

令和 2 年 5 月 18 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K19977

研究課題名（和文）ハイブリッド動的ネットワークにおける分散アルゴリズムに関する研究

研究課題名（英文）Research on distributed algorithms on hybrid dynamic networks

研究代表者

増澤 利光（MASUZAWA, Toshimitsu）

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：50199692

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、移動を制御可能な能動的移動ノードと、移動を制御できない受動的移動ノードが混在するハイブリッド動的ネットワーク上の分散アルゴリズムに関する以下の成果を得た。(1) ハイブリッド動的ネットワークのモデルとして、重み線形交流個体群プロトコルモデルを提案し、実ネットワークとの適合性をシミュレーションにより確認した。(2) 提案モデル上で基本的な問題に対する分散アルゴリズムを設計した。(3) 移動の部分的制御可能性の効率化に対する有効性を明らかにするために、従来の個体群プロトコルモデル（すべての移動が制御不能）、移動エージェントモデル（すべての移動が制御可能）での分散アルゴリズムを設計した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

動的ネットワーク上の分散アルゴリズムの従来研究は、ノードの移動を制御可能な能動的動的ネットワーク、あるいは、ノードの移動を制御不能な受動的動的ネットワークを対象としている。能動的・受動的移動が混在するハイブリッド動的ネットワーク上で分散アルゴリズムを設計し、移動の部分的制御が分散アルゴリズムの効率改善に与える効果を解明することは学術的意義が高い。受動的動的ネットワークは自由に行動する人や動物に付けた機器で構成されるネットワークなど、IoT社会で重要な位置を占めるものであり、部分的に制御可能な移動ノードを導入することで処理の効率化を図ることは社会的意義が高い。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we obtained the following achievements on distributed algorithms on hybrid dynamic networks where active mobile nodes (with controllable mobility) and passive mobile nodes (with uncontrollable mobility) coexist. (1) We proposed a new model of hybrid dynamic networks called the linearly-weighted interaction population protocol model, and showed by simulation suitability to real networks. (2) We designed distributed algorithms on the proposed model for some fundamental problems. (3) To clarify the impact of partially controllable mobility to efficiency of distributed algorithms, we designed distributed algorithms on the classical population protocol model (with completely uncontrollable mobility) and on the mobile agent model (with completely controllable mobility).

研究分野：分散アルゴリズム（ネットワーク上に分散システムを実現するためのアルゴリズム）

キーワード：アルゴリズム 分散アルゴリズム 分散システム 個体群プロトコル 動的ネットワーク ハイブリッド移動モデル

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

ネットワーク技術の進歩は著しく、分散システムの基盤となるネットワークも多種多様なものが実現されている。特に、あらゆる「もの」がネットワークに接続された IoT (Internet of Things. 「もの」のインターネット)、ソーシャルネットワーク、分子ロボットネットワークなど、膨大な数の移動ノードを含む動的ネットワーク上の分散システムの重要性が増してきている。動的ネットワークに含まれるノードの移動は能動的移動と受動的移動に大別できる。

- (1) 能動的移動とは制御可能な移動であり、ロボット、ドロイドや移動エージェントの移動などが相当する。例えば、移動エージェントは、ネットワーク中を移動しながら情報を収集し、訪問ノードで処理を行うソフトウェアであるが、分散システムの設計者は、移動エージェントの移動プランと訪問ノードでの処理を定めることができる。
- (2) 受動的移動とは制御不能な移動であり、自立的に移動する人や動物に取り付けた機器の移動、水や風によって運ばれる機器の移動、血管中の薬剤分子の移動などが相当する。受動的移動ノードで構成される動的ネットワークの代表的モデルである個体群プロトコルモデルでは、通信可能なノード対の集合があらかじめ決められており、通信可能なすべてのノード対は等確率で通信機会を持つ。これは人や動物に付けられた低機能デバイスで構成されるネットワークで、人や動物の移動によって近接したデバイス間でのみ通信可能な動的ネットワークをモデル化している。
- (3) 能動的移動と受動的移動の中間的な移動モデルとして、移動を部分的に制御できる（例えば、速度あるいは方向だけを制御できる）準能動的移動も考えることができる。

多数のノードで構成されるネットワークにおいて、遠隔ノード間のメッセージ転送、情報散布／収集などのタスクを、ネットワークのノードが互いに協調しながら実現するためのアルゴリズムが分散アルゴリズムである。これまでに、インターネットのような計算機ネットワーク上のさまざまなタスクに対して、時間やメッセージ数に関して効率的な分散アルゴリズムが数多く提案されている。移動ノードで構成される動的ネットワークを対象とする分散アルゴリズムも数多く提案されている。これらは、能動的移動ノードのみ、もしくは、受動的移動ノードのみで構成される動的ネットワークを対象としており、能動的移動ノードと受動的移動ノードが混在した動的ネットワークや準能動的移動ノードで構成されるハイブリッド動的ネットワーク上の分散アルゴリズムの研究はほとんど行われていない。

2. 研究の目的

IoT やソーシャルネットワークなどは、今後のネットワーク社会において、ますます重要となるが、機器やユーザの動きが制御できないことから、これらのネットワークは受動的移動ノードで構成されると考えられる。能動的移動ノードで構成される動的ネットワークでタスクを処理する場合、ノードの移動を制御することでタスクの効率的な処理が可能である。しかし、受動的移動ノードで構成されるネットワークでは、受動的移動によって偶然に近接したノード間でのみ通信が可能であるため、どのノード対が通信するかは偶然に任されている。このため、計画的な通信パターンを利用することができず、効率的にタスクを処理することが困難なことが多い。そのため、受動的移動ノードで構成されるネットワークに対し、能動的移動ノードを部分的に導入する、あるいは、移動を部分的に制御することで、タスク処理の効率化の可能性を探ることは理論的にも実用的にも重要で興味深いことである。

そこで本研究では、能動的移動と受動的移動が混在する、あるいは、準能動的移動が存在するハイブリッド動的ネットワーク上でタスクを効率よく処理する分散アルゴリズムの基盤技術や設計法の確立を目指す。

3. 研究の方法

研究目的を達成するために、以下の研究課題に取り組む。

(1) ハイブリッド動的ネットワークのモデル化

実際のハイブリッド動的ネットワークの特性を有し、なおかつ、分散アルゴリズムの設計・解析に都合がよい、(準)能動的移動と受動的移動を統一的に扱えるハイブリッド動的ネットワークのモデルを提案する。

(2) 代表的なタスクに対する、ハイブリッド動的ネットワークにおける分散アルゴリズムの設計

2ノード間のメッセージ転送、情報散布／収集、リーダー選出、論理ネットワーク構成などの代表的なタスクについて、研究課題(1)で提案するハイブリッド動的ネットワークモデル上の分散アルゴリズムを設計し、その性能評価を行う。

(3) 受動的移動ノードで構成される動的ネットワークに対する、(準)能動的移動ノードの導入効果の解明

研究課題(2)では、膨大な数の受動的移動ノードで構成されるネットワークに(準)能動的

移動ノードを導入・活用することで、タスク実行の効率改善を試みる。本研究課題では、(準)能動的移動ノードの導入効果を解明するために、能動的移動ノードのみ、あるいは、受動的移動ノードのみから構成される動的ネットワークでのタスク処理の効率化の限界を探る。

4. 研究成果

各研究課題について、以下の研究成果を得た。

(1) ハイブリッド動的ネットワークのモデル化

(a) 重み付き交流個体群モデルの提案

受動的移動ノードで構成される動的ネットワークの代表的モデルである個体群プロトコルモデルでは、通信（以降、交流とよぶ）するノードのペアが、交流可能なすべてのペアから一様ランダムに選択される。これは、全ノードが同じ速度でランダムに移動する状況をモデル化している。移動を部分的に制御可能な準受動的移動を導入することで、交流するペアを選択する確率を調整できると考えた。

そこで、交流可能なノード間に重みを導入し、その重みに応じた確率で交流するノードのペアが選択される重み付き個体群モデルを提案した。その一例として、ノードに重みを与え、交流するノードのペアとして選択される確率がその2ノードの重みの和に比例する重み線形交流個体群モデルを提案した。これは、ノードの移動パターンは制御不能であるが、ノードの速度は制御可能であるような準能動的移動をモデル化しており、ノードの重みはそのノードの速度に対応している。

(b) 重み線形交流個体群モデルの実際の動的ネットワークへの適合性の確認

シミュレーション実験により、ノードがランダムなパターンで移動するときに、ノードの交流確率が速度にほぼ比例することを確認した。このことから、重み線形交流個体群モデルは、準能動的移動ノードで構成される動的ネットワークのモデルとして適切であることが分かる。また、ノード間に与える重みとノードペアの選択確率を適切に設定することにより、重み付き個体群モデルをさまざまな動的ネットワークのモデルとして使用できる可能性を示している。

(2) 代表的なタスクに対する、ハイブリッド動的ネットワークにおける分散アルゴリズムの設計

(a) 従来の個体群プロトコルの重み線形交流個体群モデルへの適用と性能評価

分散システムの基盤タスクである、情報散布、リーダー選出、多数決を実現する従来の個体群プロトコルに対し、ノードに適切な重みを与えることによって、それらのプロトコルのタスク処理時間の期待値を改善できるかどうかを検討した。

- ・情報散布：あるノードが持つ情報を全ノードに伝えるタスクである。情報散布タスクについては、ノードにどのような重みを与えても、従来の個体群プロトコルの期待時間 $O(n \log n)$ (n はノード数) をオーダ的には改善できないことを示した。

- ・リーダー選出：ただひとつのノードをリーダー状態に、その他のノードを非リーダー状態にするタスクである。リーダー選出タスクについては、各ノードに適切な重みを割り当てることにより、従来の個体群プロトコルの期待時間 $O(n^2)$ を $O(n \log n)$ に改善できることを示した。

- ・多数決：初期状況で各ノードが有する値（例えば、0, 1）のうち、多数派の値をすべてのノードに認識させるタスクである。多数決タスクについては、各ノードに適切な重みを割り当てることで、従来の個体群プロトコルの期待時間 $O(n^2 \log n)$ を $O(n \log n)$ に改善できることを示した。

(b) 重み線形交流個体群プロトコルモデルの特性を活用したプロトコルの設計

重み線形交流個体群プロトコルの特性を活用するための新たな戦略を考案し、それを利用したリーダー選出プロトコルを設計した。この期待時間は $O(n)$ である。従来の個体群プロトコルモデルにおけるリーダー選出タスクの期待時間の下界は $\Omega(n \log n)$ であり、本研究で得られた成果は、重み付き個体群プロトコルモデルでは、従来の個体群プロトコルモデルに比べ、タスクの処理時間を大きく改善できる可能性を示している。

(3) 受動的移動ノードで構成される動的ネットワークに対する、(準)能動的移動ノードの導入効果の解明

(準)能動的移動ノードの導入効果を解明するために、能動的移動ノードのみから構成される移動エージェントモデル、および、受動的移動ノードのみから構成される従来の個体群プロトコルモデルにおけるタスク処理の効率化の限界を探り、以下の結果を得た。

(a) 移動エージェントモデル

移動エージェントは、ネットワーク中を移動しながら情報を収集し、訪問ノードで処理を行うソフトウェアであり、タスク処理の効率化のために、移動エージェントの移動プランと訪問ノードでの処理を定めることができる。つまり、移動エージェントモデルでは、すべての

移動ノード（エージェント）の移動パターンを完全に制御可能な能動的移動ネットワークである。このモデル上でタスク処理の効率化の限界を見極めることにより、部分的にしか移動パターンを制御できないハイブリッド動的ネットワークに課された本質的な制約を解明することができる。本研究課題では、動的ネットワークにおける基盤タスクである、移動エージェントをいくつかのグループに分かれて集合させる部分集合、移動エージェントをネットワーク内に一様に分散配置する均一配置、ネットワーク中のすべてのノードやリンクを訪問する探索という3つのタスクに対し、タスク処理に要する時間やエージェントの移動数の最適化に取り組み、いくつかの成果を得た。

(b) 個体群プロトコルモデル

従来の個体群プロトコルモデルでは、通信可能なノード対の集合があらかじめ決められており、通信可能なすべてのノード対は等確率で通信機会を持つ。これは、重み線形交流個体群モデルの特殊な場合（すべてのノードの重みが等しい場合）であり、このモデル上でタスク処理の効率化の限界を見極めることにより、移動パターンを部分的に制御可能とした準能動的移動モデルを導入することの本質的な利得を解明することができる。本研究課題では、リーダー選出タスクに対し、時間最適なアルゴリズムを設計することに成功した。近年、個体群プロトコルモデル上でのリーダー選出に関する研究が盛んに行われており、期待時間が徐々に改善されてきた。本成果はリーダー選出の最適期待時間を達成するものであり、当該研究分野においても大きいインパクトがある。

さらに、個体群プロトコルモデルにおいて、ネットワークのライフタイムを長期化するために、ノード間で残余エネルギーをやりとりする手法を提案した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

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 Michizu Hiroshi, Sudo Yuichi, Kakugawa Hirotsugu, 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, Kakugawa Hirotsugu, 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 Shibata Masahiro, Kakugawa Hirotsugu, Masuzawa Toshimitsu	4. 巻 809
2. 論文標題 Space-efficient uniform deployment of mobile agents 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 357 ~ 371
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2019.12.031	査読の有無 無
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, KAKUGAWA Hirotsugu, 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, 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17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 12件)

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 the 26th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryoya Sadano, Yuichi Sudo, 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 the 39th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuichi Sudo, Fukuhito Ooshita, Taisuke Izumi, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa
2. 発表標題 Logarithmic expected-time leader election in population protocol model (Brief Announcement)
3. 学会等名 2019 ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsuyoshi Gotoh, Yuichi Sudo, Fukuhito Ooshita, 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 the 21st International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuichi Sudo, Fukuhito Ooshita, Taisuke Izumi, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa
2. 発表標題 Logarithmic expected-time leader election in population protocol model
3. 学会等名 the 21st International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsuyoshi Gotoh, Paola Flocchini, Toshimitsu Masuzawa, Nicola Santoro
2. 発表標題 Tight bounds on distributed exploration of temporal graphs
3. 学会等名 the 23rd International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Shibata, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa
2. 発表標題 Space-efficient uniform deployment of mobile agents in asynchronous unidirectional rings
3. 学会等名 International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tsuyoshi Gotoh, Yuichi Sudo, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa
2. 発表標題 Group exploration of dynamic tori
3. 学会等名 IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuichi Sudo, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa
2. 発表標題 Brief Announcement: Loosely-stabilizing leader election with polylogarithmic convergence time
3. 学会等名 International Symposium on Distributed Computing (DISC) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Michizu, Yuichi Sudo, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa
2. 発表標題 Energy balancing by wireless energy transfer in sensor networks
3. 学会等名 Sustainable Computing Systems Workshop (SUSCW), CANDAR Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuichi Sudo, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa, Ajoy K. Datta, Lawrence Larmore and
2. 発表標題 Loosely-stabilizing leader election with polylogarithmic convergence time
3. 学会等名 International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuichi Sudo, Ajoy K. Datta, Lawrence Larmore, Toshimitsu Masuzawa
2. 発表標題 Self-stabilizing token distribution with constant-space for trees
3. 学会等名 International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 定野凌也, 首藤裕一, 角川裕次, 増澤利光
2. 発表標題 個体間の移動速度差を考慮した個体群プロトコルモデルにおける収束時間の解析
3. 学会等名 電子情報通信学会コンピューテーション研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 道津寛, 首藤裕一, 角川裕次, 増澤利光
2. 発表標題 センサネットワークにおける無線エネルギー伝送を用いたエネルギー均等化
3. 学会等名 電子情報通信学会コンピューテーション研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉川裕美, 首藤裕一, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光
2. 発表標題 ラインおよびリングを形成する基地局を用いた仲介型個体群プロトコル
3. 学会等名 電子情報通信学会コンピューテーション研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 原悠樹, 首藤裕一, 角川裕次, 増澤利光
2. 発表標題 モバイルエージェントによる自己安定グラフ探索
3. 学会等名 電子情報通信学会コンピューテーション研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 河田倫和, 柴田将拡, 首藤裕一, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光
2. 発表標題 匿名単方向リングにおける部分集合問題に対する移動数最適な匿名エージェント乱択アルゴリズム
3. 学会等名 電子情報通信学会コンピューテーション研究会
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	角川 裕次 (Kakugawa Hirotsugu) (80253110)	龍谷大学・先端理工学部・教授 (34316)	

6. 研究組織（つづき）

	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	首藤 裕一 (Sudo Yuichi) (50643665)	大阪大学・情報科学研究科・助教 (14401)	