

ファジィ制約充足問題のハイブリッド解法に関する研究

学位論文内容の要旨

人工知能の基盤技術の一つである制約充足問題(CSP)は離散的組合せ探索問題の一種であり、変数間の制約をすべて充足するように変数への値の割当てを決定する問題として定義される。CSPによって現実世界の多くの問題が定式化可能であるが、その記述力をさらに高めるため、最近ではCSPを様々な意味で緩和した拡張モデルが多く研究されるようになってきている。通常、CSPの制約は全て完全に充足されなければ解とはならないが、必ずしも充足する必要のないソフトな制約を導入したCSP、いわゆるソフトCSPと呼ばれるクラスのモデルがその代表的なものである。本論文の研究対象であるファジィCSPはソフトCSPの一種であり、制約をファジィ関係とし、不完全に充足される制約のうちで最も違反している制約の充足度を最大化することを目的とする組合せ最適化問題として定義される。

ファジィCSPを含む組合せ最適化問題に対する解法はその特徴から、部分的な変数割当ての逐次拡張に基づく系統的木探索手法と、完全な変数割当ての逐次修復に基づく局所的状態空間探索法とに大きく分けられる。これらは特徴が非常に対照的であり、それぞれ長所と短所をもっている。すなわち、系統的探索は解が存在すれば必ず見つけることができる反面探索に非常に大きな時間が必要であり、局所的探索は大規模な問題でも実用的な時間で近似解を得られる場合があるがその保証がないという問題を擁している。とくにファジィCSPは問題のクラスがNP困難であり、これまでのファジィCSPに関する研究でも上記の不具合は解決されていない。

以上のような背景から、本論文では両者の短所を補いつつ長所を生かすために、ファジィCSPのハイブリッド解法 Spread-Repair-Shrink(SRS) アルゴリズムを提案する。SRSは探索の全体を通して局所的探索を行い、その一連の逐次改善を局所的に制御するために系統的探索を用いる。その基本的な戦略は最悪の制約違反をグリーディに修復(Repair)することであるが、SRSは近傍の制約違反を修復することによって発生する変数割当ての変化を、修復すべき制約に効率よく伝播させるために動的に成長(Spread)・収縮(Shrink)する探索木を生成する。このように修復操作を制御することによって、従来手法と比較して探索時間の大幅な短縮が実現できることを評価実験を用いて示すと共に、大規模な問題に対する相対的な優位性を示す。さらに実用的な近似度の解が得られることを、厳密解法との比較によって示す。また、論文の後半ではSRSアルゴリズムを拡張して連続領域を持つファジィCSPの近似解を求める。SRSによって数理計画的な解法がうまく使えない問題を、人工知能の観点から組合せ探索的に解決することが可能となることを示す。

本論文の構成は以下の通りである。

第1章では、序論として本研究の背景と目的について述べている。

第2章では次章以降の準備として、制約充足の基礎的な枠組みについてまとめている。はじめに離散的 CSP の数理モデルを紹介し、その中枢である制約構造について述べた後、ファジィ CSP の数理モデルを説明している。また、ファジィ行列による制約表現と、メンバーシップ関数を用いた制約表現との比較を行っている。

第3章では CSP を解くためのアルゴリズムに関する従来研究について述べている。はじめに系統の木探索手法に関する諸研究を説明し、その中でアーク整合と呼ばれる強力なフィルタリングアルゴリズムを示している。次に局所的状態空間探索手法に関する諸研究を説明し、その中で提案手法との比較に用いるニューラルネットを用いた解法を説明している。

第4章では、局所的探索と系統探索を組み合わせた解法の提案を行っている。はじめに前章で述べた2大手法を比較し、CSP のハイブリッド解法に関する諸研究と、提案手法の基本的なアイデアを示している。次に提案手法である SRS アルゴリズムの枠組みについて、Repair, Spread, Shrink の3つの基幹的な動作をそれぞれ説明した後、アルゴリズムの最悪計算量と停止性に関して議論している。次に、SRS と関連研究で扱われている手法との比較をいくつかの評価実験によって行っている。ここでは、典型的な系統探索手法で得られる最適解と、SRS で得られる解の質を比較することによって、SRS の近似度を測定している。また、従来の局所的探索手法で要する探索時間と、SRS による探索時間に関しての比較を行い、とくに大規模な問題に対して SRS が優れていることを示している。

第5章では SRS アルゴリズムを拡張して連続領域を持つファジィ CSP の近似解を求める手法を提案している。はじめに変数領域が連続離散混合となる問題を想定し、前章の SRS アルゴリズムを拡張している。次に、その過程において状態空間における次状態を連続値から効率的に探し出す手法を導入している。次に、単純な局所探索手法との比較によって SRS が効率的であることを示している。

最後に、第6章では結論として、評価実験で得られた結果から提案手法の有効性に関する所見をまとめ、今後の研究の方向性を示している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 栗 原 正 仁

副 査 教 授 宮 腰 政 明

副 査 教 授 工 藤 峰 一

副 査 教 授 佐 藤 義 治

学 位 論 文 題 名

ファジィ制約充足問題のハイブリッド解法に関する研究

制約充足問題 (CSP) は、変数間の制約をすべて充足するように変数への値の割当てを決定する離散的組合せ探索問題である。この枠組みによって応用上の多くの問題が定式化可能であることから、人工知能の基盤技術の一つとして広く研究されてきている。近年では記述力をさらに高めるため、これを様々な意味で緩和した拡張モデルが多く研究されるようになってきている。通常、CSP の制約はすべて完全に充足される必要があるが、必ずしも充足される必要のないソフトな制約を導入したソフト CSP もその一つである。本論文の研究対象であるファジィ制約充足問題 (ファジィ CSP) はソフト CSP の一種であり、充足度をメンバーシップ値とするファジィ関係によって制約を表現し、不完全に充足される制約のうちで充足度が最も低い制約の充足度を最大化する MAX-MIN 型の目的関数をもつ組合せ最適化問題として定義される。

ファジィ CSP を含む組合せ的最適化問題に対する解法は、部分的な変数割当ての逐次拡張に基づく系統的木探索法と、完全な変数割当ての逐次修復に基づく局所的状態空間探索法とに大きく分けられる。これらは対照的な特徴と問題点をもっている。すなわち、系統的探索は最適解が存在すれば必ず見つけることができるが一般に探索に多くの時間を必要とし、局所的探索は大規模な問題でも実用的な時間で解を得られる場合があるがそれは一般に最適解ではなく質が必ずしも良くない近似解である。

本論文ではこれらの問題点に対し、系統的探索と局所的探索のそれぞれの長所を生かすために、ファジィ CSP のハイブリッド解法として Spread-Repair-Shrink (SRS) アルゴリズムを提案している。SRS は探索の全体を通して局所的探索を行い、その一連の逐次改善を局所的に制御するために系統的探索を用いる。その基本的な戦略は最低の充足度をもつ制約への値の割当てを改善することであるが、それが直接的には不可能なときには、修復可能な近傍の制約違反を探索するために探索木を成長 (Spread) させ、それを修復 (Repair) した効果を、今度は探索木を収縮 (Shrink) させることによって木の根すなわち最低の充足度をもつ制約へ効率良く伝播させる。こ

のような探索制御によって、従来手法と比べて、特に大規模な問題に対して質の良い近似解を高速に求めることができることを、ランダムに生成された問題群を用いた実験によって実証している。また、この手法を拡張して、変数の取り得る値が連続領域であるようなファジィCSPを導入してその近似解を求める手法を提案している。

論文は6章から構成されている。第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。第2章と第3章は、それ以降の準備として、CSPおよびファジィCSPの基礎的な枠組みとそれを解くための従来のアルゴリズムについてまとめたものである。

第4章と第5章が本論文の中心となる部分である。第4章では、SRSアルゴリズムを提示し、それを実験によって評価している。はじめにCSPおよびファジィCSPのハイブリッド解法に関する諸研究を概観し、提案手法の基本的なアイデアを示した後、SRSアルゴリズムの中心となるRepair, Spread, Shrinkの3つの基幹的な動作をそれぞれ説明し、アルゴリズムの最悪計算量と停止性に関して議論している。次に、SRSと他の手法との比較を、ランダムに生成した問題群を用いたいくつかの評価実験によって行っている。ここでは、系統的探索法で得られる最適解とSRSで得られる近似解の質を比較することによってSRSの近似度の良さを示すとともに、従来の局所的探索法による探索時間とSRSによる探索時間を比較して、とくに大規模な問題に対してSRSが優れていることを示している。

第5章ではSRSアルゴリズムを拡張して連続領域を持つファジィCSPの近似解を求める手法を提案している。最後に、第6章では結論として提案手法の有効性に関する所見をまとめ、今後の研究の方向性を示している。

これらの研究成果の評価すべき点はつぎのようにまとめられる。

1. ファジィ制約充足問題に対する新しい考え方のハイブリッド解法である Spread-Repair-Shrink アルゴリズムおよびその連続領域への拡張手法に独創性が認められる。
2. 従来手法と比べて、特に大規模な問題に対して質の良い近似解を高速に求めることができる点に、この解法の有用性が認められる。

これを要するに、著者は、ファジィ制約充足問題に対する質の良い近似解を高速に求めるための解法について新知見を得たものであり、知能情報学に対して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あるものと認める。