

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 3 月 31 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21500012

研究課題名（和文） 超低機能自律移動端末で構成された自己安定分散システムの可解性に関する研究

研究課題名（英文） Research on solvability of the systems consisting of autonomous mobile nodes with resource constraint

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・准教授

研究者番号：10263435

研究成果の概要（和文）：本研究では、計算能力やメモリなど計算機としての機能が制限され、自律的に移動可能な端末群で構成された自己安定システムの問題解決能力を明らかにすることが第一の目標である。さらに、このようなシステム上で様々なサービスを安定的に提供するための基盤技術の開発も併せて目標とした。結果として、あるモデルの上で解決可能な問題のクラスを明らかにすることができ、また故障やネットワークの変化に対して頑健な通信実現のための基盤技術を提案した。

研究成果の概要（英文）：In this research project, our first goal is to clarify the ability of the self-stabilizing system which consists of autonomous mobile nodes with very restricted resources. Moreover, we tried to develop fundamental technologies to provide various stable services in such systems. As a result of this research project, we clarified the solvability of the gathering and convergence problems on some error prone system models. And some fundamental technologies were developed on the system such that it provides stable services in spite of transient faults of nodes and changes of network topology.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成 21 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
平成 22 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
平成 23 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・情報学基礎

キーワード：分散アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

本研究では、機能が限られ自律的に動作し移動可能な端末（低機能移動端末）によって構成される分散システムを対象とした。低機能移動端末とは、通常の研究対象とされる分散システムを構成する端末に比べ、極端に機能が制限されたもので、例えば通信機能やメモリがない場合や、単純な四則演算のみしか

できないような端末である。対象システムに近い具体的な例としては、ここ数年多くの研究者の興味を惹いているセンサーネットワークがあげられる。センサーネットワークを構成するセンサーは無線による通信能力を有する一方で、記憶領域、計算能力や電源容量に制限があり、一般の計算機と比べると機能が著しく制限された端末である。しかしそ

の分、端末の小型化や低価格化が可能で、大量のセンサーを利用した様々なアプリケーションが考えられており、その実現に向けた基礎研究が盛んに行なわれている。端末が静止している場合には、いかに効率良く情報を散布・収集するかが主な興味となる。一方、端末が移動する場合には、興味の点は同様だがそのアプローチが全く異なる。静止端末の場合には、いわゆる（低機能端末による）アドホックネットワーク上での経路制御問題や（比較的）固定された通信インフラの構築問題に換言される。一方、端末が移動する場合には、これらの手法の適用が難しい。さらに、問題の可解性が、端末の有する機能、つまり端末のモデルの違いに敏感に依存する。

以上、低機能端末が自律的に移動するシステムに関する基礎研究はまだ不十分であり、これらについて追及することが求められている。

2. 研究の目的

背景より、我々は以下の2点を目標とした。一つ目は、自律的に移動可能な低機能端末によるシステムのモデルと問題の可解性の関係を明らかにすることである。分散システムにおいて、そのシステムのモデルによって問題の可解性が異なることは一般的であり、今回対象とするシステムも分散システムの一つである点から、これを明らかにすることは重要であると考えた。低機能自律移動端末によるシステムの例としては、自律移動型ロボット群制御に関する研究で扱われているシステムモデルが存在する。このシステムモデルで一般的に扱われているモデルについて簡単に説明する。ロボットは、四つの動作「観測」、「計算」、「移動」、「待機」の状態を持つ。観測で他のロボットの位置を局所座標系にマッピングし、計算で観測の結果を入力として自分自身の目的地を計算し、移動で目的地へ向かって移動する。待機は何もしない状態である。各ロボットはこれらの動作を繰り返す。システムには、「スケジューラ」の存在が仮定され、これによって「どれ」が「いつ」動作するか決定される。自律分散ロボットシステムの実行は、これらの要素によって特徴付けられる。さらに各ロボットに関してより詳細な分類が行なわれる。各ロボットの局所座標系について、その合意の程度によりモデルが分かれる。例えば、一般的に x - y 座標系が仮定されるが、各軸の向き（正方向）が合意されているか、 y 軸の向きが揃っているか、あるいは全く合意されていないなどである。これらは、「コンパス」という概念でモデル化されている。つまり、各ロボットにコンパスが装備され、それらは常に自分自身の y 軸の向きに一致していると考え、各ロボット間のコンパスのずれによって、合意の程度が規

定される。移動については、移動が瞬間的に行なわれる（移動途中で他のロボットに観測されない）か、移動先に到着する前に停止するかなどで分類される。つまり、ロボットの持つ各動作の *atomicity* の違いにより分類される。現状のモデルは、これらのうち特定の要素を組み合わせたものであり、さらにモデルによって組み合わせられる要素が違っている場合がある。このようなモデル化は、本研究の目的を達成するためには大きな問題があり不十分である。したがって、本研究を進めるにあたり、精確なモデル化が必須となる。そこで本研究では、まずはロボットの持つ「コンパス」および「観測装置」の「誤差」に着目し、コンパスや観測結果の正確性の観点からモデルを分類し、問題の可解性について明らかにすることを目的とした。もちろん、モデルを規定するコンパス以外の要素についても既存提案システムからモデルを再構築する必要があるが、時間的制約からこれらについては継続研究課題とした。

さらに、自律分散ロボットシステムに限らず、低機能端末が常に移動する、つまりネットワークポロジが常に変化し続ける動的ネットワークシステムモデル上で、安定的にサービスを提供可能な基盤技術の開発が必要であると考え、その開発を目指した。これは従来の分散アルゴリズムの研究で扱われてきた研究テーマであるが、本研究では、特に「サービスの安定性」の実現に重点を置き、かつ低機能端末向けという意味で高効率な基盤技術の提案を目標とした。

3. 研究の方法

当研究分野で「研究の方法」という表現はそぐわないが、以下のように研究を進めた。

まず、自律分散ロボット群制御に関する既存の成果を調査し、それらで扱われているモデルについて整理した。またその作業を通して、各モデルにおいて明らかになった点、まだ明らかでない点 (open problem) についても整理した。この際、ロボットのコンパスや観測装置の正確性をモデル化するための知見を得るために、その点を中心にモデルの分類を行った。その結果得られた知見から、「コンパス」および「観測装置」の誤差についてのモデル化、および各モデルにおける問題の可解性（問題解決が可能な誤差率の上限・下限など）を明らかにした。

一方、安定なサービス実現の基盤技術としては、故障が生じてもその影響を局所的に抑え込んだ高度故障耐性を実現するための技術開発を行った。さらに自律分散ロボットシステムなどにおいて、特定の場所に存在するロボット（端末）に特定の情報を送付するという基本的なタスクを安定的に実現するための基盤技術（通信プロトコル）を開発した。

4. 研究成果

本研究における低機能自律移動型端末で構成されたシステムに関する研究成果は、大きく分けると「システムモデルと問題の可解性の解明」および「自己安定システム実現のための基盤技術の開発」の二つとなる。以下、それぞれについて述べる。

(1) システムモデルと問題の可解性に関する成果 -コンパスおよび観測装置の誤差と可解性との関係-

「コンパス」とは、自律分散ロボットシステムを構成する各ロボットが持つ座標系を規定する概念である。すべてのロボットが同じ方向を指すコンパスを持っていることは同じ座標系を共有することと同義である。コンパスの指す向きを誤差を考える場合、いくつかのモデルが考えられる。(すべてのロボットが同じ誤差を持つ場合は、同じコンパスを持っていることと同義なので考えない。)我々はコンパスの誤差を以下の二つの指標からモデル化した。まずはコンパスが指す向きそのものがどの程度ずれるのかを表す「空間的変位」。もう一つは時間的に指す向きが変化するかどうかを示す「時間的変位」である。これらの指標を用いると、ロボットの装備するコンパスは空間的変位を表す ϕ と、時間的変位が生じる(dynami c)か生じない(stati c)かの組み合わせで表現できる。ここで ϕ とは、コンパスの指す向きの最大誤差が ϕ [rad]であるという意味である。よって、 ϕ -static コンパスとは、最大誤差が ϕ [rad]であり、それが時間的に変化しない(アルゴリズム実行中ずっと変わらない)コンパスを表し、一方 ϕ -dynami c コンパスは最大誤差が ϕ [rad]でありその値が時間的に変化するコンパスモデルを表す。我々は、このコンパスモデルを提案すると同時に、ロボットシステムモデルにおける動作の同期性(semi-synchronous, asynchronous)との組み合わせで、一点集合問題(すべてのロボットを平面上の1点に集合させる問題)の可解性について明らかにした。結果を以下にまとめる。

semi-synchronous モデル

- ϕ -static($\phi < \pi/2$) で解ける
- ϕ -static($\phi \geq \pi/2$) で解けない
- ϕ -dynami c($\phi < \pi/4$) で解ける
- ϕ -dynami c($\phi \geq \pi/4$) で解けない

synchronous モデル

- ϕ -static($\phi < \pi/2$) で解ける
- ϕ -static($\phi \geq \pi/2$) で解けない
- ϕ -dynami c($\phi < \pi/6$) で解ける
- ϕ -dynami c($\phi \geq \pi/4$) で解けない

本結果について synchronous + ϕ -dynami c の可解性部分で ϕ の値にギャップが存在するが、 $\phi \geq \pi/6$ では解けないと予想している。これを証明することは、今後の課題である。

コンパスの誤差ではなく、観測結果そのものの誤差を考えることも可能である。つまりコンパスの誤差は「方向」についてのみであるが、実際には「距離」の誤差も考え得る。既存研究では、あるロボット上で観測された他のロボットそれぞれについて、方向と距離の誤差が異なる観測誤差モデルが提案され、いくつかの可解性が明らかになっている。一方で、現実的には誤差は観測装置そのものに依存し、観測対象ごとに誤差が変わらない場合も存在する。そこで我々は各ロボットが装備する観測装置ごとに誤差が決まっているモデルである uniform observation error モデルを提案し、このモデル上での一点収束問題(すべてのロボットを平面上の一点に収束させる問題)に関する可解性を明らかにした。結果として、距離に関する最大誤差は10割未満、方向については $\pi/2$ 未満で一点収束問題を解くことができることを明らかにした。

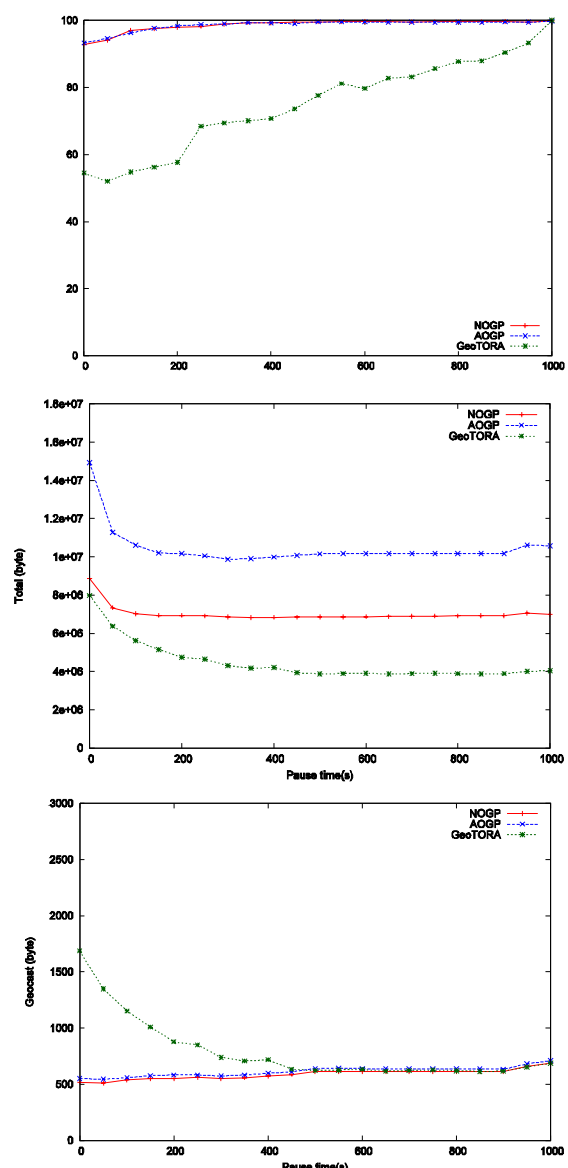
(2) 自己安定システム実現のための基盤技術に関する成果 -低機能端末による MANET での安定なサービス提供の実現-

自己安定システムとは、システムを構成する端末の一時的な故障や通信データの改変等が生じて一時的に異常な状態に陥っても、特別な処理を必要とせず再び正常な状態に戻る性質を持つシステムである。このようなシステムを実現するために利用される分散アルゴリズム(プロトコル)のパラダイムの一つに、自己安定アルゴリズム(self-stabilizing algorithm)がある。自己安定アルゴリズムとは、アルゴリズム開始時のネットワーク初期状況に一切仮定を置かず、任意の状況からアルゴリズムを開始してもやがてシステム全体を目的の状況に到達させることが可能なアルゴリズムである。この性質により、システムが正常にサービスを提供している状況から端末や通信データの障害によってシステムが一時的に異常な状態に陥っても、その状況を初期状況と考えると、やがて正常な状況に復旧することが保証されるシステムが実現可能である。低機能自律移動端末で構成されるネットワークシステム、特に無線によるネットワークシステム(MANET)においては、端末がリセットされる、あるいは一時的に通信が途絶えるなどの一時的な故障「一時故障」が起こる。さらに端末移動によるネットワークトポロジの変化も生じる。これらに対しても自己安定アルゴリズムは対応可能である。自己安定アルゴリズムによって構築されたネットワークシステムは、長期にわたって安定的にサービスを提供することが可能となる。

我々は、MANETにおける安定的なサービスの実現のために二つのアプローチを取った。

一つ目は、自己安定アルゴリズムの性質である「故障状況がネットワーク全体に広がる」ことを防止し、故障状況を局所的に封じ込めることで部分マスク型の故障耐性を実現することである。これを実現する技術として「故障封じ込め (fault containment)」が提案されている。これは故障によって生じた異常な状況を、故障端末の周辺のみ限定し、その他の端末群は正常な動作を行えるようにした自己安定アルゴリズムである。ここで自己安定アルゴリズムの合成について説明する。自己安定アルゴリズムの合成とは、複数の自己安定アルゴリズムを階層的に複数実装し、下位層のアルゴリズムが安定する(目的状況に到達する)と、その状況を入力として上位層のアルゴリズムが実行され、やがて最上位層のアルゴリズムが目的状況に到達することで目的のサービスを実現する仕組みである。このように合成された自己安定アルゴリズムに対しては、先述の故障封じ込めを実現する技術が存在しなかった。そこで我々は、合成された自己安定アルゴリズムについても故障封じ込めを実現するための技術である「timer-based Recovery waiting fault-contain ing compos ition」を提案した。これにより、複数の自己安定アルゴリズムを階層的に合成したシステムにおいても、若干の時間的・メッセージ量的オーバーヘッドによって、故障状況を局所的に抑え込むことが可能となる。

MANET における安定的なサービス実現のための二つの目のアプローチは、高度な情報通信サービスの一つである GeoCast 実現のためのアルゴリズムの提案である。GeoCast とは、特定の場所に存在する端末に対して情報を送信する技術であり、マルチキャスト通信の一形態と考えることができる。一般的なマルチキャストは、マルチキャスト情報を受け取るためにマルチキャストグループに能動的に参加する必要がある。一方、GeoCast の場合は、特定の場所に存在することで自動的に情報を受け取ることが可能となる点で通常のマルチキャストとは異なる。我々は、MANET 上で安定した GeoCast サービスを提供するための基盤技術として自己安定アルゴリズムによる GeoCast アルゴリズムを実現した。ここで安定した GeoCast とは、「発信元が送信したデータが受診すべき端末に到達する確率」が高いことを意味するものと考えた。そこで、提案アルゴリズムについて、ネットワークシミュレータを用いて既存 GeoCast アルゴリズムである GeoTORA と比較した。比較した項目は、発信元が情報を送信した瞬間に GeoCast 対象領域に存在した端末のうち、実際に情報を受け取った割合を表す「正確さ」、GeoCast 実行中にネットワークを流れる総パケット数を表す「通信総量」、



さらに「GeoCast 一回当たりの必要通信量」の3つである。上がそれぞれの結果を示したグラフである。いずれのグラフも、既存の GeoTORA と我々が提案する二つのアルゴリズム NOGP, AOGP を比較したものである。一つ目が正確さのグラフである。横軸がネットワークトポロジ変化の頻度(右に行くほど頻度が少ない)、縦軸が正確さ(%)である。正確さについては、GeoTORA だけが劣っており、NOGP, AOGP は常に 90% 以上を保持している。これは自己安定アルゴリズムの性質によりトポロジが変化しても常に経路を保持し続けることが可能になったためであり、提案アルゴリズムが GeoTORA に比べて安定したサービスを提供可能であることを示している。二つ目が通信総量であり、横軸は先ほどと同じである。これについては GeoTORA が最も低く、続いて NOGP、一番多いのが AOGP である。自己安定アルゴリズムは、常に情報交換を必要とするため、メッセージ総量は増加する。最後に GeoCast 一回当たりのメッセージ数で

ある。横軸は今迄通りである。これに関しては最も悪いのが GeoTORA, NOGP と AOGP については、トポロジ変化にかかわらず一定である。このように我々が提案したアルゴリズムは、通信量に関しては改善の余地を残すものの、既存 GeoCast アルゴリズムに対して優れた点を持つものであることを明らかにした。ただし、通信量は低機能端末においてバッテリー寿命に直結する指標であり、これの改善は大変重要な今後の課題である。

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 (すべて査読有)] (計 6 件)

- ① K. Yamamoto, T. Izumi, Y. Katayama, N. Inuzuka, K. Wada, "The Optimal Tolerance of Uniform Observation Error for Mobile Robot Convergence", Theoretical Computer Science, (to appear).
- ② T. Izumi, S. Souissi, Y. Katayama, N. Inuzuka, X. Defago, K. Wada, "The Gathering Problem for Two Oblivious Robots with Unreliable Compasses", SIAM Journal on Computing, Vol. 41, No. 1, pp. 26-46, (2012).
- ③ 伊藤公一, 片山喜章, 和田幸一, 高橋直久, "MANET 上の GeoCast のための DAG 構成自己安定プロトコルについて", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 111, No. 195, pp. 23-30, (2011).
- ④ 三浦哲平, 片山喜章, 和田幸一, 高橋直久, "DAG を構成する故障封じ込め自己安定プロトコルについて", 情報処理学会研究報告書, Vol. 2011-AL-134, No. 20, pp. 1-8, (2011).
- ⑤ Y. Yamauchi, S. Kamei, F. Ooshita, Y. Katayama, H. Kakugawa, T. Masuzawa, "Timer-based Composition of Fault-containing Self-stabilizing Protocols", Information Sciences, Special Issue on Intelligent Distributed Information Systems, Elsevier, Vol. 180, No. 10, pp. 1802-1816, (2010).
- ⑥ T. Masuzawa, T. Izumi, Y. Katayama, K. Wada, "Communication-efficient Self-stabilizing Protocols for Spanning-tree Construction", Proceedings of 13th International Conference of Principles of Distributed Systems (OPDIS2009), LNCS5923, pp. 219-224, 2009.

[学会発表] (計 6 件)

- ① 伊藤公一, 片山喜章, 和田幸一, 高橋直久, MANET 上の GeoCast のための DAG 構成自己安定プロトコルについて, 電子情報通信学会コンピュータシミュレーション研究会, 2011.09.06, 函館, 北海道. (査読無)
- ② 伊藤公一, 片山喜章, 和田幸一, 高橋直久, DAG 構成のための自己安定アルゴリズムの提案とその評価について, 情報科学ワークショップ 2011, 2011.09.01-03, 福岡. (査読無)
- ③ 三浦哲平, 片山喜章, 和田幸一, 高橋直久, 多段構成自己安定アルゴリズムとグリーディ戦略の関係性に関する考察, 情報科学ワークショップ 2010, 2010.09.03-05, 長島, 三重. (査読無)
- ④ T. Masuzawa, Y. Katayama, T. Izumi, K. Wada, Communication-efficient Self-stabilizing Protocols for Spanning-tree Construction, 13th International Conference of Principles of Distributed Systems, 2009.12.15-18, Nimes, France. (査読有)
- ⑤ Y. Katayama, Rendezvous on faulty autonomous mobile robot, The 10th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, Tutorials 1, 2009.12.08, Hiroshima. (査読無)
- ⑥ K. Yamamoto, Y. Katayama et al., Convergence of Mobile Robots with Uniformly-Inaccurate Sensors, 15th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity, 2009.05.25-27, Piran, Slovenia. (査読有)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

片山 喜章 (KATAYAMA YOSHI AKI)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 10243435

(2) 研究分担者

なし

(3) 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)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 90167198