

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00011

研究課題名(和文)低機能自律移動型端末システムによる問題の可解性解明と実装の検討

研究課題名(英文)A study on relationship between a low function autonomous mobile terminal system model and solvability and its implementation

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文):低機能自律移動型端末システムに関する理論的研究として(1)fatロボット及び離散空間におけるモデルと問題の可解性の関係,(2)メモリ付き端末におけるモデルと問題の可解性,および(3)それらの応用事例に関する問題発見と解決策を明らかにした.

(1)について,集合問題,ランデブー問題を中心に可解性を明らかにした.それと同時に1点包囲問題や新たに緩集合問題を定義しその解法を提案した.(2)について,集合問題およびランデブー問題について,既存モデルでいくつかの最適解を求め,また新規端末モデルの提案を行った.(3)について,移動端末によるアドホックネットワーク上で有用ないくつかのアルゴリズムを提案した.

研究成果の概要(英文):We developed the following three issues as a theoretical study on a low function autonomous mobile robot system: (1) exposing relationship between models of fat robot and discrete space and solvability of problems, (2) exposing relationship between models of terminal with memory and solvability of problems, and (3) discovery of problems and its solution related to practical application examples of the theoretical system.

Regarding (1), we clarified the solvability, focusing on gathering problem and rendezvous problem. At the same time, we defined a point surrounding problem and loose gathering problem, and provided solutions (algorithms) for them. For (2), some optimal solutions were obtained for gathering problem and rendezvous problem in existing models, and a new model was proposed. For (3), we proposed several solutions (algorithms) that are useful on ad-hoc networks consist of the autonomous mobile terminal as transmitters.

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 低機能自律移動型端末 アドホックネットワーク 問題の可解性

1. 研究開始当初の背景

高度道路交通システム(ITS)などのように、複数の移動端末が自律的に判断・行動し、全体としての制約を守りながら目的を達成するシステムを、自律移動型端末システムと呼ぶ。ITS の他にアメーバや粘菌などのような生物も、自律的に移動する小さな物体の集合と考えれば自律移動型端末システムとして捉えることができる。特にこれら生物を構成する各要素のもつ機能は、「感じる、変形する(、伝える)」程度で一般に機能が限られており、このように低機能な端末によるシステムを低機能自律移動型端末システムと呼び、分子ロボティクスや創発システムも含有する広い概念である。

低機能自律移動型端末システムに対する研究のアプローチは、大きく分けると実践的側面と理論的側面がある。実践的研究のアプローチとしての代表的研究のひとつが、ハーバード大学を中心とした "The kilobit Project" である。これは、比較的低機能な自律移動端末が数百あるいは千台程度集まったシステムで、例えば shape self-assembly などの振る舞いを行わせるアルゴリズムについての研究が進められている。他にも 3 種類のロボットが協調して問題解決を行う "Swarm-bots" など実践的研究アプローチの研究成果のひとつである。

一方、理論的側面からの研究としては、鈴木・山下らが 1999 年に理論的な移動端末(ロボット)モデルの提案と形状形成に関する基本的な性質を解明したことをきっかけに、最近に至るまで主に分散システムの理論分野(分散アルゴリズム分野)の研究者らによって活発に研究が進められている。理論的研究分野における基本的な端末のモデルは、通信機能やメモリや ID を持たず、他端末の位置の観測機能と移動機能およびアルゴリズム実行のための計算機能を持つのみであり、「観測(Look)によって得られた他端末の位置情報のみを入力として移動先を決定(Compute)し移動(Move)する」という動作を繰り返す。このように端末のもつ機能が限られているという意味で「低機能」であり、この限られた機能でどのような問題が解けるのか? あるいはある問題に対してどのような機能を追加すれば解けるようになるのか? など「モデルと問題の可解性の関係」を明らかにすることが、低機能自律移動型端末システムの理論的研究の主な興味である。

理論的研究のもうひとつの方向性として、より実システムに近いモデルによる問題へのアプローチがあげられる。先述の端末モデル(基本モデル)では、具備される機能は限られるがそれぞれの機能は無限の精度を持つと仮定され、また端末は容量(体積、面積)を持たず点として扱われる。それに対し実際の端末はどの機能にも誤差がついて回り、もちろん容積も持つ。基本モデルは純粋に理論的なアプローチとして問題の可解性を解明す

るには理想的なモデルであるが、実システムへの応用にはギャップが大きい。

そこで 2004 年頃から、より実システムを反映させたモデルがいくつか提案されている。たとえば、観測、移動やコンパスの誤差を考慮したものがそれである。他にも端末を点ではなく面積を持つ円として扱うモデル(fat モデル)も考えられている。fat モデルは基本モデルと違い、一点への集合が不能で(重なり合えない)、他のロボットの視界を邪魔するなどの特性を持つモデルとして扱われ、より現実の端末に近いものである。それでもまだ実システムとの間にはギャップが存在する。

低機能自律移動型端末システムが実システムとして実現されると、各端末が自律的に動作するため集中制御システムとその間での通信が不要となり、さらにシステムの拡張性・可用性・故障耐性を有するため、人が直接入れない危険地帯や宇宙開発における遠隔地でのタスクの達成が可能になると期待される。

2. 研究の目的

本課題研究では、主に以下の 3 つを目的として研究を進めた。

(1) fat モデルと問題の可解性の解明

fat モデルは、基本モデルと問題の可解性が異なると考えられる。本研究では、基本モデルと fat モデルの可解性の差異を明らかにすることを目標とする。

(2) 離散空間上の問題と可解性の解明

グリッドなどの離散平面上のシステムは連続平面と違い観測や移動機能の誤差を吸収できる可能性がある。一方、端末の動きや存在できる点が限られる制約もあり fat モデルとの整合性も持ち合わせる。そのような可能性と制約の中で、離散平面上での問題の可解性についての解明は、誤差が必然である実システムへの応用を考えたとき重要な研究項目であると考えられる。本研究では、グリッドやヘキサ空間上での基本モデルや fat モデルでの問題の可解性の解明を目標とする。

(3) メモリを有するモデルによる問題の可解性の解明

端末に対して定数ビット程度のメモリを与える。このメモリは、端末自身が参照可能なもの(内部メモリ)、外部端末からのみ参照可能なもの(外部メモリ)に分類され、それらの利用の可否が問題の可解性に敏感に作用する。本項目では、特に内部メモリと外部メモリおよびそれらの間の問題解決能力の差異の解明を目標とする。

(4) 低機能自律移動型端末の実用化の検討

低機能自律移動型端末システムを実用化するための問題点を明らかにし、実用化された場合の応用事例について検討する。特に応用事例については、それを実現するためにシステム側に必要な機能を明らかにするという意味で重要な項目であると考えた。

3. 研究の方法

低機能自律移動型端末システムの理論的研究の主な興味はシステムモデルと問題の可解性に関するものであり、その中でも特に分散システムの基本問題である合意問題 (agreement problem) について深く研究されてきた。本研究課題においても、平面上の1点を合意する問題(集合問題)を集中的に扱い、さらに形状形成問題にもチャレンジした。

具体的な研究方法としては、離散平面, fat モデル, メモリを有する端末に関する文献および研究成果の調査を継続的に行った。中でもメモリを有する端末に関しては研究期間中にいくつかの主要な結果が発表されたため、(3)の目的達成に向けてこれらを集中的に議論した。一方、目的(1),(2)に関しては、研究期間中の研究成果発表は多くなく、我々は独自に問題発見と提案、およびそれらの可解性の解明のためのアルゴリズム開発を行った。(4)については、低機能自律移動型端末システムが生来有する自己安定性(self-stability)を発揮させるべく、応用事例に対してそれを実現するための自己安定分散アルゴリズムの開発を行った。

4. 研究成果

本研究課題における研究成果は、大きく以下の3つに分けられる。

(1) fat ロボット, 離散空間に関する研究成果

fat ロボットおよび離散平面上でのモデルに関する研究成果は、文献[C1, C4, C7, C8, C11, C12, C13, C15]の7篇として発表した。具体的には、2次元の四角格子および六角格子上で集合問題を解くアルゴリズム[C1, C7, C11]や、与えられた点を包囲する1点包囲問題を解くアルゴリズム[C12,13]を提案した。さらに、システム空間を3次元に拡張し、3次元グリッド空間での集合問題[C1]およびその条件を緩和した緩集合問題を定義しそれらを解くアルゴリズム[C4,C8]を提案した。

また、今後の新たな研究の方向性を模索した結果、端末の変形を端末の重ね併せによって表現するモデル及びそのモデルによる直線上行進アルゴリズム[C15]を提案することが出来た。今後の発展が期待できる。

(2) メモリを有するモデルに関する研究成果

メモリを有する端末モデルに関しては、文献[J2, P2, P4, C2, C5, C10, C14]の7編として発表した。具体的には、すべて集合問題を扱っており、問題を解くために必要なメモリ量と端末モデルの関係を明らかにしている。これらのうちいくつかの結果は最適である。なお具体的な結果は多系統かつ複雑なため、それぞれの文献を参考にしていきたい。

(3) 応用事例に関する研究成果

低機能移動型端末によるシステムが実現され利用される場面を想定し、その応用事例(アプリケーション)に必要な問題設定とそれを解くアルゴリズムを文献[J1, J3, J4, J5, P1, P3, P5, P6, C3, C6, C9]の11編として発表し

た。主に移動型端末が通信のための中継器となりアドホックネットワークを構成する場合を想定し、その上での通信路を確保するためのアルゴリズムを提案した。

まず端末が2次元平面上に展開された場合にルーティングを最適化する自己安定分散アルゴリズム[J1, P1, P3, C3], それらを3次元空間に拡張したものの[J3, P5, C9]を提案した。さらに端末の追加削除が頻発するアドホックネットワーク上で高効率通信を実現するためのネットワーク構造構築アルゴリズム[J4, J5, P6]を提案した。また、提案モデルを実機として実現する際の問題点を洗い出すことを目的として実機による理論モデルの実現についても検討した[C6]。

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 5 件)

[J1] Y.Kim, H.Ohno, Y.Katayama, T. Masuzawa, "A Self-Stabilizing Algorithm for Constructing a Maximal (1,1)-Directed Acyclic Mixed Graph", International Journal of Networking and Computing, Vol 8, No.1, pp.53-72, (2018.01).

[J2] T.Okumura, K.Wada, Y.Katayama, "Rendezvous of Asynchronous Mobile Robots with Lights," LNCS, Springer, (accepted).

[J3] Y.Kim, Y.Katayama, "A Self-optimizing Routing Algorithm using Local Information in a 3-dimensional Virtual Grid Network with Theoretical and Practical Analysis," International Journal of Networking and Computing, Vol.7, No. 2, pp.349-371, (2017.07).

[J4] A.Zeb, A.K.M.M.Islam, M.Zareei, I.Al Mamoon, N.Mansoor, S.Baharun, Y.Katayama, S.Komaki, "Clustering Analysis in Wireless Sensor Networks: An ambit of Performance Metrics and Schemes Taxonomy," International Journal of Distributed Sensor Networks, special issue New Challenges of Real-Time Wireless Sensor Networks: Theory and Applications, vol.12, No.7, (2016.07).

[J5] 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, Vol.76, No.1, pp.347--356, (2015.09).

{ 学会発表 } (計 21 件)

[P1] Y.Kim, H.Ono, Y.Katayama, T.Masuzawa, "A Self-stabilizing Algorithm for Constructing (1,1)-Maximal Directed Acyclic Graph," 19th Workshop on Advances in Parallel and Distributed Computational Models, (Florida USA, (May 29 - June 2, 2017).

[P2] T.Okumura, K.Wada, Y.Katayama, "Rendezvous of Autonomous Mobile Robots with Lights in Asynchronous Schedulers", 20th

Korea-Japan Joint Workshop on Algorithms and Computation, (Seoul, Korea, Aug. 2017).

[P3] Y.Kim, Y.Katayama, T.Masuzawa, "An Introduction to A (s,t)-Directed Acyclic Mixed Graph (DAMG) and Maximal (s,t)-DAMG and $t \leq 2$ ", 20th Korea-Japan Joint Workshop on Algorithms and Computation, (Seoul, Korea, Aug. 2017).

[P4] T.Okumura, K.Wada, Y.Katayama, "Optimal Asynchronous Rendezvous for Mobile Robots with Lights", 19th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security, LNCS106116, pp.484-488, (Boston, USA, Nov. 2017).

[P5] Y.Kim, Y.Katayama, "A Self-optimizing Routing Algorithm in a 3-dimensional Virtual Grid Network", 4th International Symposium on Computing and Networking, (Nov., 2016).

[P6] A.Zeb, J.Bangash, A.K.M.M.Islam, S. Baharun, Y.Katayama, A.Rahman, "Network Formation and Data Centric Routing in Wireless Sensor Networks", 1st International Conference on Advanced Information and Communication Technology, (Chittagong, Bangladesh, May, 2016).

[C1] 白川, 和田, 片山, "自律分散ファットロボットの様々なグリッド上での集合問題について", 信学技法, Vol.115, No.510, COMP2015-37, pp.1-10, (2016.03, 福岡)

[C2] 寺井, 和田, 片山, "状態を持つ自律分散ロボット群における集合問題に対するアルゴリズムについて", 信学技報, vol. 116, no. 17, COMP2016-3, pp. 15-22, (2016.04, 奈良)

[C3] 宮川, 片山, 金, "仮想グリッドネットワークにおける経路最適化分散アルゴリズムの改良", 情処研報, 2016-AL-158(8), pp.1-8, (2016.06, 金沢).

[C4] 長尾, 片山, 金, 和田, "三次元グリッド空間における自律分散ロボット群の緩集合問題について", 情処研報, 2017-AL-163(14), pp.1-8, (2017.05, 長崎).

[C5] 寺井, 和田, 片山, "状態を持つ自律分散ロボット群を用いた集合問題の可解性について", 第11回情報科学ワークショップ2015, H-3, (2015.09 名古屋).

[C6] 田邊, 和田, 片山, "自律分散ロボット群の理論モデルに対する実機シミュレーションに関する研究", 第11回情報科学ワークショップ2015, H-4, (2015.09 名古屋).

[C7] 白川, 和田, 片山, "正六角形グリッド上でのファットロボットの集合問題について", 第11回情報科学ワークショップ2015, I-2, (2015.09 名古屋).

[C8] 長尾, 片山, 金, 和田, "三次元グリッド空間における自律分散ロボットの集合の研究", 2016年電子情報通信学会総合大会, D-22-2, (2016.03 福岡).

[C9] Y.Kim, Y.Katayama, "A Self-optimizing Routing Algorithm in a 3-dimensional Virtual Grid Network", 第12回情報科学ワークショップ2016, A-1, (2016.09 山梨).

[C10] 奥村, 和田, 片山, "状態を持つ2台の自律分散ロボットの計算能力について", 第12回情報科学ワークショップ2016, G-2, (2016.09 山梨).

[C11] 白川, 和田, 片山, "自律分散ファットロボットに対する様々なグリッド上における汎用集合アルゴリズムについて", 第12回情報科学ワークショップ2016, G-3, (2016.09 山梨).

[C12] 大藪, 金, 片山, "二次元グリッド平面における自律分散ロボットによる一点包囲アルゴリズムの研究", 2017年電子情報通信学会総合大会, D-1-1, (2017.03 名古屋).

[C13] 大藪, 金, 片山, "二次元グリッド平面における自律分散ロボットによる一点包囲アルゴリズムについて", 第13回情報科学ワークショップ2017, 2A, (2017.09 奈良).

[C14] 奥村, 和田, 片山, "ライトを持つ2台の自律分散ロボットのランデブーについて", 第13回情報科学ワークショップ2017, 2A, (2017.09 奈良).

[C15] 山田, 金, 片山, "自律分散ロボットを用いた amoebot 再現モデルに関する研究", 2018年電子情報通信学会総合大会, D-1-1, (2018.03 東京).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

特記事項無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

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

(4) 研究協力者

金 鎔煥 (Kim Yonghwan)