

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 24 年 5 月 23 日現在

機関番号：25403
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2009～2011
課題番号：21700086
研究課題名（和文）近接作用の原理に基づくモバイルアドホックネットワークの自律分散制御技術
研究課題名（英文）Autonomous decentralized control based on local interaction for mobile ad hoc networks
研究代表者
高野 知佐 (TAKANO CHISA)
広島市立大学・情報科学研究科・准教授
研究者番号：60509058

研究成果の概要（和文）：

本研究は、これまで検討してきた「近接作用に基づく自律分散制御」をアドホックネットワークに適用し、局所情報に基づくノードの自律動作によって、ネットワーク全体を間接的に望ましい方向に導くネットワークリソース管理技術を実現することを目的としている。研究実施計画（課題1～課題3）に対し、達成した内容は以下の通りである。

（課題1）ネットワークの離合集散によるクラスタ秩序の破壊に関する問題

ネットワークの離合集散によりクラスタ構造の秩序が破壊される問題に対して、クラスタ構造の漸近安定性を解決する大域的操作方法を2つ考察し、それらの評価を行った。一つ目の増幅操作の導入によって空間構造分布の漸近安定性を確保するアプローチでは、増幅率が理想値から僅かでもずれると、空間構造分布の振幅の変化に指数関数的な影響を与えるという特性があったため、現実のネットワークでの実現が難しいことがわかった。一方、空間構造分布の履歴を保持するアプローチでは、注目するベクトルの成分を変更することでクラスタサイズやクラスタ数を制御することができ、分布の振幅の安定を保証することがわかった。

（課題2）ネットワークモデルの単純化による問題

これまでの評価モデルは、端末は動かず、二次元格子状ネットワークモデルのような限定したモデルを想定していたが、端末の移動を考慮し、ユニットグラフを使ったより複雑なネットワークモデルを使って、提案手法の効果を評価し、その有効性を確認した。

（課題3）ネットワーク性能の評価

評価指標を具体的に端末のバッテリー残量とし、提案手法により構成したクラスタについて、クラスタ構成時における FND 時間(First Node Die 時間: ネットワーク内で最初にノードが使用不可能になるまでの時間)と、ノードの生存率の時間変化について評価を行った。その結果、提案手法が既存方式よりも優れていることが分かった。

研究成果の概要（英文）：

The aim of this work is that we apply "the autonomous decentralized control based on the local interaction" considered so far to an ad hoc network, and realize network resource management by which the state of the whole network is controlled indirectly through the autonomous operation of each node based on local information.

For the research plans (Subject 1 - Subject 3), our achieved contents are as follows:

(Subject 1) Problems of destruction of cluster structure for the dynamic network topology

This method does not guarantee asymptotic stability with regard to the size of the amplitude of the distribution that represents the cluster structure. Therefore, it is difficult to keep the structure in a dynamic environment. In this study, we considered and evaluated two approaches to solve this problem. In the first approach, we introduced an amplification operation to guarantee the asymptotic stability. However, we verified that amplitude

changes exponentially even if the amplification factor deviates only slightly from the ideal value. Thus, this approach is rather impractical in real networks. On the other hand, our second approach is a method that uses distribution vectors to preserve distribution history. This method can control the number of clusters and cluster size by changing the components of the distribution vector. In addition, it is possible to guarantee the stability of the amplitude of the distribution. As future work, we will examine the temporal variation of the amplitude of the distribution in case that the initial state of the distribution changes over time.

(Subject 2) Problems of simplification of a network model

We assumed the limited network model like a two-dimensional lattice-like network model in which nodes did not move. In this research, we evaluated the effects of the proposed methods and confirmed the validity in consideration of movement of nodes by using the complicated network model like unit graph.

(Subject 3) Evaluation of network performance to the proposed clustering method

We made the evaluation index the battery residual quantity of each node concretely, and evaluated the FND time (First Node Die time: time until the first node becomes impossible to use in ad hoc network) and the temporal evolution of the probability of survival nodes at the time of a cluster configuration. As a result, we showed that the proposed method was superior to the existing clustering method.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：モバイルネットワーク技術・自律分散トラヒック制御

1. 研究開始当初の背景

Manet はユビキタスネットワークを実現するための主要技術であり、総務省 UNS (Ubiquitous Network Society) 戦略プログラムでも新世代ネットワーク技術の一つとして重視されている。Manet は、通信インフラ設備無しに機動的にネットワークを構築できるため、災害時やイベント会場での通信手段といったフレキシブルな通信環境を提供可能である。一方で、個々の通信ノードが自律的にネットワークを構成するため、ネットワーク全体を統括する装置が存在しない。このため、Manet でのトラヒック・経路制御やネットワークリソース管理技術は、個々のノードが、自身で取得可能な局所的状態情報に基づいて、自律分散的に実行する必要が生じる。一般に自律分散制御では、局所最適な動作は可能であっても、ネットワーク全体としての効率性を保証するトラヒック制御やネットワークリソース(電池寿命を含む)の管理を実現することが難しかった。

提案者はこれまで、高速な有線ネットワークを対象にして新しい自律分散制御技術を検討してきた。この技術は、高速ネットワークに於いて制御遅延がネットワーク性能に大きな影響を与えるようになる現象に対して、ノードがネットワーク全体の情報を収集することなく局所的な情報のみに基づいて高速動作し、間接的にネットワーク全体を制御する機構を実現するものである。この技術の原理は、以下のように物理の近接作用の原理を応用したものである。自然界では、近隣同士の相互作用(近接作用)の結果、システム全体として秩序のある状態を生み出す例があり、これは偏微分方程式の局所相互作用と解の関係でモデル化することができる。この仕組みを工学的に見ると、局所的な情報のみに基づく部分システムの自律動作(局所相互作用に対応)が、間接的にシステム全体の状態を(偏微分方程式の解として)望ましい方向に導くものである。本研究では、上記の「近接作用に基づく自律分散制御」の枠組みをネ

ネットワーク全体の情報交換が制限される Manet の制御にこの考え方を応用するものであり、「ネットワークの大域的情報を持たないノードが特定のルールで自律動作することによって、間接的にネットワーク全体の状態を望ましい方向に導くトラヒック制御とリソース管理技術」を実現する。

2. 研究の目的

大規模災害の発生等により特定の地域に壊滅的な被害を被った場合、ネットワークインフラも深刻な被害を受ける。3.11 の震災に対する復旧活動でも明らかになったように、円滑な災害復旧活動を支援するためには円滑な情報流通が不可欠であり、このためにはネットワーク機能がいち早く回復することが必要である。災害直後はネットワーク構造が破壊され極めて混沌とした状態に陥っているため、平常時の環境で設計したプロトコルの動作条件を満たしておらず、ネットワーク機能回復が迅速に行われない可能性がある。この問題を回避するためには、残存機器のみで混沌とした状態から早期に秩序状態を修復し、ネットワーク機能回復のためのプロトコルが動作できる状況を作り出す必要がある。この課題に対し、基地局や無線 LAN のアクセスポイントのようなネットワークインフラを使用せずとも、端末同士が直接接続してネットワークを構成することができるアドホックネットワークを主体としたネットワークが有用である。アドホックネットワークにおいては、ネットワークの負荷分散を目的としたクラスタ形成技術が多く提案されており、災害時においても電力消費を均等化し、ネットワークの長寿命化を図る上で、クラスタ形成技術は重要な課題である。これらのクラスタ形成技術において、電池残量、ノードの次数等の何らかの具体的なメトリックに合わせてクラスタ構造を最適化するためには、ネットワークの大域的な状態情報が必要となる。しかし、アドホックネットワークではネットワーク構造や情報交換頻度の制限などの構造上の理由で、ネットワークの大域的な状態情報を知ることは難しい。従って、各ノードが知りうる局所的な情報に基づき、ある目的に沿った大域的な秩序を生み出すことができる自律分散的なクラスタリング技術が必要である。我々はこれまで、近接作用の考え方に基づき、偏微分方程式の解とその偏微分方程式自身が記述する局所相互作用の関係を利用した自律分散制御のフレームワークを考察し、その具体例として、有限な空間的広がりを持った構造を生み出すような自律分散制御の構成方法(自律分散構造形成技術)を提案してきた。また、アドホックネットワークにおけるクラスタリングへの実現可能性を検討してきた。局所的な

情報に基づく有限な空間的構造を生み出すことを目的としたその他の研究としては、反応拡散方程式による Turing パターンを利用した bio-inspired アプローチが知られているが、既存方式に比べて時定数で 30 倍以上高速な収束速度を実現することも分かっており、災害時の迅速なネットワーク秩序回復に有効であると考えている。一方、災害時の混沌とした状態からネットワーク秩序が回復した後、その秩序構造を利用しその後のネットワーク機能回復が円滑に行われるためには、安定した秩序構造が維持される必要がある。提案するクラスタリング方式により回復されるネットワーク秩序は、このような漸近安定性が必ずしも保証されず、ノード群の移動に伴うネットワーク同士の離合集散などの大規模なネットワーク構造の変化に対して、ネットワークの秩序構造が大きく影響を受ける可能性がある。本研究では自律分散的に構成した秩序状態に漸近安定性を保証する技術を提案する。

3. 研究の方法

ノードの移動を考慮したアドホックネットワーク環境における本技術の課題を述べ、その対応策について説明する。提案方式は、分布を平滑化する拡散と分布のピークを強調するドリフトの釣り合いからある有限な構造を形成する。ドリフト効果が拡散効果よりも強い場合は、構造のピークが強調され初期分布の凹凸が極端になり、一方拡散効果がドリフト効果よりも大きい場合、形成された構造は時間とともに平滑化(分布の振幅の減衰)される(図 1)。

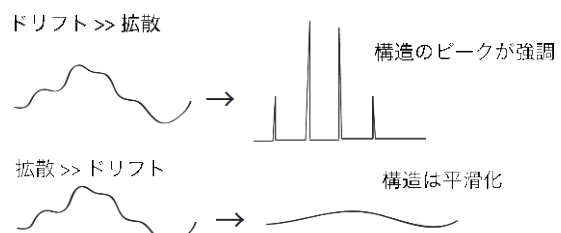


図 1 : ドリフトおよび拡散による構造の時間変化

拡散とドリフトの強さが均等になるように、パラメータを調整することは非常に難しく、ドリフト、または拡散が強い状況で議論する必要がある。ドリフトが強いと初期条件が強調されるだけで新しい構造が生まれなため、本方式では、拡散 >> ドリフトとなる状況を考える。この場合、時間経過と共に分布の振幅の減衰が起こる。クラスタ境界を決定したい場合は、ノード間における分布の差が少しでもあれば、クラスタ境界を決定することが可能であるため、分布の振幅の減衰は問

題ではない(図 2).

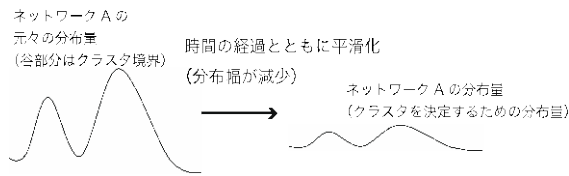


図 2 : 時間経過による振幅の減衰とクラスタリング

しかし次に述べる 2 つのネットワークが混在する状況を考えた場合、問題が起こる。ノードの分布量を電池残量と仮定する。相対的に多くの電池残量をもつネットワーク A の分布の振幅が、拡散効果により時間経過とともに減衰し、小さくなった状況を考える。このとき、振幅の大きい分布をもつネットワーク B がノードの移動によりネットワーク A と融合した場合、ネットワーク A の秩序構造が大きく影響を受け、クラスタ構造が破壊されてしまう可能性がある(図 3).

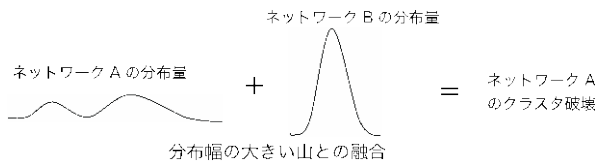


図 3 : ネットワークの離合集散における問題

両者のネットワークのクラスタ構造を同一尺度で表現できていないために起こる問題であり、これを解決するには分布の振幅を一定の値で維持させること(振幅の漸近安定性の確保)が必要となってくる。

この課題に対し、基本的に以下の 2 つの方法が考えられる。

- ・ 大域的操作によって空間構造分布の振幅を維持する方法ネットワーク全体で決められた処理を導入することで、空間構造分布の振幅を維持する。

- ・ 局所的動作によって空間構造分布の振幅を維持する方法ネットワークの自律分散動作規則を変更することで、空間構造分布の振幅を維持する。

本研究では、大域的操作を導入するアプローチに着目し、課題解決の方法を検討する。

4. 研究成果

本節では、二つ目のアプローチによって空間構造分布の振幅を評価した結果を示す(一つ目のアプローチは省略)。

一つ目のアプローチである、増幅操作の導入によって空間構造分布における振幅の漸近

安定性を確保するアプローチでは、増幅率が理想値から僅かでもずれると、空間構造分布の振幅の変化に指数関数的な影響を与えるという特性があったため、現実のネットワークでの実現が難しかった。大域的操作によってクラスタ構造の漸近安定性を保証する技術を実現するには、空間構造分布の振舞いに与える影響が非常に緩やかになるような大域的操作を考える必要がある。このような考え方の下、空間構造分布の履歴を保持する方式を導入し、クラスタ構造の漸近安定性が保証できることを示す。

4. 1 空間構造ベクトル

各ノードが過去の分布量の値を保持し、それらの値を空間構造ベクトルで持つことにより、漸近安定性を保証する。これまでの方式では、各ノードは分布量はスカラーで持っていたがこれをベクトル(N 個の成分を持つ)として保持する。あるノードが時刻 t にもつ分布量(例えば電池残量)を $p(t)$ とする。時刻 t_k ($k = 0, 1, \dots$) のクラスタ構造の分布量 $Q(t_k)$ を以下のように設定する。

$$Q(t_k) = \{q_0(t_k), q_1(t_k), \dots, q_N(t_k)\} \quad (6)$$

$$q_0(t_k) = p(t_k) \quad (7)$$

各ステップにおいて、ベクトルの成分毎に拡散処理とドリフト処理を行い、次ステップではベクトルの i 成分を $i + 1$ 成分へとシフトする(図 4)。

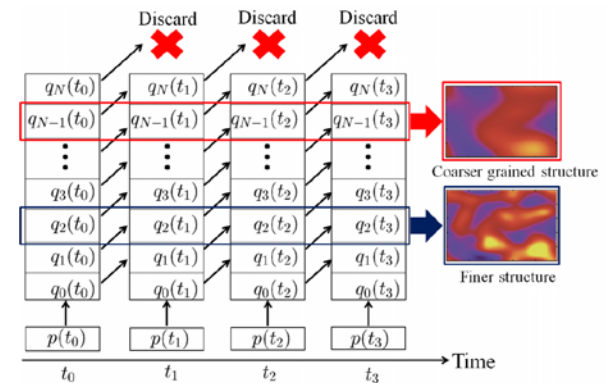


図 4 : ベクトル $Q(t_k)$ の時間発展

ベクトルの n ($n = 1, 2, \dots, N$) 成分を指定することでクラスタのサイズを調整することができ、 n が大きい程大きなクラスタを構成することができる。

この方式を使って構成したクラスタ構造を評価する。ネットワークは、 50×50 の 2 次元格子状ネットワークであり、分布量の初期値は 0 から 1 の間のランダムな値とする。パラメータは、 $\sigma^2 = 4.0$, $c = 0.001$, κ ,

= 0.1 とする．分布量のベクトルの成分の数は 10, 000 で，出力は 1, 000, 3, 000, 5, 000 成分について 10, 000, 20, 000, 30, 000 ステップに行う．各時刻に出力した成分で作成した分布の山を図 5 に，各成分の分布幅の時間変化を図 6 にそれぞれ示す．

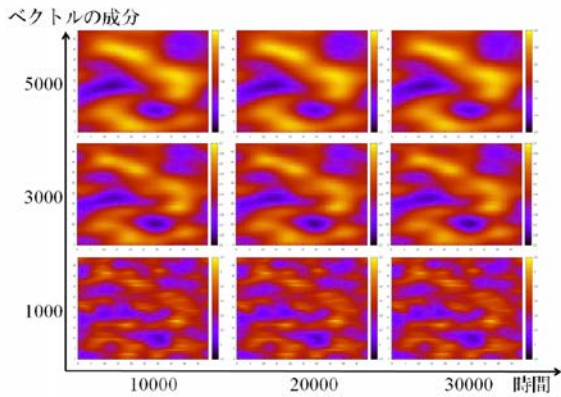


図 5：各成分で構成したクラスタ

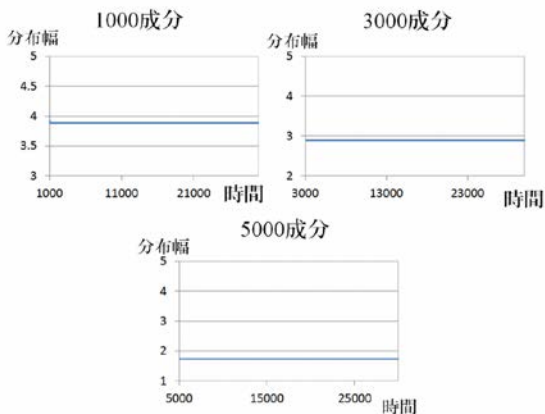


図 6：各成分の分布幅の時間変化

図 5 を見ると，1, 000 番目の成分で構成したクラスタよりも，5, 000 番目の成分で構成したクラスタの方が，サイズが大きい．これは 1, 000 番目の成分は拡散があまり進んでいないため小さなクラスタが複数構成されるが，5, 000 番目の成分は拡散が進んでいるためである．また図 6 を見ると分布幅が完全に安定していることが分かる．これは初期状態の分布量は変化せず，初期状態の分布量はベクトルの第一成分として与えられているので，同じ結果をたどることは明白である．本方式は，ベクトルを変えることで，クラスタサイズやクラスタ数を制御することができ，分布の振幅の安定を保證する．次に，提案モデルで構成したクラスタと，bio-inspired モデルで構成したクラスタについて，FND 時間(First Node Die 時間：ネ

ットワーク内で最初にノードが使用不可能になるまでの時間)と，ノードの生存率の時間変化を比較評価した．

シミュレーションモデルは，ランダムな初期バッテリー量を持つ 10000 個のノードからなる， 100×100 の 2 次元格子状トーラス型ネットワークを考える．各ノードの q の初期値は初期バッテリー量と同一とする．バッテリー消費量はパケットの送受信によって $1 [\mu J=bit]$ ，代表ノードは，自身の行う処理によって $0.1 [\mu J=sec]$ 消費する．また，各ノードはバッテリー残量が 0 以下になると使用不可能となる．FND 時間を表 1 に，ノードの生存率の時間変化を図 7 に示す．どちらも bio-inspired モデルで構成したクラスタに比べて，提案モデルで構成したクラスタの方が優位であることが分かる．

表 1：FND 時間比較

Proposed
9768 [sec]
Bio-inspired
4884 [sec]

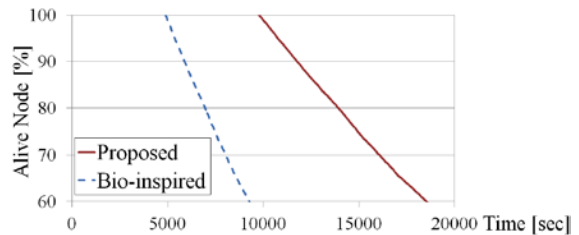


図 7：生存率の時間変化

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 1 件)

- ① Chisa Takano, Masaki Aida, Masayuki Murata, Makoto Imase, Proposal for autonomous decentralized structure formation based on local interaction and back-diffusion potential, 査読有, IEICE Transactions on Communications, vol. E95-B, no. 5, 2012, 1529-1538.

[学会発表] (計 12 件)

- ① Chisa Takano, Masaki Aida, Masayuki Murata, Makoto Imase, Autonomous decentralized mechanism of structure formation adapting to network condit-

ions, The 11th IEEE/IPSJ International Symposium on Applications and the Internet (SAINT 2011), July 18, 2011, Munich, Germany.

- ② 濱本 亮, 高野 知佐, 会田 雅樹, 石田 賢治, 自律分散構造形成技術に基づくクラスタの電力消費量特性, 電子情報通信学会総合大会 2012年3月, 岡山大学.
- ③ 濱本 亮, 高野 知佐, 会田 雅樹, 石田 賢治, 自律分散的に形成されるクラスタ構造に対する漸近安定性保証技術, 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, 2011年12月, 広島市立大学.
- ④ 高野 知佐, 作元 雄輔, 会田 雅樹, 結合振動子のカオス的性質を利用した送信レート制御技術, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2011年9月, 北海道大学.
- ⑤ Tatsuro Sumi, Chisa Takano, Kenji Ishida, and Masaki Aida, Implementation of autonomous decentralized flow control based on local interaction, 10th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems (ISADS 2011), March 23-25, 2011, Tokyo.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計0件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

http://www.net.info.hiroshima-cu.ac.jp/~takano/index_j.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高野 知佐 (TAKANO CHISA)

広島市立大学・情報科学研究科・准教授
研究者番号 : 60509058