

Title	Distributed Reinforcement of Local Consistency for General Constraint Network An Investigation of Meeting Scheduling Problems
Author(s)	Ahlem, BEN HASSINE
Citation	
Issue Date	2005-09
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/819">http://hdl.handle.net/10119/819</a>
Rights	
Description	Supervisor:Tu Bao HO, 知識科学研究科, 博士

## Abstract

Constraint satisfaction problem (CSP) is a powerful formalism to represent and to solve many real-life NP-complete problems such as, planning, resource allocation, meeting scheduling, etc. The great success of this formalism is due essentially to its simplicity in expressing any real-world problem subject to constraints. A CSP is a triplet  $(X, D, C)$  composed of a finite set of  $n$  variables  $X$ , each of which is taking values in an associated finite domain  $D$  and a set of  $e$  constraints  $C$  between these variables.

Solving a CSP consists in finding one or all-complete assignments of values to variables satisfying all the constraints. However, this task is hard and many efforts were devoted towards enhancing it by reducing the complexity of the original problem. Essentially, the complexity reduction in CSP formalism is achieved by integrating the local consistency property (LC) and its corresponding filtering techniques. Those techniques allow the simplification of the original problem by eliminating values or combination of values that cannot belong to any solution. Many levels of LC have been proposed in the literature; among them enforcing arc-consistency is the most preeminent one because of its low time and space complexities. Most efforts dealing with enforcing AC on any constraint network (CN) are centralized almost always limited to binary CN, i.e., where each constraint involves at most two variables. Non-binary CNs, where constraints involve more than two variables, are often strongly required to deal with hard applications. Nevertheless, there is very few works involving non-binary constraints and they pertain only to the centralized framework.

Recently, with the advent of distributed computing and networking technologies, especially with the omnipresence of naturally distributed real-world problems, the interest in enforcing LC property in naturally distributed manner and for both binary and non-binary CN has largely increased, but such techniques have not been widely studied yet. Moreover, solving real-life applications, mainly meeting scheduling problems, requires also more studies to cope with the new environment requirements.

Our main target is *i*) to find solutions and build a novel generic system to enforce some levels of LC with reasonable cost on any CN and *ii*) to take this system to the real-life through one among the important combinatorial applications, meetings scheduling problems.

Our study on CSP framework and its related research directions including, LC enforcement techniques, and especially ways of solving real applications, mainly meeting scheduling problems (MS) stir up our attention to do more investigations in this framework. Five main contributions of this thesis are the following.

- The integration of LC enforcement techniques in a constraint solver reduces the exponential space, in the number of variables, of the search tree. This clear benefit coupled with the very few existing research efforts dealing with naturally distributed problems, motivated us to design a new hybrid agent-based method to enforce arc consistency on any CN. This hybrid method involves two main approaches DRAC and G-DRAC, for binary and non-binary constraints,

respectively. The termination of the two underlying techniques is guaranteed with equal polynomial time complexity as the best existing distributed technique for DRAC and the best centralized technique for G-DRAC<sup>1</sup> down to the number of variable. As for the spatial complexity, both techniques DRAC and G-DRAC save as much space as possible compared to existing ones. The empirical study of DRAC and G-DRAC shows their efficiency for especially hard problems (Chapter5.).

- Enforcing only arc consistency for some hard CN is fruitless. The main reason is that the problem could be initially AC, thus the filtering process will not prune any values, or prune only few inconsistent values. Achieving higher level of LC could be worthwhile. The main deal here is to find a good compromise between the level to enforce and its cost. Note that no distributed techniques for achieving higher level than AC exist in the literature. We designed an agent-based technique, that we called DRAC++ to enforce restricted path consistency, a stronger level than AC with reasonable cost. Moreover, a new heuristic is described in this work to decrease the practical complexity of DRAC++. The experimental results exhibit the efficiency of this new approach towards over-constrained problems (Chapter6.).
- Taking our research results to a real life combinatorial application was our main motivation for the next contribution. Therefore, we choose to evaluate the performance of DRAC on a real decision-making problem: Meeting Scheduling problem (MS). This problem is one the traditional real world problems that continues to fascinate many researchers. This problem embodies a decision-making process affecting several users, in which it is necessary to decide when and where one or more meeting(s) should be scheduled according to several restrictions related to users, meetings, environment, etc. Evidently, solving MS problems, is always time consuming, iterative and also tedious. Despite the continuous efforts of many researchers, this problem needs more investigations to raise many daily encountered difficulties due to the incremental environment requirements. However, DRAC is a filtering technique; it cannot solve any problem but only reduce it without loss of solutions. We came up in this thesis with another novel, agent-based, complete, and deterministic approach (that we called MSS for meeting scheduling solver) to reduce and solve any MS with predictable structure. The proposed underlying protocol is based on a *selfish* welfare to reach the best solution with polynomial cost. The experimental comparisons performed using a typical MS solver show the high performance and scalability of MSS, at least for the used data set (Chapter7.).
- The previous work requires a total knowledge about all the meetings in advance. However, for some organizations knowing all meetings beforehand might be quiet difficult rather impossible. This motivated us to tackle a new direction for MS problems, problems with unpredictable structure. Therefore, another more sophisticated solution to solve any dynamic MS problem is described in this thesis.

---

<sup>1</sup> There is not any technique to enforce arc consistency on non-binary CN in a naturally distributed manner.

The new approach, that we called MSRAC, is an incremental approach, able to cope with any system alterations, and consequently process any meetings' conflict using three different heuristics. An empirical study highlights the benefit of using the *metropolis criterion* in case of conflict against other heuristics. Moreover, the main goal in MSRAC is to maximize the global system welfare, defined by the optimal solution, while scheduling dynamic meetings (Chapter8.).

- Finally, our last contribution in this thesis is a novel, constraint-based asynchronous search approach (that we called DisAS for distributed asynchronous search). This work is able to tackle directly any constraint network (with non-binary constraints). The proposed approach is based in a part on a *lazy* version of the G-DRAC approach, and without adding any new links and without recording any nogoods as for the existing techniques in the literature. The idea behind using a *lazy* version of G-DRAC is to save as many as possible fruitless backtracking and consequently to enhance the efficiency of the solving process. Furthermore, a new generic distributed method to compute a static constraints ordering were also proposed with DisAS in order to establish an optimal ordering between agents, in which we save as many links as possible leading hopefully to decrease the set of exchanged messages and make it of a great practical use. The designed technique is generic and can be used to solve any naturally distributed real application (Chapter9.).

**Keywords:** Constraint satisfaction problem (CSP), Distributed CSP, Valued CSP, Local consistency, filtering techniques, Arc consistency, Multi-agent systems, Meeting scheduling problems, Asynchronous backtracking techniques.

## Abstract

制約充足問題(CSP)は、強力な形式化として、実世界における計画、資源配分、会議計画などの NP 完全問題の表現・解決を可能とする。この形式化が大きく成功する本質的要因は、制約条件を持つ実世界の問題が簡潔に表現できることにある。個々の CSP は、 $n$  個の変数  $X$  の有限集合、各変数の取りうる離散値の有限集合としてのドメイン  $D$ 、および変数間の制約の集合  $C$  という 3 要素( $X, D, C$ )によって構成される。

CSP の解決とは、各変数に対して、すべての制約を満足するような値の組合せを見つけることである。この難題に対して、これまでになされた多くのアプローチは、基本的に元の問題の計算量を削減することで性能向上を試みてきた。CSP 形式化における計算量削減は、局所整合(LC)および対応するフィルタリング技法を統合することで達成される。こうした諸技法は当初の問題を単純化するために、どの解にも貢献しない値、あるいは値の組合せを排除する。先行諸研究では、様々なレベルの LC を提案しているが、計算量が時間的にも空間的にも低い二項整合(AC)が中でも最も卓越した局所制約であるといえる。制約ネットワーク(CN)の AC 強化に関する試みの多くは中央集中型であり、ほとんどの場合、各制約に含まれる変数が最大 2 個となる二項型 CN に限定されている。しかし、困難なアプリケーションを取り扱う場合には、2 変数以上で記述される非二項型 CN が必要となる。非二項型制約を取扱う試みは極めて少なく、大方が集中型の枠組みに準拠している。

近年、分散コンピューティングおよびネットワーク技術が進展したことにより、実世界の問題が本質的に分散型である場合が多いことを踏まえて、分散型かつ二項型/非二項型 CN のための LC 強化に関する関心が高まっているが、こうした技術については依然広く研究されているわけではない。加えて、実世界の応用問題(主に会議計画問題)の解決にあたっては、新たな環境要件に対応する更なる研究が求められる。

本研究の主要課題は、i) どの CN においても様々なレベルの LC を適度なコストで強化する解を見つけ、そのための新たな一般システムを構築すること、ii) 本システムを実世界において重要な組合せ問題のひとつである会議計画問題に適用すること、の 2 点である。

CSP の枠組みおよび関連する研究方向としては、LC 強化技法、特に実応用(主に会議計画問題(MS))の解決手法が関心の中心であり、この枠組での調査研究を行う。本論文の主たる貢献は、以下の 5 点である。

- 制約充足における LC 強化技法の統合により、変数の個数に関して指数関数となる探索木の空間を削減する。この明白な利点は、分散型の課題を取り扱う先行研究が極めて少ないことも併せて、いかなる CN 上でも AC 強化が可能なエージェント・ベースの新しいハイブリッド手法を設計する動機となった。本ハイブリッド手法は、二項制約用の DRAC および非二項制約の G-DRAC を主要アプローチとする。両技法は、既存の最良の分散 DRAC 技法手法および最良の集中型 G-DRAC<sup>2</sup>手法の計算量に対して、変数の個数に対応する多項式時間を実現する。空間的には DRAC および G-DRAC と同先行手法と同等の計算量となっている。また実験により、どちらのアプローチもと

---

<sup>2</sup> There is not any technique to enforce arc consistency on non-binary CN in a naturally distributed manner.

りわけ困難な問題に対して効率的であることを示した(Chapter 5).

- 困難な CN では二項整合のみの強化が無意味な場合がある。これは主に、その問題が初期的には AC でありえたとしても、整合性のあるなしに関わらず、どのような値であってもフィルタリングによる刈り込みが見込めないことによる。高次の LC を達成することが有用なのは、強化のレベルとコストの間で適切な妥協点を見つけることになるからである。また AC より高次での整合を取り扱う分散技法に関する文献が存在しないことも指摘しておく。そこで、AC より上位のレベルである制約パス整合を適切なコストで強化するエージェント・ベースの技法 DRAC++を開発した。また、ここでは新たなヒューリスティックとして DRAC++の実際的な計算量削減についても述べる。実験により制約過多問題に対するこの新アプローチの効率性を示すことができた (Chapter 6.).
- 本研究の主要な動機のひとつに、この研究成果の実世界の組合せ問題への適用があり、実際の意思決定問題である MS 問題において DRAC の性能を評価することとした。MS 問題は伝統的に研究者をひきつけてきた実世界問題で、複数の利用者に影響を与える意思決定問題を具体化したものとして、1 件以上の会議をいつ・どこで開催するかを、利用者、会議、環境などに関連する諸制約に従って決定しなければならない。MS 問題の解決は、常に時間がかかり、単調な反復作業を必要とする。また、多くの研究者のこれまでの試みにも関わらず、暫時付加される環境要件から引き起こされる日常的な問題の数々に対処するための調査を必要とする。しかし DRAC 自体はフィルタリング技法にすぎず、問題解決をするわけではない。つまり解を損なうことなく問題の複雑さを削減するだけである。そこで本論文では、MS を予測可能な構造で削減し解決するための新たなエージェント・ベースの、完全かつ決定論的なアプローチ (MSS) を考案した。提案手法の基盤となるプロトコルは利己的な福利に基づき多項式計算量で最良解に到る。典型的な MS 解法との比較実験により、少なくとも適用したデータセットに関しては、本アプローチが高性能かつスケラブルであることを示した。(Chapter 7.).
- 上記 3 アプローチにおいては、事前に全会議に関する総合的な知識が必要であった。しかし全会議に関して事前に知ることが困難というより不可能であるような組織もあるため、MS 問題の新たな方向性として、予測不能な構造を持つ問題に取り組むこととした。本論文では動的 MS 問題に対してより洗練された解決方法にも言及する。この新アプローチを MSRAC と呼ぶ。これはインクリメンタルなアプローチであり、いかなるシステムの変更にも対応でき、また 3 タイプのヒューリスティックを用いて会議間の衝突を処理する。これに関しては、他のヒューリスティックに抵触する場合に *metropolis* 基準を用いることの利点が実験により明らかになった。更に MSRAC の主目標である大域的福利の最大化を、会議の動的計画の過程で最適解により決定することで実現している。(Chapter 8.).
- 最後に、新たに制約に基づく非同期型探索アプローチ (分散非同期方探索 DisAS) を説明する。この研究は *lazy* な G-DRAC アプローチの諸概念に準拠しており、新たなリンクの追加を行わない上に、新たな *nogoods* も記録しないという点で、*nogoods* の記録を組込んだ先行緒技法とは異なる。G-DRAC の *lazy* 版を用いたのは、無益なバックトラックの保持をできるだけ回避することで、結果的に解決プロセスの効率向上

を意図したためである。更に、静的に制約を順位付けする汎用的な新しい分散手法を DisAS とともに提案する。これにより、エージェント間に最適な順位を付け、保持するリンク数を可能な限り抑制することでメッセージ交換数を削減でき、実用に耐えうるものとした。ここで設計した技法には汎用性があり、分散型実アプリケーションの解決に対し適用性をもつ(Chapter 9).

**Keywords:** Constraint satisfaction problem (CSP), Distributed CSP, Valued CSP, Local consistency, filtering techniques, Arc consistency, Multi-agent systems, Meeting scheduling problems, Asynchronous backtracking techniques.