つである局的制約伝播法を取り上げ、過去の対話過程における制約伝播ルール系列の最適

化を遺伝的アルゴリズムによって行い、その結果を用いて新たな対話過程におけるルール
の選択基準を調整するという枠組みを提案している。さらに、この問題に特有の遺伝子型
表現の特徴について議論し、問題向きの遺伝的操作をあらたに提案している。さらに、簡
単な対話型パラメトリック設計を例題とした計算機実験を行い、その有効性を確認してい
る。

第7章では本論文全体の総括を述べ、以上提案した理論と手法の工学的有用性を明らか
にしている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 嘉 数 侑 昇
副 査 教 授 島 公 脩
副 査 教 授 田 中 謙
副 査 教 授 宮 本 衛 市

学位論文題名

A Study on Parallel Constraint Satisfaction for Distributed Knowledge Processing

(分散知識処理の並列的制約充足に関する研究)

知識処理の枠組みにおいては、知識の表現形式が処理系の性能と密接に関係する。近年注目を集めているPDPモデルや遺伝的アルゴリズム(GA)では、問題が分散表現と呼ばれる表現形式によって表現され、並列的に実行される制約充足のメカニズムにより処理される。これらの手法は、自然界の情報処理の模倣に基づくものであり、柔軟性やロバスト性等、知識処理に適した長所を持つが、一方ではそのメカニズムの単純さや一様性に起因する多くの問題が発生する。

PDPモデルは、提案当初から内容番地記憶の実現メカニズムとしての応用が示されており、PDPスキーマ理論により、記憶された概念の自動的一般化や自然な推論能力等、知識処理機構として望ましい性質を持つことが明らかにされている。しかし、その枠組みにおいては、概念の有する階層性を明示的に利用することが困難であること、概念の検索における複雑な検索条件を表現する手段が提供されていないこと、既学習ネットワークの再学習が容易ではないために既学習知識の統合が難しいこと等の問題が存在しており、知識処理モデルとしては不十分であることなどが指摘される。これらの問題に対し本論文では以下に示すように、呈示されたパターンの学習能力を持つボルツマンマシンを対象として、学習後のネットワークに付加的結合の形で外的に制約を与えることによる拡張を試みている。まず、階層性の表現に関する問題に対して、PDPモデルにおける構造を含む概念の表現能力に関する議論を行い、ネットワーク自体の構造化の必要性を明らかにしている。その上で、知識に内在するとされる2種類の階層性である全体-部分関係と抽象・具体関係に着目し、各々の関係に基づく構造化ネットワークモデルとして構造化ボルツマンマシンを構築しており、知識の階層性を陽に利用することを可能にしている。また、検索条件の問題に対して従来の完全な分散表現では複雑な検索条件の指定に限界があることを明らかにし、局所表現の導入を提案している。この局所表現と分散表現の相互作用により、ネットワーク間の演算の枠組みを構築し、集合演算による概念検索を可能としている。これらの拡張に関して、計算機実験によりその挙動が確認されており、形状特徴モデリング問題に適用することにより、工学的有効性が示されている。つぎに、知識の統合問題に対して、既学習ネットワークの再学習に必要とされる時間的コストおよび分散表現知識の明示的抽出の困難さの問題を明らかにし、再学習に代わる方法として、本論文で提案しているネットワーク間の集合演算の枠組みを利用し、既学習ネットワーク間の競合・抑制作用により知識を統合するネットワークを構築している。この拡張については、移動物体のナビゲーション問題およびマニピュレータの経路生成問題に関する計算機実験を行っており、知識の増加に対する性能の向上が確認されている。

一方、GAに関して、その並列的計算特性および自律機能特性を活かして制約充足対話型の知識活動支援問題への接近を図っている。この問題は、計算時間の問題から探索的

法による大域的制約充足の適用が困難であり、従来、問題全体の制約が充足されるまで局所的制約充足ルールを逐次適用していく局所的制約伝播法が用いられてきた問題であり、ルールの選択はヒューリスティクスに基づく重みづけに基づいて行われている。本論文ではこの問題に対し、ルールの選択規準を過去の事例に基づいてGAによりチューニングすることを試みている。その際、ルール系列を直接扱える問題依存型の遺伝的オペレータを新しく提案し、高い計算効率を実現している。提案手法の有効性・実用性を、機械の対話型パラメトリック設計問題を例とした計算機実験を通して示している。

これを要するに、著者は精密工学における知的情報処理手法の新しい展開とその実現を図り、分散知識処理の並列的制約充足に関する有益な知見を得ており、その分野に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。