

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 23 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22700010

研究課題名（和文）永続的なネットワーク動的変動のもとで有効に動作する分散アルゴリズムの実現

研究課題名（英文）Designing distributed algorithms running on continuous network dynamics

研究代表者

泉 泰介 (IZUMI TAISUKE)

名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20432461

研究成果の概要（和文）：P2P環境やモバイル環境等の、ネットワーク動的変化(計算機の参加、離脱、および接続リンクの変化等)が絶え間なく生じる環境における分散アルゴリズムの設計法について、新しい理論モデルの探求等を通じて研究を行った。特に、近年注目を集める個体群モデルや自律分散ロボット等のアルゴリズム設計、またPeer-to-peer型のシステムにおける基盤技術であるオーバレイネットワークの設計手法等について新たな結果を得た。

研究成果の概要（英文）：We studied distributed algorithms for the networks that continuously and dynamically changes their topological properties, such as mobile wireless systems and P2P systems. In particular, focusing on theoretical models recently emerging, we developed several new algorithms. Our research topics include autonomous mobile robots, overlay design, and population protocol models.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：分散アルゴリズム

科研費の分科・細目：情報学基礎、情報学基礎理論

キーワード：アルゴリズム/情報基礎/分散システム

1. 研究開始当初の背景

近年の無線通信環境の整備に伴い、地理的な移動を伴う端末(モバイル端末)群の上で構成される分散システムが発展を続けており、モバイルネットワーク上で効率的に動作する分散アルゴリズムの実現が求められている。モバイル通信網に対する分散アルゴリズムの設計における困難性の主要因は、端末の

地理的移動によるネットワーク構造の動的変化(計算機の参加、離脱、あるいはリンク接続関係の変化)への対処である。動的変化への適応性を有する分散アルゴリズムの研究は従来より盛んに行われている研究テーマの一つであるが、理論的側面から見たとき、既存の研究結果は必ずしも成功を収めているとは言い難い状況にある。その理由は、既存のアルゴリズムの多くが、永続的な動的変

化のもとで性能が保証されない、すなわち「いかなる動的変化のもとでもアルゴリズムが破綻することはないが、性能は動的変化の存在しない状況でのみ保証される」というスタンスに基づいて設計されるという点にある。しかしながら、実モバイルシステムにおいて、動的変化は絶え間なく生じているのが常であり、そのような環境下においては上記スタンスに基づくアルゴリズムの性能保証は失われる。

2. 研究の目的

本研究では、上記のような背景を動機として、永続的な動的変化のもとで性能が保証可能な分散アルゴリズムの設計・評価手法の確立を目指し研究を遂行した。具体的な研究テーマとしては、以下の2テーマ掲げた。

(テーマ1) システム動的変化の強度とアルゴリズム性能のトレードオフの解明：ネットワークの動的変化は、端末利用ユーザの意思・行動によって決定され、アルゴリズムにとって制御不能、予測不能な現象である。そのため、アルゴリズム設計の立場からは、理想的には起こりえるあらゆる動的変化に対応可能なように設計を行う必要があるが、一般にそのような前提の元での効率的な分散アルゴリズムの実現はほぼ絶望的である。しかしながら、現実のシステムで実際に生じる動的変化において、それほど極端なケースが生じることはまれであり、ある種の「穏やかな変化」をモデル化した仮定を課すことは妥当であると考えられる。本テーマでは、ネットワークの動的変化の強度を定量的に評価可能なモデルを構築することにより、動的変化強度とアルゴリズム性能のトレードオフを解明し、永続的な動的環境における分散アルゴリズムに対する理論的に証明可能な性能保証を与えることを目指す。

(テーマ2) ネットワーク動的変化を積極的に利用した分散アルゴリズムの設計：近年、本研究のテーマと目的を同じくして、分散システムのネットワークの動的変動を積極的に利用する分散アルゴリズム、およびそのための理論モデルが提案されている。モバイル環境等においては、自身に隣接するノードが計算機自身の移動により頻繁に入れ替わるといった現象が生じる。このことは一般にアルゴリズム設計の困難性として認識されるが、その一方で、ある種の応用に対してはこの現象が有用に働く場合がある。例えば、情報散布等においては、隣接ノードが絶え間なく入れ替わることでより高速な散布が行われること期待できる。実際、永続的な動的変化がアルゴリズムの正常動作に本質的に深く影響

するような手法が、新しい設計パラダイムとして注目を集めている。しかしながら、このようなアルゴリズムの効率的な設計のために、従来理論とは全く異なったアプローチが必要となる。

上記のような動的変化を積極的に利用したモデルとして、個体群プロトコルおよび自律分散ロボット群により構成されるネットワークを挙げることができる。これらのモデル上においては、既存の分散アルゴリズム理論が通用しない一方、その計算可能性および複雑性の議論には未解明な部分が多い。

本研究では、これら動的環境のための理論モデル上での問題の可解性、およびその複雑さを明らかにすることで、その上での分散アルゴリズム設計の指針を確立することを目指す。

3. 研究の方法

前節にて述べたテーマに従い、具体的に研究対象とする問題の選定を行い、その解決に向け研究を遂行した。以下、研究過程において本研究課題において遂行した研究内容の概要を示す。

(1) 動的環境におけるオーバーレイ設計に関する諸問題の解決：分散的に配置された大規模データ群を高速に検索・取得するための手法として、オーバーレイネットワークを用いる手法が注目を集めている。特に、分散型のデータ構造、あるいは非集中型の配信システム等において、ある種の構造を持つオーバーレイネットワークを効率的に構成することは基本的な技術として理論・応用の両面において重要視されている。オーバーレイネットワークの構成においては、環境の動的な変化により生じるリンク切断等に対処するために、ある程度の冗長性が付与されることが常であるが、動的変化に対する追従性とリンク冗長性の間にはトレードオフの関係があり、どの程度の冗長性が必要かどうかということに関しての定量的な研究は進んでいない。本研究では、冗長性と動的変化強度の間のトレードオフを解明することで、より効率的なオーバーレイ構成法の実現を目指す。

(2) 自己安定個体群プロトコルモデルの計算能力解析：個体群プロトコルモデルとは、空間中を自律的に移動するエージェント群が「衝突」(=二つの端末が互いに相手の通信圏内に入り、情報を交換)し、状態を変化させてゆくことにより協調が行われるモデルであり、動的変化の激しい分散システムのモデル化として有望視されている。本研究では、特に、個体群プロトコルモデル上の自己安定アルゴリズムに注目する。自己安定アルゴリズムは、任意の初期状況からの正しい復帰が保

証されるアルゴリズムであり、分散アルゴリズムの設計パラダイムの一つとして、これまでに多くの研究成果が発表されている。しかし、個体群プロトコルモデル上での自己安定性アルゴリズムについては、その計算能力限界、およびメモリ・通信複雑度に関する議論の多くが未解決である。本研究では、個体群プロトコルモデル上における自己安定アルゴリズムの計算限界の解明を通じて、同アルゴリズムの効率的な設計法を構築することを目標とする。

(3) 自律分散ロボット群制御に対する分散アルゴリズムとその計算複雑性の解明：複数の自律分散ロボット群が協調動作するシステムは分散システムの新たなパラダイムとして注目を集めている。アドホック通信網によるコミュニケーションにより協調するロボットシステムは一種のモバイルネットワークと見なすことができるが、その動的変化(端末の移動)がある程度システム自身にコントロール可能という点で、既存のモバイル通信のモデルとは大きな相違がある。そのため、ロボットネットワーク上での分散アルゴリズムは、各ロボットの移動を積極的に制御することで、その上でのネットワークが最適化されることが期待できる。本研究では、ロボットネットワーク上の諸問題をロボット群の移動計画問題と見なし、その分散アルゴリズムの実現、計算限界について研究を行う。

4. 研究成果

前節で述べた各研究課題について、本研究で得られた成果を述べる。

(1) 動的環境におけるオーバレイ設計に関する諸問題の解決：本テーマに対して得られた結果を以下に示す。

①複数のコミュニティが混在する環境下でのオーバレイ構成法の計算量理論的解析：複数コミュニティが混在する環境下におけるオーバレイの構成においては、各コミュニティのオーバレイがその機能を一部共有化することで系全体の効率化を図ることができる。そのようなオーバレイの構成はある種の最適化問題として定式化することができるが知られているが、本論文はその困難性について詳細な解析を行った。

②アドホック通信網における木通信網のための証明書配置法：アドホック通信において安全な通信を実現するうえで、動的に変化する通信相手の信頼性をどのように担保するかということは重用な問題である。通常、通信相手の信頼性は第三者により電子署名された証明書を発行することで保証されるが、通信相手が時々刻々と変わるアドホック通

信網においては系内の全相手に対して証明書を保有することは現実的ではない。本論文は、証明書チェーンと呼ばれる手法を用いた安全な通信チャンネルの確立手法を、組み合わせ最適化の観点から検討し、木構造を持つ通信パターンに対する最適な証明書配付アルゴリズムを提案した。

③2分探索木オーバレイの頑健な構成：2分木トポロジは、オーバレイネットワークにおける基本的な構造の一つとして重要である一方、動的変化や計算機の離脱、故障等での可用性の低下という欠点を有する。本研究では、エキスパンダーグラフと呼ばれるグラフの特徴を利用した、動的に変化するネットワーク環境下での動的再構成が容易な2分木トポロジオーバレイネットワークの構成・維持プロトコルを提案した。

(2) 自己安定個体群プロトコルモデルの計算能力解析：個体群プロトコルモデルにおける研究を行い、以下の2つの結果を得た。

①非集中型自己安定リーダー選挙問題の可解性および空間複雑さの解明：当該問題に対する必要メモリ量の下界を示すとともに、対応するタイトな上界を持つアルゴリズムを設計した。また、下界の証明において、個体群プロトコルモデルにおける新たな証明の手法を示した。

②基地局による個体群計数問題の空間複雑性の改善：個体群プロトコルモデルのバリエーションのひとつである基地局付きモデルにおけるノード計数問題に対し、既存の手法よりも少ないメモリ量で動作するアルゴリズムを新たに設計した。

(3) 自律分散ロボット群制御に対する分散アルゴリズムとその計算複雑性の解明：本研究においては、特にロボットの能力に制限を仮定した場合における、各種協調問題の可解性について研究を行った。具体的な成果を以下に挙げる。

①ロボットが観測誤差を持つ場合の一点集合および一点収束問題の可解性についての研究：分散計算におけるロボットの理論モデルにおいては、各ロボットが他のロボットの位置を観測し、その配置に基づき自身が動作を決定する。本研究では他のロボットの位置の観測が誤差を含むモデルを考え、誤差の強度と問題可解性とのトレードオフを解明した。

②局所情報のみを用いた拡散問題の解法：自身に十分近接しているロボットのみが位置を観測可能とするモデル(局所可視モデル)におけるロボットの拡散問題について、新しいアルゴリズムを得ると同時にその時間計算量の複雑性について検討を行った。

③悪意を持ったロボット(ビザンチン故障ロ

ボット)の存在下での問題可解性:一点集合問題、およびより一般的な問題である形状形成問題について、ビザンチン故障ロボットが混在する環境での問題の強い非可解性を始示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 16 件)

① Tai suke Izumi, Tomoko Izumi, Sayaka Kamei, Fukuhi to Oosita, "Feasibility of Polynomial-time Randomized Gathering for Oblivious Mobile Robots", IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol. 24, No. 4, pp. 716-723, Apr. 2013.
DOI: 10.1109/TPDS.2012.212

② Kenta Yamamoto, Tai suke Izumi, Yoshiaki Katayama, Nobuhiro Inuzuka, Koichi Wada, "The Optimal Tolerance of Uniform Observation Error for Mobile Robot Convergence", Theoretical Computer Science, Vol. 444, No. 27, pp. 77-86, July 2012.
DOI: 10.1016/j.tcs.2012.04.038

③ Fukuhi to Oosita, Tomoko Izumi, Tai suke Izumi, "The price of multi-organization constraint in unrelated parallel machine scheduling", Parallel Processing Letters, Vol. 22, No. 2, June 2012.
DOI: 10.1142/S0129626412500065

④ Tai suke Izumi, Tomoko Izumi, Hirotaka Ono, Koichi Wada, "Minimum Certificate Dispersion with Tree Structure", 9th annual conference on Theory and Applications of Models of Computation (TAMC), Vol. 7287 of LNCS, pp. 548-559, May 2012.
DOI: 10.1007/978-3-642-29952-0_51

⑤ Jun Hosoda, Juraj Hromkovic, Tai suke Izumi, Hirotaka Ono, Monika Steinová, Koichi Wada, "On the Approximability of Minimum Topic Connected Overlay and Its Special Instances", Theoretical Computer Science, Vol. 429, pp. 144-154, Apr. 2012.
DOI: 10.1016/j.tcs.2011.12.033

⑥ Tai suke Izumi, Samia Souissi, Yoshiaki Katayama, Nobuhiro Inuzuka, Xavier Defago, Koichi Wada, Masafumi Yamashita, "The Gathering Problem for Two Oblivious Mobile Robots with Unreliable Compasses", SIAM

Journal on Computing, Vol. 41, No. 1, pp. 26-46, Jan. 2012.
DOI: 10.1137/100797916

⑦ Cai Shukai, Tai suke Izumi, Koichi Wada, "How to Prove Impossibility under Global Fairness: On Space Complexity of Self-Stabilizing Leader Election on a Population Protocol Model", Theory of Computing Systems, Vol. 50, No. 3, pp. 433-445, Jan. 2012.
DOI: 10.1007/s00224-011-9313-z

⑧ Nazreen Banu, Tai suke Izumi, Koichi Wada, "Adaptive and Doubly-Expedited One-Step Consensus in Byzantine Asynchronous Systems", Parallel Processing Letters, Vol. 21, No. 4, pp. 461-477, Dec. 2011.
DOI: 10.1142/S0129626411000321

⑨ Tai suke Izumi, Zohir Bouzid, Sébastien Tixeuil, Koichi Wada, "The BG-simulation for Byzantine Mobile Robots", 25th International Symposium on Distributed Computing (DISC), Vol. 6950 of LNCS, pp. 330-331, Sep. 2011 (Brief Announcement).
DOI: 10.1007/978-3-642-24100-0_32

⑩ Tai suke Izumi, Maria Gradinariu Potop-Butucaru, Mathieu Valero, "Physical Expander in Virtual Tree Overlay", 25th International Symposium on Distributed Computing (DISC), Vol. 6950 of LNCS, pp. 82-96, Sep. 2011.
DOI: 10.1007/978-3-642-24100-0_6

⑪ Samia Souissi, Tai suke Izumi, Koichi Wada, "Oracle-Based Flocking of Mobile Robots in Crash-Recovery Model", Theoretical Computer Science, Vol. 412, No. 33, pp. 4350-4360, July 2011.
DOI: 10.1016/j.tcs.2010.11.011

⑫ Jun Hosoda, Juraj Hromkovic, Tai suke Izumi, Hirotaka Ono, Monika Steinová, Koichi Wada, "On the Approximability of Minimum Topic Connected Overlay and Its Special Instances", 36th International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science (MFCS), Vol. 6907 of LNCS, pp. 376-387, Aug. 2011.
DOI: 10.1007/978-3-642-22993-0_35

⑬ Keigo Kinpara, Tomoko Izumi, Tai suke Izumi, Koichi Wada, "Improving Space Complexity of Self-stabilizing Counting

on Mobile Sensor Networks", 14th International Conference on Principle of Distributed Systems (OPODIS), Vol. 6430 of LNCS, pp. 504-515, Dec. 2010.
DOI: 10.1007/978-3-642-17653-1_36

⑭ Taisuke Izumi, Maria Gradinariu Potop-Butucaru, Sébastien Tixeuil, "Connectivity-Preserving Scattering of Mobile Robots with Limited Visibility", The 12th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS), Vol. 6366 of LNCS, pp. 319-331, Sep. 2010.
DOI: 10.1007/978-3-642-16023-3_27

⑮ Nazreen Banu, Taisuke Izumi, Koichi Wada, "Doubly-Expedited One-step Byzantine Consensus", The 40th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN 2010), pp. 373-382, June 2010.
DOI: 10.1109/DSN.2010.5544293

⑯ Tomoko Izumi, Taisuke Izumi, Sayaka Kamei, Fukuhito Ooshita, "Mobile Robot Gathering Algorithm with Local Weak Multiplicity in Rings", 17th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO), Vol. 6058 of LNCS, pp. 101-113, May 2010.
DOI: 10.1007/978-3-642-13284-1_9

[学会発表] (計 11 件)

① 泉 泰介, "完全ネットワーク上で最小生成木問題を解く新しい分散アルゴリズム", 2012 年夏の LA シンポジウム, 2012 年 7 月 18 日, 兵庫.

② 泉 泰介, "Minimum Certificate Dispersal with Tree Structure", 9th annual conference on Theory and Applications of Models of Computation, 2012 年 5 月 17 日, 北京, 中国.

③ 泉 泰介, "The BG-simulation for Byzantine Mobile Robots", 25th International Symposium on Distributed Computing, 2011 年 9 月 21 日, ローマ, イタリア.

④ 泉 泰介, "Physical Expander in Virtual Tree Overlay", 25th International Symposium on Distributed Computing, 2011 年 9 月 20 日, ローマ, イタリア.

⑤ Monika Stei nova, Taisuke Izumi, "On the Approximability of Minimum Topic Connected Overlay and Its Special Instances", 36th International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science(MFCS), 2011 年 8 月 25 日 ワルシャワ, ポーランド.

⑥ 泉 泰介, "実レイヤーがエキスパンダー構造を持つ木オーバーレイの構成", 2011 年夏の LA シンポジウム, 2011 年 7 月 21 日, 静岡.

⑦ 金原圭吾, 泉 泰介, "Improving Space Complexity of Self-stabilizing Counting on Mobile Sensor Networks", 14th International Conference on Principle of Distributed Systems (OPODIS), 2010 年 12 月 14 日, トブル, チュニジア.

⑧ 泉 泰介, "Connectivity-Preserving Scattering of Mobile Robots with Limited Visibility", The 12th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS), 2010 年 9 月 21 日, ニューヨーク, 米国.

⑨ 泉 泰介, "ビザンチン故障を含むロボット群の一点集合問題に対する強い不可能性", 2010 年夏の LA シンポジウム, 2010 年 7 月 20 日, 富山.

⑩ 泉 泰介, "Doubly-Expedited One-step Byzantine Consensus", The 40th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN), 2010 年 6 月 29 日, シカゴ, 米国, .

⑪ 亀井 清華, 泉 泰介, "Mobile Robot Gathering Algorithm with Local Weak Multiplicity in Rings", 17th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO), 2010 年 6 月 10 日, シリンズ, トルコ.

[図書]
なし

[産業財産権]
なし

[その他]
なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

泉 泰介 (IZUMI TAI SUKE)

名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20432461

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし