

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500037

研究課題名(和文)低機能移動端末ネットワークシステムでの高度通信基盤技術に関する研究

研究課題名(英文)A Research on Fundamental Technology for Advanced Communication by Using Mobile Nodes with Low Functionality

研究代表者

片山 喜章(KATAYAMA, YOSHIAKI)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10263435

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文):本研究では,移動端末によるアドホックネットワーク上で高効率通信を可能とするための理論構造構築手法の開発と,低機能な自律移動端末による分散システムにおける問題の可解性の解明を行った.前者については,同分野の研究状況のサーベイと,2つの新規アルゴリズムの開発,さらに動的クラスタベースのネットワークに対するノードの追加削除に関するアルゴリズムを提案した.後者については,連続平面での集合および円形成問題を解決するアルゴリズム,および離散平面上での集合問題に関する可解性に関していくつかの結果を得た.

研究成果の概要(英文):In this research project, we developed methods for constructing a logical structure in the physical network to realize efficient communication, and investigated on solvability of the problems for distributed autonomous mobile robot systems with low functionality. About the former, we provided a survey paper for this research area and proposed novel algorithms for constructing some logical structure on the network. About the latter, we proposed algorithms to solve gathering and circle formation problems on continuous space. And we also showed the possibility and impossibility about the gathering problem on discrete space.

研究分野:分散アルゴリズム

キーワード:分散アルゴリズム MANET 自律分散ロボットシステム 自己安定アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

10 年程度前までは、理論研究者の間でもアドホックネットワークに関する研究が盛んに行われていたが、現在では大方の研究者の興味は他に移っているようである。一方で実用分野においては、mote (下写真)をはじめとして種々のセンサを搭載した複数のノードによるアドホックネットワークが、一定の条件下とはいえ実用域に達している。例えば、スマートグリッドに関連し、各家庭の電力メータをアドホックネットワークでつなぎ自動的に検針する仕組みも試験運用されている。



ここで実用になっているシステムの条件について考えると、通信環境が常に安定していること、端末が移動しないことの2つである。いずれかの条件が満たされない場合の実用システムはほとんど見られない。しかし、アドホックネットワークの特徴が最大限に生かされるのは、ネットワークインフラが敷設できないような環境で、かつ端末の移動が起こるような場合であろう。大規模災害現場や人が立ち入れない危険な現場などで、移動端末によるアドホックネットワーク(Mobile Ad-hoc NETWORK: MANET)利用技術が確立されればその恩恵は少なくないだろう。

MANET での通信基盤技術の確立で困難な点は、主に MANET の持つ特徴である「端末の多様性」と「通信環境の動的変化」であると考えられる。端末の多様性とは、MANET を構成する端末の持つハードウェアの能力の違い(電池容量、電波の送受信能力、計算能力など)のみならず、その移動の速度やパターンの違いも含めたものである。たとえば電池残量が少ない端末はできるだけ通信を行わないようにすることは自然であるし、電波の送受信能力が端末毎に異なれば端末対によっては単方向通信しか行えないなどの制限が出てくる。また移動パターンについては、もしこれが一様であれば MANET のトポロジ変化を容易に推測することが可能となり、従ってその推測に基づく通信制御が可能となる。これはこれで一つの研究テーマとなりうるが、現実的には均一な移動パターンを仮定できる場合は限られている。通信環境の動的変化とは、移動端末の移動あるいは端末自身の消滅・出現等に起因する通信リンクの生成や消滅、システムを取り巻く利用環境からの外的要因による通信状況の変化などである。いずれも、システム運用中にネットワークトポロジが動的に変化することを意味している。これらの特徴はネットワーク利用におけるもっとも基本的な仕組みである通信

経路制御に対してすら多大な影響を及ぼす。つまり、MANET 上では常に変化する環境に適応可能な通信基盤技術が必須となる。

MANET におけるトポロジ変化、つまり端末やリンクの出現・消滅など、システム実行中に動的に変化する環境に適応可能な分散アルゴリズムのパラダイムが自己安定アルゴリズムである。これは、任意のシステム状況からアルゴリズムを実行しても有限時間内にあらかじめ定められたシステム状況に到達可能である性質を持つ。つまり、システム実行中にいかなる状況に陥っても、その状況を初期状況としてやがて目的の状況に到達する。この性質は、分散システムを長期にわたって安定的に運用する技術として適している。したがって、MANET のようなネットワーク環境が動的に変化するシステム上でのアプリケーション開発の基盤技術としてとても有用である。

MANET を構成する端末が自律的に移動する場合、つまり端末自身が自分の目的を達成するために位置を制御できる場合を考えると、様々な既存モデルが適用可能である。そのひとつに自律移動ロボットによる分散システムがあげられる。自律分散ロボットシステムとは、他ロボットの位置を観測可能なセンサ、計算機、および移動するための仕組みを装備した複数のロボットにより構成される。各ロボットは、他ロボットの配置を入力として行き先を決定し移動する。このような自律分散ロボットシステムは、現実の自律移動型の基本モデルとして位置づけられ、昨今活発に研究が進められている分散システムの理論的研究分野のひとつである。

2. 研究の目的

本研究では主に MANET を対象として、実用アプリケーションの実装に有用な情報共有手段となりうる基盤技術の開発・解析を主なテーマとした研究を行った。

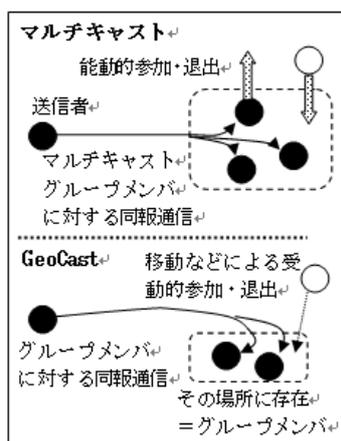
3. 研究の方法

本研究を遂行するにあたり検討項目は、大きく分けると以下の二つである。これらの項目をそれぞれ深く考察しつつ、将来的にこれらの知見が有機的に結びつき、新しい技術の基盤となることを期待する。

(1) MANET 上での効率の良い通信基盤技術の検討と開発

MANET 上で高効率通信を実現するための基盤技術やの信頼性の高いマルチキャストや GeoCast などの応用的な通信技術の開発を行った。基盤技術は、アドホックネットワーク上に理論的な通信構造を構築することで、ワイアレス通信において効率を落とす原因となるコリジョンを排除した通信を可能にするものであり、さらにその構造に対して複数の新規端末を追加削除するための技術開発を行い、より適用範囲を広げた。マルチキャストは様々な場面で必要とされ、contents

oriented 通信などで不可欠な技術である。また GeoCast は災害現場など、場所に依存した情報が重要視される現場での情報共有技術として重要である(上図)。いずれもトポロジが動的に変化し、



通信状況も安定しない MANET において、これらを開発することは容易ではないが、これらを実現するための基礎となるネットワーク構造の構築手法を新たに開発した。

(2) MANET を構成しうる自律移動端末群制御のための基盤技術の検討・開発

一般的な MANET での端末は、人間が所有するデバイスのように、デバイス自身の判断で移動することはない。一方で、自律移動型ロボットの場合は、自分自身で移動先を決定可能である。このようなモデル上では、端末自身の資源の制約から生じる不可能性がある一方、自身の移動による情報の伝搬や、通信連結性を保ったままでの移動など、新たな技術開発の余地がある。例えば通常の MANET 中に自律移動ロボットを複数台混ぜて配置することで、効率の良い通信経路を構成できる可能性がある。また、複数台の自律移動ロボットが連携して通信経路を維持しつつ広範囲に渡って探索を行うことが可能になると期待される。そこで、まだ始まったばかりである本研究分野において、自律移動ロボット群制御に関する基本的な問題の可解性を解明し、MANET における通信基盤構築への応用の可能性について検討した。

4. 研究成果

本研究における研究成果は、前節で述べた通信基盤技術の検討・開発と、自律移動端末群制御のための基盤技術の検討・開発に大別できる。以下では、これら二つに分別して研究成果を列挙する。

(1) 通信基盤技術の検討・開発

本項目については、フラットなアドホックネットワーク (ANET) では実現が困難な高効率通信を実現するために、ネットワーク上に理論的構造を構築することで、様々な高効率通信基盤を提供することが目的であった。本研究では、まず ANET 上での効率の良い通信構造としてクラスタベースネットワークに着目し、既存技術のサーベイ [J1]、シミュレータの開発 [C11]、動的 ANET への対応 [C1]、より良いクラスタ構造構築のためのアルゴリズム [C6] などの成果を得た。さらに ANET 上での高信頼性を有する GeoCast, Multicast

を実現するための基盤技術として、各通信リンクにサイクルができないよう方向づけを行う (DAG 構成) ことで無駄な通信を省きながらより多くの通信路を確保するための DAG 構成アルゴリズム [C10] や、より一般的な通信手法に適用可能な新しい DAG 構造である (s, t)-極大 DAG を考案しその構築手法を提案した [C2]。両成果とも、理論的に正当性の証明を行ったが、前者についてはさらに計算機シミュレーションによって既存手法との違いを明確にすることで、既存手法との適用範囲の違いを明らかにした。

(2) 自律移動端末群制御基盤技術検討・開発

本項目については、MANET の各端末が自律移動可能な場合を想定し、それらによって構成可能な通信路、すなわち実現可能な制御手法を明らかにすることが目的であった。もし中央集中型の制御であれば比較的容易に実現可能な制御方法であっても、自律分散制御によると著しく難易度が上がることが多い。そこで、自律移動端末を単純な自律移動ロボットとしてモデル化したシステムが研究されてきており、本研究でもそのモデル上での問題の可解性に関する研究を行った。一般には体積を持たない点としてモデル化されたロボットを用いた研究が多いが、本研究ではロボットが体積を持つ fat モデルに関して集中して研究を行った。

研究成果は大きく「連続平面上」と「離散平面上」に関する結果に分けられる。

連続平面上では、全てのロボットをできるだけ密に集合させる集合問題を 5 台のロボットで解くアルゴリズム [C8] を提案した。[C8] では集合すべき形状の定義も提案している。一方、6 台以上の場合については今後の課題として残っている。さらに、任意の台数のロボットを同一円周上に並べるアルゴリズムを提案した。この問題はこれまで正しいアルゴリズムが知られていなかったが、各ロボットに「ライト」と呼ばれるロボットの状態を表すためのデバイスを装備させることで可解となった。ただし、ライトの数の下界については今後明らかにする必要がある。

離散平面とは、ロボットが平面上に設定された格子点上にしか停止できないシステムモデルである。ただし、点から点への移動は連続的に行われる。このモデル上で、fat ロボットによる集合問題に関して研究を行った。その中で我々は、ロボットの大きさと格子サイズの関係に着目し、ロボットの大きさに関する新たなモデルを提案している [C7]。さらに、集合の形状についても独自に定義しており、モデルを決定する様々なパラメータの違いによる離散平面上での問題の可解性に対していくつかの成果を得た。各ロボットの視野が制限されたモデルでは、各ロボットが平面の座標系を知っているかどうか、および台数を知っているかどうかは問題解決の難易度に、ひいては可解性に影響する。本研究では、局所座標系を用いてロボット台数が

既知の場合に集合を達成するアルゴリズムを提案した [C7]. その他, 我々の研究グループで明らかにした部分を右図に示す. ※印以外の○, ×部分がそれに相当する.

Small サイズ		局所座標系	共通座標系
非同期	n 未知	未解決	○
	n 既知	未解決	○
半同期	n 未知	※	○
	n 既知	○	○
Large サイズ		局所座標系	共通座標系
非同期	n 未知	×	×
	n 既知	未解決	○
半同期	n 未知	未解決	○
	n 既知	○[C6]	○

* n ロボットの台数

自律移動ロ

ボットに関する研究については, これら以外にも離散平面上での距離としてマンハッタン距離ではなくユークリッド距離を用いた場合の集合アルゴリズム [C3] や実ロボットへの応用を目指した制御システムの基本機能の作成 [C4, C5] などを行った.

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 1 件)

[J1] A.Zeb, A.K.M.M.Islam, S.Baharun, N.Masoor, Y.Katayama, "A Survey on Self-Organized Cluster-based Wireless Sensor Network," Journal Teknologi, (E-ISSN:2180-3722), (to appear), (査読有)

[学会発表] (計 23 件)

[C1] A.Zeb, A.K.M.M.Islam, S.Baharun, Y.Katayama, "An efficient self-organized Dynamic Cluster-based Wireless Sensor Network," 10th Int. Conf. on Info. Tech. and App. (ICITA 2015), Sydney, Australia, (1-4 July, 2015), (to appear), (査読有)

[C2] 大野, 片山, 増澤, "st-ordering を利用した(1,1)-極大 DAG 構成自己安定アルゴリズムについて", 信学会, COMP 研, 定山溪ビューホテル(札幌, 北海道), 2015.06.11-12, (査読無)

[C3] 大木, 片山, 和田, "グリッド平面上でのユークリッド距離によるファットロボット集合問題について", 電子情報通信学会総合大会, D-1-9, 2015.03.10-13, 立命館大学 KBC(草津, 滋賀), (査読無)

[C4] 黒柳, 片山, "自律分散ロボット群制御システムにおける座標変換機能について", 電子情報通信学会総合大会, D-10-6, 2015.03.10-13, 立命館大学 KBC(草津, 滋賀), (査読無)

[C5] 永田, 片山, "自律分散ロボット制御システムにおけるスケジュール機能について", 電子情報通信学会総合大会, D-10-6, 2015.03.10-13, 立命館大学 KBC(草津, 滋賀), (査読無)

[C6] 岡本, 片山, "2 近似葉最多全域木構築自己安定アルゴリズムについて", 信学会, 信学

技法, Vol.114, No.509, COMP2014-50, pp.53-60, 立命館大学(京都), 2015.03.02, (査読無)

[C7] 伊藤, 片山, 和田, "グリッド上での Large サイズファットロボットの集合について", 信学会, 信学技法, Vol.114, No.509, COMP2014-42, pp.1-8, 立命館大学(京都), 2015.03.02, (査読無)

[C8] 平野, 片山, 和田, "5 台のファットロボットによる集合プロトコルについて", 信学会, 信学技法, Vol.114, No.352, COMP2014-37, pp.29-36, 崇城大学(熊本), 2014.12.05, (査読無)

[C9] 寺井, 和田, 片山, "状態を持つ自律分散ロボット群の能力について", 情報科学ワークショップ, A-2, 2014.09.17-19, ツネイシシマなみビレッジ(福山, 広島), (査読無)

[C10] K.Ito, Y.Katayama, K.Wada, N.Takahashi, "Brief Announcement: Self-stabilizing DAG-constructing Protocols with Application to Geocast in MANET," 15th Int. Sympo. on Stabilization, Safety, and Security of Dist. Sys. (SSS 2013), LNCS8255, pp.373-375, Osaka University(Suita, Osaka), (13-16, Nov., 2013), (査読有)

[C11] L.B.Jivanadham, A.K.M.M.Islam, Y.Katayama, S.Baharun, S.Komak, "Implementation of a Secured Dynamic Wireless Sensor Network in OMNeT++ Modular," MJIT-JUC Joint Int. Sympo. 2013 (MJIS2013), MP-8-4, Shonan Campus, Tokai University(Hiratsuka, Kanagawa), (6-8 Nov., 2013 (7, Nov.)), (査読有)

[その他] (招待講演 計 2 件)

[招待講演 1] 片山喜章, "ファットロボットによる自律分散ロボットシステムへの理論的アプローチについて", ロボティクス研究会 (計測自動制御学会・調査研究会), (2014.12.08, 九州大学西新プラザ(博多, 福岡) (査読無)).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

片山 喜章 (KATAYAMA, Yoshiaki)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 10263435

(2) 連携研究者

高橋 直久 (TAKAHASHI, Naohisa)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 80335083

和田 幸一 (WADA, Koichi)
法政大学・理工学部・教授
研究者番号: 90167198