

災害避難への分散制約最適化手法の適用の効果

飯塚 泰樹 木下 克也
東海大学理学部情報数理学科

概要

災害発生時の円滑な避難は重要な課題の一つである。しかし災害時には人々が避難経路に殺到して渋滞を引き起こし、結果として全体の避難時間が長くなってしまふことがある。このような問題を解決するため、筆者らは、分散制約最適化の枠組みを応用して自律分散的に避難誘導を行うシステムを提案してきた。システムは、避難者達が持つ携帯端末だけから構成され、これら端末が自位置を推定し、アドホックネットワークを通じて相互に通信を行いながら避難タイミングを調整する。本稿では避難誘導問題を分散制約最適化問題として形式化し、システムの効果についてのマルチエージェントシミュレーション実験を行ったので、その結果について報告する。

1 はじめに

災害発生時や災害の危険が迫っている状況において、円滑な避難は重要な課題の一つである。しかし避難は常に円滑に進むとは限らない。例えば災害が発生した時の建物からの避難は、人々が限られた避難経路に殺到して渋滞を引き起こす。このような避難の場合、避難経路の許容量の人が移動するよう一部の人には少し待機してもらうことで、全体として避難時間の短縮が可能になることが知られている。災害時には、災害対策本部のような中央組織が避難誘導を行うこともあるが、全ての場所において、中央からの指示を行うことは現実的ではない。

本研究はこのような状況において、中央からの指示なしに全体最適な避難誘導を行う自律分散システムの実現を目指す。システムを実現するためには幾つかの要素技術が必要になるが、本研究ではまず、避難タイミング調整のための分散問題解決に焦点を当て、分散制約最適化問題 (DCOP) の枠組みの導入を試みる。本稿では、分散制約最適化解法を用いた場合の効果についてマルチエージェントシミュレーションを使った実験を行なったので、その効果を報告する。

2 災害時避難誘導システムの提案

災害発生時の避難のための情報共有システムとして、[7] や [23] などの提案がある。これらのシステムは、避難目的地、避難経路の安全性などの情報を提供、あるいは共有することを可能にする。しかし情報の共有は、時として多くの人々を安全で最短な経路に殺到させることになりかねない。災害時は通信の混乱による状況把握の困難さやリソースの不足などから、災害対策本部のような中央機関からの指示に頼ることは現実的ではなく、避難者同士の協調が必要になる。

渋滞の問題を解決するために筆者らは、携帯端末 (スマートフォン等) で構成される自律分散的な災害避難支援システムを提案してきた [8]。このシステムは、避難者が持つ携帯端末だけから構成され、情報を集めるためのサーバを使わないことを特徴とする。本提案システムは次のような避難誘導を行う機能を実現するものと想定する。

1. 避難経路の安全性についての情報の共有
別の利用者が発見した避難経路の障害情報などは、端末間のアドホック通信で共有する。
2. 避難経路の計画
携帯端末同士がアドホック通信により上記の

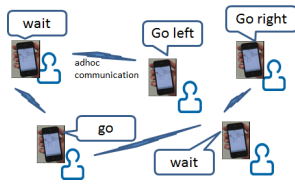


図 1: システムの利用イメージ

情報の交換を行いながら、自位置、および近隣のエージェントの位置を推定し、避難経路の計画（探索）を行う。

3. 避難タイミングの調整

携帯端末は、付近の携帯端末と通信を行い、避難タイミングについて調整を行う。

4. 避難指示の提示

端末画面や音声等を通して利用者に避難誘導情報を提供する。利用者はこの画面や音声に従って避難する。利用イメージを図 1 に示す。

本提案システムは上記の機能の実現を目指すため、避難者が持つ携帯端末が以下の機能を持つことを前提としている。

1. 位置情報の取得

携帯端末は室内あるいは室外で、WiFi や GPS を用いておおよその位置情報の取得ができる。

2. アドホック通信

付近の携帯端末同士はアドホック通信を通して相互に通信を行うことができる。

3. 避難経路についての知識

携帯端末は、現在位置周辺に適した避難目的地、およびその避難経路に関する十分な知識をあらかじめ端末内に持ち、経路探索が可能である。

本研究の最初の段階では、すべての仮定と機能 1,2 が実現されることを前提とし、機能 3 の“避難タイミングの調整”について検討を行う。災害時の避難を支援するためには、サーバを使わずに問題を解決する分散制約最適化問題 (DCOP) の枠組みが有効である [16]。機能 3 の避難タイミング調整を分散環境で実現するため、本研究ではこの調整に DCOP の枠組みを採用することにする。

3 分散制約最適化問題に基づく形式化

3.1 分散制約最適化問題

分散制約最適化問題 (Distributed Constraint Optimization Problem: DCOP) は分散環境における最適化問題のフレームワークであり、近年注目を集めている [19]。DCOP は次のように定義されている [3, 20]。変数の集合 x_1, x_2, \dots, x_n 、変数のそれぞれが値を取る有限で離散的な領域 D_1, D_2, \dots, D_n が与えられていて、それぞれの変数はエージェント a_1, a_2, \dots, a_m に割当てられているものとする。一部の変数間、 x_i と x_j の間にはコスト関数 $g_{ij} : D_i \times D_j \rightarrow \mathbb{R}^+$ による制約が与えられている。エージェント a_k は自分が持つ変数 x_k 、 x_k に関するコスト関数 g_{ij} 、およびコスト関数で関係するエージェントの通信先情報だけを持つ。この時、DCOP の目的はコスト関数の総和 $G(\mathcal{A}) = \sum g_{ij}(\mathcal{A})$ を最小化する変数の割当て \mathcal{A} を求めることである。DCOP では、変数が制約で結ばれたエージェント間で、変数の値をメッセージ通信で交換しながら問題を解く [19]。

DCOP の解法として代表的なものとして、ADOPT, OptAPO, DPOP, DSA などが提案されている他 [15, 14, 17, 20]、DCOP 近似解法を効率化する手法の提案もある [22]。

ADOPT や OptAPO は完全アルゴリズムであり、分散環境においても最適解が求められることが保証されている。しかしこれらの解法はエージェント数が増加すると処理時間が指数関数的に増加したり、あるいはメッセージ長や必要メモリが増大する傾向にある。災害避難という現実の切迫した状況では、より少ない計算資源で高速に解を得る必要があると考えられる。近似解法の DSA [20] は処理時間に対してコスト関数の総和がおおよそ単調減少することから、任意時間アルゴリズム (Anytime Algorithm) と分類されている。本研究では、避難誘導問題の解決に DSA などの近似解法を採用する。

3.2 避難誘導問題の形式化

避難誘導に分散制約最適化問題を適用するために、本研究では、避難誘導を以下のように形式化する [11]。

避難誘導を行う端末を持った避難者をエージェント $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ として扱う。これは基本的には、避難誘導を行う端末を持った避難者一人を、エージェ

ント一つに対応させるものである。ただし大規模な避難をモデル化する場合は、エージェント一つを複数の人から成るグループと捉えても良い。避難者が置かれている場所を避難元 \mathcal{P} とする。 \mathcal{P} をセルに分割し、これを $\mathcal{P} = \cup\{p_1, \dots, p_m\}$ とする。エージェント a_i が時間 t に、ある場所 p_i に位置しているとき、 $place(a_i, t) = p_i$ と記述する。分散制約最適化問題として扱うために、各エージェントは現在位置を変数として持っているものとする。このとき、エージェントの行動範囲は避難元 \mathcal{P} であるため、各変数 x_i の値域はすべて $\mathcal{D}(x_i) = \mathcal{P}$ となる。すべての避難していないエージェントの位置 \mathcal{L} を式 (1) のように表現する。

$$\mathcal{L}(t) := \cup\{place(a_i, t) \mid place(a_i, t) \in \mathcal{P}\} \quad (1)$$

現場の状況について、エージェント a_i はその場にいる近傍のエージェントの数 $nr(a_i)$ を検知する能力があるものとする。

災害時には状況は流動的であり、障害物が発生したり除去されたりするものとする。時刻 t において p_i に位置するエージェントが、時刻 $t+1$ に p_j へ移動可能とは、 p_i と p_j が隣接していて、セル間に障害物が存在せず、 p_j にも障害物が無い場合に可能とする。これを $movable(p_i, p_j, t) = true$ と記述することにする。

すべてのセル p_i はスコアを持つものとする。このスコアを $v(p_i) \in \mathbb{N}$ と表現する。スコアは避難元 \mathcal{P} では全て 0 以上の値を持つが、避難口に近いほど小さく、避難先の場所 \mathcal{Q} では全て 0 とする。エージェントはセルに対するスコアの割り当てを、各自の経路探索結果として独自に計算して記憶しているものとする。ただし本稿では簡単化のために、全エージェントのスコアの割り当ては共通していると仮定する。

以上の形式化により、セルは図 2 のようなグラフとして表現可能となる。この時、すべての避難していないエージェントが位置する場所のスコアの合計を使って f を次のように定義する。

$$f(\mathcal{A}, \mathcal{L}, t) := \sum_{\{a_i \mid place(a_i, t) \in \mathcal{P}\}} \frac{val(place(a_i, t))}{nr(a_i)} \quad (2)$$

式 (2) の分子はエージェント全体の避難に対する優先度をあらわし、分母は混雑を回避するための制限をあらわす。

本研究では、避難誘導は実時間タスクプランニングとして考える。避難開始から避難終了までの流れ

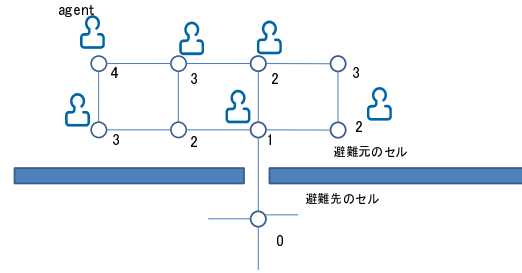


図 2: 避難問題の形式化

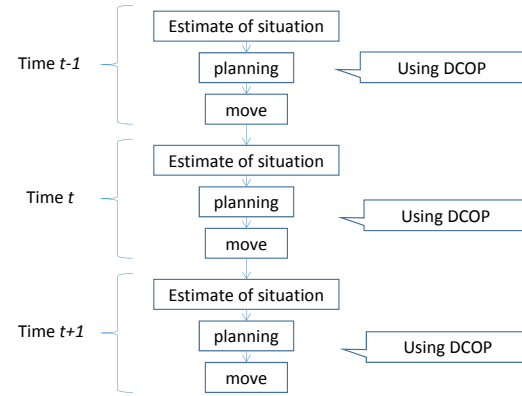


図 3: 実時間タスクプランニング問題

は、図 3 に示すように、この単純な避難誘導が連続したものとする。時刻 $t+1$ におけるエージェントの位置は、必ずしも時刻 t においてシステムが予定した移動位置とは限らないからである。すなわち、システムが知りえない事情によりエージェントの移動が阻害されたり、あるいはシステムの誘導に人が従わないことが考えられるため、毎時刻の状況把握が必要となる。

時刻 t における単純な避難誘導は、時刻 $t+1$ におけるすべての避難していないエージェントのスコアの合計を小さくする問題として捉える。避難誘導の目的を形式的に表現すると、式 (3) のようになる。

$$\arg \min_{\mathcal{L}} (f(\mathcal{A}, \mathcal{L}, t+1) - f(\mathcal{A}, \mathcal{L}, t)) \quad (3)$$

式 (3) の値は負値である。式 (3) を解くことにより、各エージェントの適切な避難タイミングを調整する。すなわち、ある時刻 t において、時刻 $t+1$ に同じ場所 p_i へ移動を計画するエージェント間で、どのエージェントが移動してよいかを調整する。

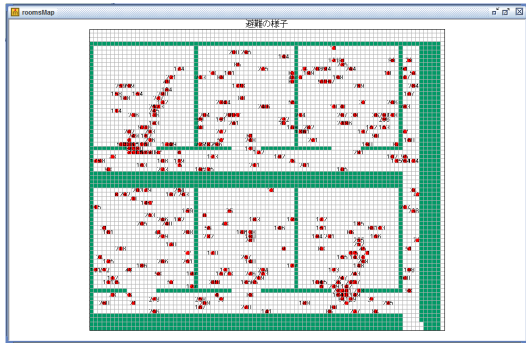


図 4: マルチエージェントシミュレーションによる効果の測定

4 DCOP 解法の違いによる避難時間短縮効果の検証

提案するシステムの効果の検証には、マルチエージェントシミュレーションを用いた。筆者らは、以前に提案した災害情報共有システム [7] の評価時には、被験者を集めて実際にシステムの情報を頼りに避難実験を行なった [24]。しかし今回提案するシステムの分散制約最適化手法適用の効果を計測するために実地実験を行おうとすると、渋滞が発生するだけの被験者を集める必要があり、しかもこれを幾度も実施しなければならない。被験者の“慣れ”が実験に影響しないようにするためには、非常に多くの被験者を集める必要があるが、これは現実的ではない。そこで今回は、マルチエージェントシミュレーションを採用し、効果について統計的な検証を試みることにした。

4.1 マルチエージェントシミュレーションの設計

避難誘導の形式化を基に、シミュレーションモデルを実装した。実装にはマルチエージェントシミュレータである Artisoc3.0 を使用した。

今回の実験では、大学の校舎から学生が避難する場合を想定した。現実の災害避難では複数の避難経路が用意されていて、避難者はそれぞれ異なる避難経路を選択することが想定される。しかし今回の実験では、通路が災害のため通れなくなり、避難経路が一つだけに限定された状況を仮定した。シミュレーションに用いた教室の配置を図 4 に示す。

エージェントの移動は、群衆歩行のモデルを採用した [9]。今回は避難者の心理的要素は考慮せず、誘導がある場合、避難者は誘導に従うものとした。今

表 1: 避難完了時間の比較

	平均 (秒)	分散	試行回数
誘導なし	299.2	49.1	100
誘導あり (近似解法)	271.9	80.8	100
誘導あり (厳密解法)	265.7	30.8	100

回のシミュレーションでは、避難者のグループを一つの単位として、これらグループ間で避難タイミングを調整することにした。グループは、避難開始時に同じ部屋にいた人達で構成される。これらグループ同士が分散制約最適化問題の近似解法を用いて避難開始タイミングを調整するものとする。

以上の避難経路上の移動、分散制約最適化手法による誘導、群衆歩行、物理的障害物などを階層的に実装し、シミュレーションを構築した。なお、今回のシミュレーション実験では、分散制約最適化問題の求解時間は考慮しないことにした。これは、エージェントの待ち時間に比べて求解時間が十分小さなものであるとの仮定による。

4.2 シミュレーション実験の結果と考察

今回の実験では以下の 3 つの条件で 100 回ずつシミュレーションを行い、避難開始から全員の避難が終了するまでの時間の平均と分散をとることにした。

条件 1 避難タイミングの調整を行わない場合。

条件 2 DCOP 解決に近似解法を用いて避難タイミングの調整を行った場合。

条件 3 DCOP 解決に厳密解法を用いて避難タイミングの調整を行った場合。

今回用いた制約条件では、ある時刻には横に並んだ 3 つの教室の 1 つだけから避難が行われることにした。条件 1 の避難タイミングの調整を行わない場合、全ての教室から一斉に避難が始まる。条件 3 の厳密解の場合、避難は横に並んだ 3 つの教室の 1 つだけから避難が開始されるが、条件 2 の場合、2 つの教室から避難が同時に行われる場合もある。

得られた計測結果を表 1 に示す。条件 1 と 2 の避難完了時間の分布の比較を図 5 に示す。t 検定の結果、条件 1 と 2 の平均には有意差が認められ、近似解法による誘導があった場合に避難時間が 10% 程度短縮されることが確認できた。

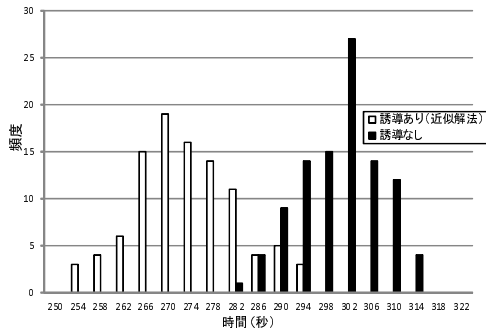


図 5: 避難完了時間の分布, 誘導ありなし

同様にして, 条件 2 と 3 の避難完了時間の分布を図 6 に示す. 条件 2 と 3 の平均にも有意差が認められたが, 今回の実験結果からは, その差は小さなものだった. これは, 今回のシミュレーション実験で用いた教室配置では渋滞ポイントが少なかったため, 条件 2 と 3 に大きな差が見られなかったものと思われる. 大きなビルからの避難など避難誘導の調整が複雑になると予想される場合には, 条件 2 と 3 に大きな差が出る可能性もある. 条件の複雑さと近似解法の有効性の関係については, 今後の研究課題としたい.

ところで, すべてのエージェントが避難し終わった時刻, すなわち, 避難完了時刻 t_f は次のように表せる.

$$t_f := \min(t) \mid \{a_i \mid \text{place}(a_i, t) \in P\} = \phi \quad (4)$$

本研究の最終目的は, 式 (4) の最小化を実現することであるが, 各時刻 t での式 (3) の最適化が必ずしも式 (4) を最小化するわけではないことに注意しなければならない. 今回の実験では, 避難経路が単純であったことから, 実時間タスクプランニングによる各時刻 t での式 (3) の最適化のみを検討した. 式 (3) と式 (4) の関係については今後の課題とした.

また今後, 避難誘導問題としては, 各エージェントの連続待ち時間や各エージェントの待ち時間の公平性についても検討する必要があるだろう.

5 関連研究

関連研究として, [12] は災害時の緊急対応方法の難しさと DCOP 応用可能性について考察を行なっている. 災害の時は, 中央機関からの指示が難しいことから, この問題が分散制約最適化問題 (DCOP) を使って解くのに適していることを述べている. [12] で提

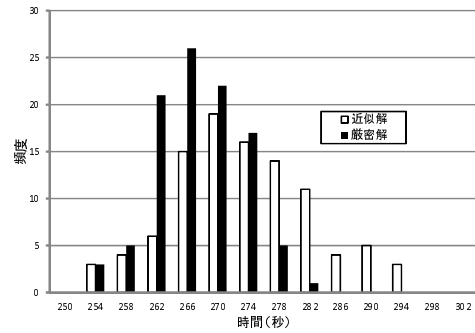


図 6: 避難完了時間の分布, 厳密解と近似解

案された問題を解決するために, [16] では DCOP の問題解決の枠組みを SDCOP に拡張し, これを解くためのアルゴリズムについて提案している. SDCOP は, 不確実な状況下において DCOP を適用するために, 確率的報酬を導入したものである. しかしこれらの研究は災害時緊急対応のリソース割当問題の解決に特化しており, 避難誘導については言及していない.

緊急時の避難誘導は, 一般に, 空間構造をグラフで表現することで, Dynamic Network Flow の問題として定式化することが可能である [5]. この問題を実用的時間で解くためにヒューリスティックアルゴリズムがいくつか提案されている [5, 13, 4]. しかしこれらのヒューリスティックアルゴリズムの研究は, 問題の解決と避難誘導を非分散環境 (情報を一箇所に集めたサーバ上) で行うことを前提としている. 本研究は, 問題解決を全て分散環境上で行うものである.

この他に非常に多くの災害避難におけるマルチエージェントシミュレーションの研究が存在するが, その多くは現象や避難方法等のシミュレーションである [2, 6, 18]. 本研究は避難誘導システムのアルゴリズムの効果をシミュレーション実験によって確認するものである.

一方, DCOP の研究では近年, 近似解の最適性の指標として k -optimality, t -optimality, C -optimality などが提案されている [1, 10, 21]. これらは問題の構造を基礎にして, 近似解の質についての数学的な指標を厳密に与えるものである. しかし DCOP を使って現実世界の問題を解く時に, これらの指標がどのようなインパクトを持つかはそれほど明らかになっていない. 一方, 本研究では, 近似解を実世界の問題に適用した場合について, マルチエージェン

トシミュレーションを使った評価を行なっている点でユニークなものとなっている。

6 おわりに

本研究は、災害発生時に、自律分散的に最適な避難誘導を行うシステムの開発を目標とするものである。本稿では局所的な避難誘導の問題を DCOP で定式化し、これを近似解法で解く方法について検討した。マルチエージェントシミュレーションを用いた実験では、DCOP による避難誘導を行うことで、全体の避難時間を 10%程度短縮できることが確認できた。また、DCOP を解くのに近似解法を用いた場合でも、避難時間に与える影響は小さなものであった。

もちろん本研究はその端緒についたばかりであり、本稿におけるモデル化も非常に単純なものである。今後は避難経路や条件について、より現実的なモデルを導入するとともに、エージェントの連続待ち時間や待ち時間の公平性、実時間タスクプランニングの妥当性などについて研究を進めるつもりである。

参考文献

- [1] Emma Bowring, Jonathan P Pearce, Christopher Portway, Manish Jain, and Milind Tambe. On k-optimal distributed constraint optimization algorithms: New bounds and algorithms. In *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems - Volume 2*, AAMAS '08, pp. 607–614, Richland, SC, 2008. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- [2] Carsten Burstedde, Kai Klauck, Andreas Schadschneider, and Johannes Zittartz. Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 295, No. 3, pp. 507–525, 2001.
- [3] Stephen Fitzpatrick and Lambert Meertens. An experimental assessment of a stochastic, anytime, decentralized, soft colourer for sparse graphs. In *1st Symposium on Stochastic Algorithms: Foundations and Applications*, pp. 49–64, 2001.
- [4] Tarik Hadzic, Kenneth N Brown, and Cormac J Sreenan. Real-time pedestrian evacuation planning during emergency. In *Tools with Artificial Intelligence (ICTAI), 2011 23rd IEEE International Conference on*, pp. 597–604. IEEE, 2011.
- [5] Horst W Hamacher and Stevanus A Tjandra. Mathematical modelling of evacuation problems—a state of the art. *Pedestrian and evacuation dynamics*, Vol. 2002, No. 227-266, pp. 1–2, 2002.
- [6] Dirk Helbing, Illes Farkas, and Tamas Vicsek. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, Vol. 407, No. 6803, pp. 487–490, 2000.
- [7] Kayo Iizuka, Yasuki Iizuka, and Kyoko Yoshida. A real-time disaster situation mapping system for university campuses. In A. Ozok and Panayiotis Zaphiris, editors, *Online Communities and Social Computing*, Vol. 6778 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 40–49. Springer Berlin / Heidelberg, 2011.
- [8] Yasuki Iizuka, Kyoko Yoshida, and Kayo Iizuka. An effective disaster evacuation assist system utilized by an ad-hoc network. In Constantine Stephanidis, editor, *HCI International 2011*, Vol. 174 of *Communications in Computer and Information Science*, pp. 31–35. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [9] Toshiyuki Kaneda and Daichi Okayama. A pedestrian agent model using relative coordinate systems. In *Agent-Based Approaches in Economic and Social Complex Systems IV*, pp. 63–70. Springer, 2007.
- [10] Christopher Kiekintveld, Zhengyu Yin, Atul Kumar, and Milind Tambe. Asynchronous algorithms for approximate distributed constraint optimization with quality bounds. In *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: Volume 1 - Volume 1*, AAMAS '10, pp. 133–140, Richland, SC, 2010. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- [11] K. Kinoshita, K. Iizuka, and Y. Iizuka. Effective disaster evacuation by solving the distributed constraint optimization problem. In *Advanced Applied Informatics (IIAIAI), 2013 IIAI International Conference on*, pp. 399–400, Aug 2013.
- [12] Robert N Lass, Joseph B Kopena, Evan A Sul-tanik, Duc N Nguyen, Christopher P Dugan, Pragnesh J Modi, and William C Regli. Coordination of first responders under communication and resource constraints. In *Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems-Volume 3*, pp. 1409–1412. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2008.
- [13] Qingsong Lu, Betsy George, and Shashi Shekhar. Capacity constrained routing algorithms for evacuation planning: A summary of results. In *Advances in spatial and temporal databases*, pp. 291–307. Springer, 2005.
- [14] Roger Mailler and Victor Lesser. Solving distributed constraint optimization problems using cooperative mediation. In *in Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, pp. 438–445. IEEE Computer Society, 2004.
- [15] Pragnesh Jay Modi, Wei-Min Shen, Milind Tambe, and Makoto Yokoo. Adopt: asynchronous

- distributed constraint optimization with quality guarantees. *Artif. Intell.*, No. 161, pp. 149–180, 2005.
- [16] Duc Thien Nguyen, William Yeoh, and Hoong Chuin Lau. Stochastic dominance in stochastic dcops for risk-sensitive applications. In *Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 1*, pp. 257–264. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2012.
- [17] Adrian Petcu and Boi Faltings. A scalable method for multiagent constraint optimization. In *IJCAI*, Vol. 5, pp. 266–271, 2005.
- [18] Jianyong Shi, Aizhu Ren, and Chi Chen. Agent-based evacuation model of large public buildings under fire conditions. *Automation in Construction*, Vol. 18, No. 3, pp. 338–347, 2009.
- [19] M. Yokoo and K. Hirayama. Algorithms for distributed constraint satisfaction: A review. In *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol. 3, pp. 198–212, 2000.
- [20] Weixiong Zhang, Guandong Wang, Zhao Xing, and Lars Wittenburg. Distributed stochastic search and distributed breakout: properties, comparison and applications to constraint optimization problems in sensor networks. *Artif. Intell.*, No. 161, pp. 55–87, 2005.
- [21] 沖本天太, ジョヨンジュン, 岩崎敦, 横尾真. 擬似木に基づく分散制約最適化問題の精度保証付き非厳密解法の提案. 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 12, pp. 3786–3795, dec 2011.
- [22] 飯塚泰樹, 竹内郁雄. 分散制約最適化問題近似解法の多重実行の効果. 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 12, pp. 3136–3149, 2009.
- [23] 明広藤原, 弘佳巳波. すれちがい通信を利用した災害時避難誘導法. 電子情報通信学会論文誌. B, 通信, Vol. 96, No. 6, pp. 580–588, jun 2013.
- [24] 鈴木積規, 石川雅之, 飯塚泰樹, 吉田享子, 飯塚佳代. 共助を支援する防災マップシステムの提案目的地へ到達するパスの妥当性からの評価. 日本災害情報学会第 13 回学会大会予稿集, pp. 371–376, 2011.