

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11242

研究課題名（和文）先進的な知識表現および推論技術を基盤とした多目的最適化ソルバーの研究開発

研究課題名（英文）Research and Development on Multi-objective Optimization Solver based on Advanced Knowledge Representation and Reasoning Techniques

研究代表者

番原 睦則 (Banbara, Mutsunori)

名古屋大学・情報学研究科・教授

研究者番号：80290774

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：解集合プログラミング（Answer Set Programming; ASP）は論理プログラミングから派生した宣言的プログラミングパラダイムである。本研究課題では、ASPの適用範囲を多目的最適化問題に拡張する試みとして、ASP技術に基づく多目的最適化ソルバーの研究開発を行った。時間割問題などの現実社会に密接に関連した問題に対する応用研究を通して提案手法を評価し、ASPの特長を活かした多目的最適化の有効性を実験的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、解集合プログラミング技術は大きく進歩し、今後ますますの発展が見込まれる。本研究課題の成果は、高度な知識表現・推論・最適化を必要とするアプリケーション開発において、高性能かつ高機能な推論基盤を提供するものであり、様々な研究分野での活用が期待できる。例えば、多目的最適化は人工知能における選考（preference）とも密接な関係があり、この研究分野への波及効果も大きく期待できる。

研究成果の概要（英文）：Answer Set Programming (ASP), derived from Logic Programming, is an approach to declarative problem solving. We develop an approach to solving multi-objective optimization problems based on ASP. We show the effectiveness of our approach by empirically contrasting it to more dedicated implementations, through real-world problems such as timetabling.

研究分野：情報学基礎

キーワード：解集合プログラミング 最適化 時間割問題

1. 研究開始当初の背景

SAT (Boolean SATisfiability) は命題論理式の充足可能性を判定する問題である。SAT の研究は、1960 年代の Davis らによる DPLL アルゴリズムの提案、1971 年の Cook による NP 完全性の証明など、計算機科学および人工知能の中心的課題であった。SAT を解くプログラムである SAT ソルバーは、これまで膨大な量の研究がなされ、ここ数十年でその性能は飛躍的に向上した。これを背景として、近年 SAT は様々な問題に対する推論基盤として広く利用されるようになり、国内外の大学や企業で活発に研究・応用が進められている。

解集合プログラミング (Answer Set Programming; ASP) は、論理プログラミングから派生した宣言的プログラミングパラダイムである。ASP 言語は一階論理に基づく知識表現言語の一種である。ASP ソルバーは安定モデル意味論に基づく解集合を計算するプログラムである。近年、SAT ソルバー技術を応用した高速 ASP ソルバーが実現され、様々な問題への実用的応用が急速に拡大している。

SAT 技術の発展に伴い、ASP 技術は大きく進歩し、組合せ最適化問題への拡張についても研究が進められてきた。しかし、本研究グループの研究成果も含め、これまでの拡張のほとんどは単目的最適化問題 (mono-objective optimization problems) にとどまっている。一方、SAT の分野では、その適用範囲を**多目的最適化問題** (multi-objective optimization problems) に拡張する試みが始まりつつあり、その実用化が重要な課題となっている。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、ASP の適用範囲を多目的最適化問題に拡張する試みとして、**ASP 技術を基盤とした新しい多目的最適化ソルバーを実現**することである。言語拡張、パレート最適解の獲得、効率的なパレート最適解の列挙について研究開発を進める。また、特長的なアプリケーションの研究開発を通じて手法およびソルバーを評価し、ASP の特長を活かした多目的最適化の利点・有効性・実用性を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究課題を遂行するために、国内の三つの研究機関 (名古屋大学、神戸大学、国立情報学研究所) に所属する四名の研究者 (研究代表者・番原、研究分担者・田村、宋、連携研究者・井上)、および、海外共同研究者 (Torsten Schaub 教授、ポツダム大学) の合計五名からなる研究チームを組織した。

本研究課題の具体的な研究テーマは以下の通りである。

- (1) 多目的最適化ソルバーの開発
- (2) 多目的最適化ソルバーの拡張
- (3) 特長的なアプリケーションの開発

各研究者は複数の研究テーマを担当した。研究代表者、研究分担者、および、連携研究者の研究拠点が離れているため、研究者全員が参加する研究打合せを各年複数回開催した。ここでは、アイデア・実現技術の共有を主目的とし、進捗報告、研究意見交換、研究計画・方法に関する議論を行った。海外共同研究者は、研究代表者とオンラインで研究打合せを行い、研究内容に対する助言・海外研究の紹介等を通じて本研究の推進に寄与した。開発したソルバーおよびアプリケーションを GitHub 等に公開し、社会に発信した。

4. 研究成果

(1) 多目的最適化ソルバーの開発

多目的組合せ最適化問題を記述できるように既存の ASP 言語を拡張し、ASP ソルバー `clingo` をベースに多目的最適化ソルバーを実装した。`clingo` ソルバーは海外共同研究者・Torsten Schaub 教授の研究チームが開発している高速 ASP ソルバーであり、世界的に広く普及している。提案手法および開発ソルバーを評価するために、大学の一週間の講義スケジュールを作成するカリキュラムベース・コース時間割問題に関する応用研究を行なった。この問題は代表的な教育時間割問題の一つであり、最適化の分野を中心に盛んに研究されている。まず最初に、単目的

コース時間割問題を解くための ASP 符号化 *teaspoon* を考案した. 次に, その符号化を多目的コース時間割問題へと拡張した. 国際時間割競技会のベンチマーク問題集を用いて実験を行った結果, 単目的最適化について, **未解決問題の最適値を決定**するなど既存手法より優れた結果を得た. 実験結果の一部を下表に示す. 表中の $>$ は既存の最良値の更新, $=$ は既存の最良値と同じ値, $*$ は最適性の証明を意味する. 例えば, $>*$ は既存の最良値より小さい新しい最適値の発見を意味する. また, 多目的最適化について, 自明でないパレート最適解を求めることに成功した. これらの研究成果の一部は, オペレーションズ・リサーチの**トップジャーナル**である *Annals of Operations Research*, プランニングおよびスケジューリングの**トップカンファレンス**である *International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS 2018)* で発表されている.

コース時間割問題の実験結果：既知の最良値との比較

Table 7 Comparison of *teaspoon* with other approaches

Instance	UD1		UD2		UD3		UD4		UD5						
	Best known	<i>tea-spoon</i>													
comp01	4	=	4	5	=	5	8	=	8	6	9	11	19		
comp02	12	=*	12	24	=*	24	12	=*	12	26	55	130	231		
comp03	38		53	64		109	25		47	362	405	142	204		
comp04	18	=	18	35	=	35	2	=*	2	13	=*	13	59	>*	49
comp05	219		504	284		624	264		556	260	459	570	1081		
comp06	14	=*	14	27	=	27	8	=*	8	15	>*	9	85	88	
comp07	3	=	3	6	=	6	0	=	0	3	=*	3	42	256	
comp08	19	=	19	37	=	37	2	=*	2	15	=*	15	62	>*	55
comp09	54		63	96		169	8	=*	8	38	50	150	196		
comp10	2	=	2	4	=	4	0	=	0	3	=*	3	72	73	
comp11	0	=	0	0	=	0	0	=	0	0	=	0	0	=	0
comp12	239		343	294		456	51		114	99	388	483	1135		
comp13	32	>*	31	59	=	59	22		50	41	111	148	>	147	
comp14	27	=*	27	51	=	51	0	=	0	16	>*	14	95	>*	67
comp15	38		53	62		109	16		22	30	68	176	254		
comp16	11	=*	11	18	=	18	4	=*	4	7	=*	7	96	438	
comp17	30	=*	30	56	=	56	12	=*	12	26	>*	21	155	352	
comp18	34		48	61		81	0	=	0	27	46	137	228		
comp19	32	>*	29	57	=	57	24		32	32	82	125	283		
comp20	2	=	2	4	=	4	0	=	0	9	>*	3	124	704	
comp21	43		94	74		124	6	=	6	36	76	151	166		
DDS1	38	=*	38	48	=	48	2393		6036	2278	=	2278	1831	4662	

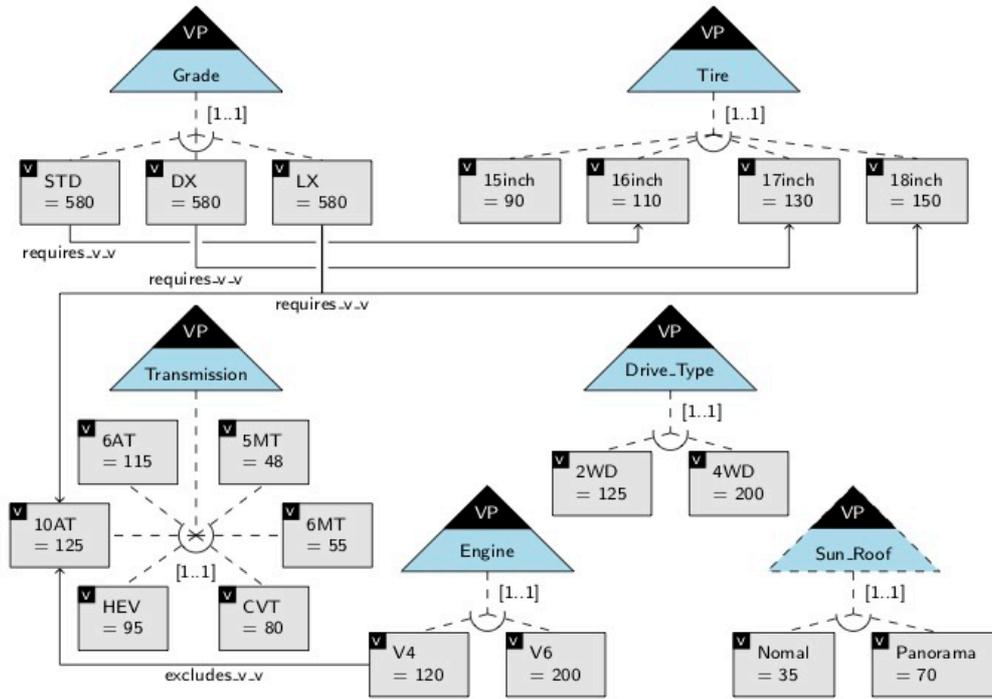
(2) 多目的最適化ソルバーの拡張

ASP ソルバーはその系統的探索を活かして, 時間割問題に対して未解決問題の最適値決定を含む優れた性能を示した. しかし, その一方で, ソフト制約の種類が多い問題集においては, メタ戦略等の確率的局所探索が, 多くの問題に対してより高精度な解を求めることが確認された. これより, 系統的探索の長所である最適性の保証と確率的局所探索の長所である計算時間相応の解精度の両方を備えた統合的探索手法を実現することは重要な研究課題といえる. 本研究では, ソルバーの拡張として, **系統的探索と確率的局所探索を統合的に適用**する優先度付き巨大近傍探索 (Large Neighborhood Prioritized Search; LNPS) を考案し, 高速 ASP ソルバー *clingo* 上に実装した. 国際時間割競技会のベンチマーク問題集を用いて性能評価を行った結果, 提案手法 LNPS は, 通常の ASP ソルバーの系統的探索と比較して, 多くの問題に対してより精度の高い解を得ることができた. さらに 1 問について, **既知の最良値を更新**することに成功した. ただ, この結果は単目的最適化問題に対するものであり, 多目的最適化への応用は今後の重要な課題の一つである.

(3) 特長的なアプリケーションの開発

特長的なアプリケーションとして, 時間割問題以外にも, 車両装備仕様問題, 配電網問題, 様相命題論理の充足可能性判定に関する応用研究を行った. なかでも, 多目的車両装備仕様問題は, 与えられた車種の数, 装備タイプの集合, 装備オプションの集合から, 装備および燃費に関する制約を満たしつつ, 予想販売台数の最大化や装備オプション数の最小化など, トレードオフの関係にある複数の目的関数のもとで最適な車両装備仕様を求める組合せ最適化問題の一種である. 本研究では, この多目的車両装備仕様問題を解く ASP 符号化を考案し, 企業から提供を受けた小規模・中規模・大規模の問題インスタンスに対して実行実験を行った. その結果, 提案手法は小規模な問題のパレート最適解を全列挙をすることができた. 以下に問題例とそのパレート最適解を示す.

多目的車両装備仕様問題の例



パレート解の例

車種	解 1			解 2			解 3			解 4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Grade	STD	DX	LX									
Drive_Type	2WD	2WD	4WD	2WD	2WD	4WD	2WD	2WD	2WD	2WD	2WD	2WD
Engine	V6											
Tire	16inch	17inch	18inch									
Transmission	6AT	HEV	10AT	10AT	HEV	10AT	10AT	HEV	10AT	10AT	10AT	10AT
Sun_Roof	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
予想販売台数 (合計)	5,525			5,475			5,135			4,723		
装備オプション数	12			11			10			9		

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Mutsunori Banbara, Katsumi Inoue, Benjamin Kaufmann, Tenda Okimoto, Torsten Schaub, Takehide Soh, Naoyuki Tamura, Philipp Wanko	4. 巻 275(1)
2. 論文標題 teaspoon: Solving the Curriculum-Based Course Timetabling Problems with Answer Set Programming	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Annals of Operations Research	6. 最初と最後の頁 3-37
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10479-018-2757-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 寸田智也, 宋剛秀, 番原睦則, 田村直之, 井上克巳	4. 巻 59(9)
2. 論文標題 SAT技術を用いたベトリネットのデッドロック検出手法の提案	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 1749-1760
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 南雄之, 宋剛秀, 番原睦則, 田村直之	4. 巻 35(3)
2. 論文標題 ブール基数制約を経由した擬似ブール制約のSAT符号化手法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 コンピュータソフトウェア	6. 最初と最後の頁 65-78
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11309/jssst.35.3_65	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 宋剛秀, 番原睦則, 田村直之, 鍋島英知	4. 巻 35(4)
2. 論文標題 SATソルバーの最新動向と利用技術	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 コンピュータソフトウェア	6. 最初と最後の頁 72-92
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11309/jssst.35.72	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Takehide Soh, Daniel Le Berre, Mutsunori Banbara, Naoyuki Tamura
2. 発表標題 A SAT-based CSP Solver sCOP and its Results on 2018 XCSP3 Competition
3. 学会等名 2019年度人工知能学会全国大会(第33回)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 生田哲也, 田村直之, 宋剛秀, 番原睦則
2. 発表標題 正規制約に対するSAT符号化手法の提案と評価 (ポスター)
3. 学会等名 第22回プログラミングおよびプログラミング言語ワークショップ (PPL2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯野有軌, 田村直之, 宋剛秀, 番原睦則, 井上克巳
2. 発表標題 解集合ソルバーを用いた様相命題論理の充足可能性判定 (ポスター)
3. 学会等名 第22回プログラミングおよびプログラミング言語ワークショップ (PPL2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大野周亮, 番原睦則, 宋剛秀, 田村 直之
2. 発表標題 alldifferent制約のプール基数制約への符号化手法の提案とクイーングラフ彩色問題への応用
3. 学会等名 人工知能基本問題研究会(第109回)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mutsunori Banbara, Katsumi Inoue, Benjamin Kaufmann, Tenda Okimoto, Torsten Schaub, Takehide Soh, Naoyuki Tamura, and Philipp Wanko
2. 発表標題 teaspoon: Solving the Curriculum-Based Course Timetabling Problems with Answer Set Programming
3. 学会等名 The 28th International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takehide Soh, Daniel Le Berre, Mutsunori Banbara, Naoyuki Tamura
2. 発表標題 sCOP: SAT-based Constraint Programming System
3. 学会等名 XCSP3 Competition 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宋剛秀, 鍋島英知, 番原睦則, 田村直之, 井上克巳
2. 発表標題 CEGARと反例の共有を用いたSAT型CSPソルバーの並列化方法の考察
3. 学会等名 人工知能基本問題研究会(第112回)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takehide Soh, Daniel Le Berre, Hidetomo Nabeshima, Mutsunori Banbara, Naoyuki Tamura
2. 発表標題 Fun-sCOP
3. 学会等名 XCSP3 Competition 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	田村 直之 (Tamura Naoyuki) (60207248)	神戸大学・情報基盤センター・教授 (14501)	
研究 分担者	宋 剛秀 (Soh Takehide) (00625121)	神戸大学・情報基盤センター・准教授 (14501)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携 研究者	井上 克巳 (Inoue Katsumi) (10252321)	国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・教授 (62615)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	ポツダム大学			
フランス	CRIL			