

(続紙 1)

京都大学	博士（情報学）	氏名	Xavier Olive
論文題目	Symmetries in Distributed Constraint Programming（分散制約プログラミングにおける対称性に関する研究）		
（論文内容の要旨） 本論文は、複数のエージェントが局所的に保持する部分制約問題の集合として定義される制約問題を解くメカニズムである分散制約プログラミングにおいて、問題が有する種々の対称性を見出し、それを利用して求解に要する時間・空間コストを削減する方法を論じたものである。本論文は第1部（第1章）で研究目的と論文の内容について概観した後、第2部（第2章～第4章）で制約プログラミング、それを分散化した分散制約プログラミング、および制約プログラミングに現れる種々の対称性について論じ、本来大域的な性質である問題の対称性とその分散求解とが相反する関係にあるため、これまでに分散制約プログラミングにおける対称性に関する研究がほとんど見られないことを示している。 続く第3部（第5章～第6章）と第4部（第7章～第9章）では、分散制約プログラミングにおける制約、変数、および変数値の対称性について、その検出法と利用法について論じている。まず第5章では個々のエージェントが局所的に認識する部分問題中の制約および変数の対称性が、問題全体にわたって大域的に成立するか否かを前処理により判定し、発見された大域的対称性を用いて問題を縮約することで求解効率を向上する方法を論じている。次に第6章では、深さ優先探索木を用いた分散制約プログラミングの求解法であるDPOP(Dynamic Programming Optimization Protocol)において、エージェント間で制約を伝播する際に対称性の情報を併せて伝播することで、制約間の対称性を前処理が不要な形で発見・利用する方法を提案し、移動物体追跡問題において前処理法よりも効率的であることを示している。 また第4部では、変数と値の双方に対称性を有する問題について、ある変数代入に対して対称性の観点から同値である既約形を求める方法と、ある対称性に対して全ての既約な変数代入を求める方法とを第7章で提案し、それらの分散制約プログラミングへの応用について第8章と第9章で論じている。すなわち第8章ではDPOPに対する適用を、また第9章では分散分枝限定法であるSyncBBに対する適用を論じ、グラフ彩色問題を対象に対称性を利用した効率化が行えることを示している。 最後に第5部（第10章）では、本論文に関する研究成果を概説するとともに、分散制約プログラミングと対称性に関する将来的な展開についても触れている。			

(論文審査結果の要旨)

分散制約プログラミングは、分割・分散された制約問題の解を、個々の部分問題を担当するエージェントが連携・協調して求める手法であり、問題の分割・分散が本質的に不可避であるような問題、たとえば大域的な問題構築が通信コストの観点で困難であったりプライバシーの観点で不適切であったりする問題の求解法として近年注目されている。分散制約プログラミングの課題は、部分的な求解手続をいかに効率的にエージェント間で統合するかにあり、特にエージェント間の通信頻度や通信量の大小が求解効率に大きく影響する。一方、一般に制約問題にはさまざまな対称性が内包されており、たとえば変数を置換することで複数の制約式が同値となる、あるいは制約式に対する変数置換や値の置換が同値写像となることが、しばしば生じることが知られている。このような対称性は、ある変数の具体化（値の代入）による制約式の評価によって、変数・値が対称である別の評価結果が得られることを意味し、制約問題の求解プロセスの効率化につながる。しかし対称性は制約問題全体に関わる性質であるため、部分問題求解をベースとする分散制約プログラミングとは相反する性格を持ち、対称性を利用した分散制約プログラミングの効率化に関する過去の研究例はほとんど見当たらない。

本論文は、この分散制約と対称性という対立的な問題に挑戦したものであり、第3部（第5章～第6章）と第4部（第7章～第9章）において、それぞれ独創的なアイデアに基づく対称性を利用した効率化手法の提案・実装・評価について論じている。たとえば第6章では、制約グラフを深さ優先探索木に変換して分散処理するDPOPをベースとして、変数置換により同値となる制約を対象としたエージェント間通信の削減手法について論じており、対称的な制約の発見を促すような木構造の構築法、複数のエージェントが発見した対称性の整合性判定法、大域的に成立する対称性だけでなく部分的な対称性を利用した通信削減法など、いくつもの新たな処理方式を提案しその有効性を実証している。また第7章では、一般の制約問題でも研究されていなかった変数と値の双方の対称性について、変数代入の同値既約形の導出法と全ての既約形の列挙法を見出し、これを利用して制約を圧縮表現することで、制約計算の時間的・空間的計算量およびエージェント間の通信量を大幅に削減できることを示している。さらに第8章と第9章では、この圧縮表現を用いることでDPOPおよび分散分枝限定法SyncBBの処理効率が大幅に向上することを、具体的な実装・評価に基づいて実証している。

以上のように本論文は、これまでほとんど研究されていなかった分散制約プログラミングにおける種々の対称性について考察し、対称性を利用することで制約問題求解を効率化する4つの方法を提案した上で、それぞれについて実際に効率が向上することを実験により示している。したがって分散制約プログラミングの実現手法に対する学術的な貢献度が高く、博士（情報学）の学位に値するものと判定した。また、平成23年2月23日に論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果合格と認めた。