

令和 3 年 5 月 25 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18000

研究課題名（和文）「ゆらぎ」を用いて外乱に高速に適應する動的ネットワークに関する研究

研究課題名（英文）Research on fluctuated dynamic networks that quickly adapt to disturbance

研究代表者

首藤 裕一（Sudo, Yuichi）

大阪大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：50643665

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：近年のIoTデバイスの隆盛や分子ロボティクス研究の発展により、IoTデバイスによるセンサネットワークや多数の分子デバイスからなる分子ロボットなどの、個々の計算資源は乏しいが膨大な数の移動ノードで構成される動的ネットワークの社会的需要が高まっている。一方で、このようなネットワークはノードの故障や外部からの攻撃などの外乱に対して脆弱であるという課題があった。この課題に対し、本研究は、外乱発生時に自律的かつ高速にネットワークを正常状態に復旧するアルゴリズムの開発にはじめて成功した。また、このアルゴリズムを検討する過程において、関連する計算モデルにおけるさまざまな未解決問題を解決することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「研究成果の概要」欄に記載した性質を持つ動的ネットワークは、個体群プロトコルモデルと呼ばれる計算モデルとして抽象化されて近年盛んに研究されている。一方で、外乱への耐性をネットワークに持たせるために多くの研究者が実現を検討する自己安定性（どのような異常状態に陥っても正常状態に復旧する性質）を持つアルゴリズムは、個体群プロトコルモデル上では主要なタスクに対し実現不可能であることが証明されている。このことは、このモデルの社会的実装において致命的な問題となる。本研究で開発した自律的かつ高速に正常状態に復旧するアルゴリズムは、この致命的な問題を低コストで解消するものであり、高い学術的・社会的意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：In recent years, with the rise of IoT devices and the development of molecular robotics research, there has been a growing social demand for dynamic networks consisting of a huge number of mobile nodes with limited computational resources, such as sensor networks with IoT devices and molecular robots consisting of a large number of molecular devices. On the other hand, such networks are vulnerable to disturbances such as node failures and external attacks. To address this issue, we have developed an algorithm that can autonomously and rapidly restore the network to a normal state after a disturbance occurs. In the process of developing this algorithm, we have also solved various open problems in the related computational models.

研究分野：分散計算理論

キーワード：個体群プロトコルモデル 自己安定 緩安定 障害耐性

1. 研究開始当初の背景

近年のIoTデバイスの隆盛や分子ロボティクス研究の発展により、IoTデバイスによるセンサネットワークや多数の分子デバイスからなる分子ロボットなどの、個々の計算資源は乏しいが膨大な数の移動ノードで構成される動的ネットワークの社会的需要が高まっている。このような動的ネットワークの代表的な計算モデルとして個体群プロトコルモデル（英：population protocols, 以下、個体群モデル）がある。本モデルは2004年に定式化・提案されてから多方面で盛んに研究が行われており、各ノードの計算資源が小さくともネットワーク全体で協調動作することにより高い計算能力を有することが証明されるなど、個体群モデルの研究を通じて動的ネットワークの有用性が次々と明らかにされている。一方で、個体群モデルはノードの故障や外部からの攻撃などの外乱に対して脆弱であるという課題がある。具体的には、外乱への耐性をネットワークに持たせるために多くの研究者が実現を検討する自己安定性（外乱発生によってネットワークがどのような状態に陥っても自律的に正常動作に復帰できることを保証する性質）を有するアルゴリズムは、個体群モデル上では多くの主要なタスクについて実現不可能であることが証明されている。このことは、動的ネットワークの社会的実装を考慮した際に致命的な問題となる。なぜなら、膨大な数の低廉なノードで構成される動的ネットワークにおいては、ノードの自然故障などの外乱が高頻度で発生することは避けられないからである。

2. 研究の目的

本研究は、前記項目に記載した個体群モデルの工学的課題を解決するため、自己安定性の厳密な理論的要件を一部緩和することにより、外乱に対して実用上十分な耐性を動的ネットワークに持たせることが可能であるかという学術的「問い」を探求する。ここでいう外乱に対する実用上十分な耐性とは、以下の2つの性質である。

性質 1. 外乱発生によってネットワークが異常状態に陥っても正常動作を行う状態（正常状態）に自律的に復旧する（自己安定性）。

性質 2. 想定される外乱の発生間隔に比べて上記復旧時間が十分に短い（早期復旧）。

前項で触れたように、性質 1 の自己安定性の実現は多くのタスクに対して不可能であることが証明されている。一方で、研究代表者は本研究の申請前に、自己安定性の要件を部分的に緩和した緩安定性（英：loose-stabilization）という概念を導入することでこの問題を解決し、性質 1 を満たすアルゴリズムの開発に成功している。一方で、本研究の開始時点では性質 2 を満たすアルゴリズムは存在しなかった。本研究の目的は、換言すると、個体群モデル上で上の2つの性質をともに満たすアルゴリズムの実現可能性を探求することである。

3. 研究の方法

前記項目に記載した性質 1 を満たすために研究代表者が過去に導入した「緩安定」とは、簡潔に表現すると、自律復旧完了後に再び異常状態に陥る「ゆらぎ」をわずかな確率で許容することで従来不可能であった「いかなる異常状態からの自律復旧」を達成するアプローチである。具体的には、緩安定性とは自己安定性の要件を以下の表のように緩和するものである。

自己安定性	収束性	どのような状態に陥っても正常状態に自律復旧する
	閉包性	復旧後、新たな外乱が発生するまでは常に正常状態を維持する
緩安定性	収束性	どのような状態に陥っても正常状態に自律復旧する
	閉包性	復旧後、新たな外乱が発生しない限り十分に長いあいだ正常状態を維持する

自己安定性は、自律復旧完了後は再度外乱が発生するまで正常状態を常に維持し続けることを要求するのに対し、緩安定性は自律復旧が完了した後に新たな外乱が発生しない限り十分に長いあいだ正常状態を維持すればそれで良いとする。

本研究の特色は、「ゆらぎ」を許容した緩安定のアプローチで上記の性質 1 を実現しつつ、性質 2 の早期復旧の実現を狙うところにある。個体群モデルにおいて外乱耐性のあるアルゴリズム

ムはいくつか提案されてきたが、実現自体が極めて困難であるために実現の可否のみに研究の焦点があてられ、実現できた場合も復旧時間が長大となることが多かった。たとえば、これまでに提案された緩安定アルゴリズムはすべて、外乱によって陥った異常状態からの復旧に要する時間が線形時間（ノード数 n に対して $O(n)$ ）あるいはそれ以上の時間となる。自律復旧時間が外乱の平均発生間隔を超過してしまうと系全体の安定動作が崩壊するため、ノード数の増加に対する復旧時間の増加を可能な限り抑制して高速な自律復旧を実現することは実用上重大な課題であり、取り組む意義は大きい。

4. 研究成果

主な研究成果を以下に示す。

(1) 個体群モデル上で外乱からの高速な自律復旧を実現するアルゴリズムの開発：

2 節に記載した本研究の主問題、すなわち、外乱に対して実用上十分な耐性を（個体群モデルで表現される）動的ネットワークに持たせることが可能であるかという学術的「問い」を肯定的に解決した。具体的には、ネットワーク中のただひとつのノードにリーダーの役割を持たせるリーダー選挙問題を解く高速な緩安定アルゴリズムの考案に成功した。従来のアルゴリズムは外乱からの自律復旧に線形時間（ノード数 n に対して $O(n)$ ）を要したが、本アルゴリズムは対数多項式時間（ $O(\log^3 n)$ ）で自律復旧を行う。この高速化は劇的なものである（ノード数 n が大きいとき、前者が数週間、後者が数秒ということもあり得る）。他の分散計算モデルと同様に、個体群モデルの多くのアルゴリズムはネットワーク中に唯一のリーダーが存在することを前提とし、そのリーダーが中心的な役割を果たすことで正しい動作を実現する。たとえば、リーダーがただひとつ存在することを前提として、Presburger 算術で定義できる任意の述語論理式を高速に計算するアルゴリズムが存在する。したがって、ただひとつのノードにリーダーの役割を割り当てるリーダー選挙問題は、個体群モデルにおいて多くの既存アルゴリズムが依拠する最も重大かつ基本的な問題のひとつといえる。したがって、この成果は、個体群モデルの実用化に対して極めて大きく貢献するものであるといえる。

(2) 個体群モデル上で極限まで高速化したリーダー選挙アルゴリズムの開発：

上記の主問題に取り組む過程で、障害耐性を持たないが理論上これ以上高速化できない、極限まで高速化したリーダー選挙アルゴリズムを開発することに成功した。具体的には、実行開始から対数時間でただひとつのリーダーを選出して安定するリーダー選挙アルゴリズムを考案するとともに、いかなるアルゴリズムも対数時間を下回る時間でリーダー選挙を解くことができないことを証明した。上述の通り、リーダー選挙アルゴリズムは個体群モデルにおいて最も基本的かつ重要な問題のひとつであり、その計算量の削減は個体群モデルの研究において主戦場であった。この成果は、多くの研究者が取り組んできた個体群モデル上のリーダー選挙問題の時間計算量の削減に終止符を打つものであり、その学術的意義は大きい。

(3) ノードの接続関係を一般化した個体群モデルにおける頑健性の研究：

上記の個体群モデルでは、任意のノード対が相互に通信可能であるという前提において各種問題の計算量が考察されることが一般的である。一方で、相互に通信可能なデバイス対を制限し、通信可能なデバイス対を表現するグラフの形状に応じて各種問題の計算量を考察することも近年盛んに行われている。本研究では、いかなる形状のネットワークにおいても動作する障害耐性付きのリーダー選挙アルゴリズムを与えるとともに、そのアルゴリズムの実行がいかなる異常状況からも多項式時間で収束することを証明することに成功した。

(4) 他の関連する計算モデルにおける未解決問題の解決：

上記(1)～(3)の研究に取り組む過程で、個体群モデルだけではなく、関連する計算モデルにおいていくつかの未解決問題を解決することに成功した。たとえば、静的なネットワーク（共有メモリモデル）において良質なクラスタリングを実現する障害耐性アルゴリズムや、ネットワーク上を自律移動するモバイルエージェント群を高速に集合させるアルゴリズムを開発することに成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Michizu Hiroshi, Sudo Yuichi, Kakugawa Hirotugu, Masuzawa Toshimitsu	4. 巻 9
2. 論文標題 Energy Balancing by Wireless Energy Transfer in Sensor Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Networking and Computing	6. 最初と最後の頁 239 ~ 256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15803/ijnc.9.2_239	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Sudo Yuichi, Ooshita Fukuhito, Kakugawa Hirotugu, Masuzawa Toshimitsu, Datta Ajoy K., Larmore Lawrence L.	4. 巻 806
2. 論文標題 Loosely-stabilizing leader election with polylogarithmic convergence time	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 617 ~ 631
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2019.09.034	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 SUDO Yuichi, OOSHITA Fukuhito, KAKUGAWA Hirotugu, MASUZAWA Toshimitsu	4. 巻 E103.D
2. 論文標題 Loosely Stabilizing Leader Election on Arbitrary Graphs in Population Protocols without Identifiers or Random Numbers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 489 ~ 499
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2019FCP0003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Sudo Yuichi, Masuzawa Toshimitsu	4. 巻 30
2. 論文標題 Leader Election Requires Logarithmic Time in Population Protocols	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Parallel Processing Letters	6. 最初と最後の頁 2050005 ~ 2050005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S012962642050005X	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sudo Yuichi, Ooshita Fukuhito, Kakugawa Hirotsugu, Masuzawa Toshimitsu, Datta Ajoy K., Larmore Lawrence L.	4. 巻 30
2. 論文標題 Loosely-Stabilizing Leader Election for Arbitrary Graphs in Population Protocol Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems	6. 最初と最後の頁 1359 ~ 1373
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPDS.2018.2881125	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 Shibata Masahiro, Kawata Norikazu, Sudo Yuichi, Ooshita Fukuhito, Kakugawa Hirotsugu, Masuzawa Toshimitsu	4. 巻 822
2. 論文標題 Move-optimal partial gathering of mobile agents without identifiers or global knowledge in asynchronous unidirectional rings	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 92 ~ 109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2020.04.002	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 Sudo Yuichi, Ooshita Fukuhito, Izumi Taisuke, Kakugawa Hirotsugu, Masuzawa Toshimitsu	4. 巻 31
2. 論文標題 Time-Optimal Leader Election in Population Protocols	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems	6. 最初と最後の頁 2620 ~ 2632
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPDS.2020.2991771	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Gotoh Tsuyoshi, Sudo Yuichi, Ooshita Fukuhito, Masuzawa Toshimitsu	4. 巻 13
2. 論文標題 Dynamic Ring Exploration with (H,S) View	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Algorithms	6. 最初と最後の頁 141 ~ 141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/a13060141	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計16件(うち招待講演 1件/うち国際学会 16件)

1. 発表者名 Yuichi Sudo, Masahiro Shibata, Yonghwan Kim, Junya Nakamura, Toshimitsu Masuzawa
2. 発表標題 The Power of Global Knowledge on Self-stabilizing Population Protocols
3. 学会等名 27th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuichi Sudo, Fukuhito Ooshita, Taisuke Izumi, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa
2. 発表標題 Logarithmic Expected-Time Leader Election in Population Protocol Model
3. 学会等名 21st International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideyuki Tanaka, Yuichi Sudo, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa, and Ajoy K. Datta
2. 発表標題 A Self-stabilizing 1-maximal Independent Set Algorithm
3. 学会等名 21st International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsuyoshi Gotoh, Yuichi Sudo, Fukuhito Ooshita, and Toshimitsu Masuzawa
2. 発表標題 Exploration of dynamic ring networks by a single agent with the H-hops and S-time steps view
3. 学会等名 21st International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryoya Sadano, Yuichi Sudo, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa
2. 発表標題 A Population Protocol Model with Interaction Probability Considering Speeds of Agents
3. 学会等名 39th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Shibata, Norikazu Kawata, Yuichi Sudo, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa
2. 発表標題 Partial gathering of mobile agents without identifiers or global knowledge in asynchronous unidirectional rings
3. 学会等名 26th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuichi Sudo, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa, Ajoy K. Datta, Lawrence L. Larmore
2. 発表標題 Loosely-Stabilizing Leader Election with Polylogarithmic Convergence Time
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018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
---------------------------	-----------------------	----

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			
米国	ネバダ大学ラスベガス校			