

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：平成 21 年度 ～ 平成 23 年度

課題番号：21500013

研究課題名（和文） モバイル計算粒子の基づく分散システムの統一モデルとその計算限界

研究課題名（英文） A universal model for distributed systems based on mobile computational particles and its computational bound

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：移動能力を有するエンティティ（モバイル計算粒子(Mobile Computational Particle:MCP)と呼び、MCP と略記する）から構成される分散システムの特徴を、システムの規模、機器の計算能力、機器の移動能力、通信能力の多様性、システムの不確実性の観点から分析し、自律的分散ロボット群、創発現象、分子計算までを包括するモバイル計算粒子を要素とする分散システムに内包する本質的な特性を解明し、モバイルネットワークとして統一的な取扱いを可能とするモデル化を行い、そのモデル化を利用して、モバイルネットワークの理論的計算限界を明らかにした。個々の分散システムで構築したモデルで見直すことによって、従来の未解決問題に対する新たな視点を与えること及び、新たな問題の創造の可能性を実証した。

研究成果の概要（英文）：We have analyzed distributed systems consisting of mobile entities called mobile computational particles (MCP for short) from the viewpoints of the system size, computational power of particles, mobile power of particles, communication power, uncertainty of systems, have resolved essential features involved in mobile distributed systems consisting of MCPs, including autonomous mobile robots, emergent systems and molecular computation and have developed their computational bounds. We have also given new viewpoints for their previous open problems and verified possibility of newly creative problems.

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	1,200,000	360,000	1,560,000
平成 22 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
平成 23 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：モバイル粒子，自律分散ロボット群，個体群プロトコル，センサーネットワーク，耐故障性，計算限界

1. 研究開始当初の背景

「いつでも、どこでも、誰でも、何でも」
容易にネットワークに接続できるアンビエ

ントネットワークの実現にむけて、さまざまなプロジェクトが推進されている。あらゆる規模の計算機、自律型ロボット、携帯電話、

センサー、電子タグなどで構成されているため、ネットワーク規模はペタスケール (10^{15} ~ 10^{18})にも達するといわれている。自律分散ロボット、創発現象、モバイルエージェント、センサー、アモルファスなどさまざまなネットワークの能力を明らかにするために、数多くの理論モデルが構築されている。しかしながら、さまざまな分散システムモデルを対象にモデルごとに独立に行われ、異なる分散システムモデル間での研究成果や知見の体系的な共有ができていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、分散システムを構成する要素が「移動するエンティティ」(モバイル計算粒子:MCP)であることに焦点をあて、ペタスケールまで達するシステムの規模、粒子(機器)の計算能力と移動能力、通信能力の多様性、システムの不確実性の観点から「モバイル計算粒子に基づくネットワーク」に内包する本質的な特性を解明するとともに、そのシステムとしての計算能力限界を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) モバイル計算粒子(MCP)ネットワークを対象とした分散システムモデルを構築するために、まず従来のモバイルネットワークである自律分散ロボット群、ソフトウェアモバイルエージェント、携帯電話網、モバイルセンサネットワーク、分子計算網における以下の項目に関して調査、分析し、モデルの整理を行う。

(a)システムの規模と粒子の計算能力: システムの規模は、自律分散ロボット(数十~)からペタスケール分子計算網(10^{18})までを取扱う。粒子の計算能力は有限状態機械からチューリング機械(通常の計算機)までを取扱い、メモリは無記憶性から無限までを考える。ここでは、計算限界を理論的に議論するため、無記憶性を有する計算万能な粒子や無限メモリをもつ有限状態粒子なども考慮する。

(b)粒子の移動能力: 粒子の移動能力は粒子がどの程度自律的に動作できるかによって分類する。自律分散ロボットのように完全に自分の意志で能動的に動作できる粒子(完全アクティブ粒子)から、分子のように自分の意志とは無関係に動作しなければならない粒子(完全パッシブ粒子)とその中間を考え、それぞれの粒子のみからなるもの、アクティブ粒子とパッシブ粒子が混在したものなどを考えなければならない。

(c)通信能力の多様性: 通信能力は通信方法と通信の主体性を考慮する。通信方法は分散システムにおける粒子同士のメッセージ通

信か共有メモリを介して粒子同士が情報を交換するかである。しかしながら、モバイル分散システムにおいては、物理的な共有メモリは存在しないので、自律分散ロボットのように、全員のロボットが観測可能なロボットの位置情報(スナップショット)が共有メモリに相当するため、従来の共有メモリとは異なったものとなる。また、メッセージ通信にしても、粒子が移動するため、通信する粒子同士が時間とともに変化することも考慮しなければならない。通信の主体性は、送りたい相手に直接情報を伝達可能な場合とそうでない場合を考える。そうでない場合の例としては、送りたい相手には直接情報を送ることができず、自分の状態を変化させ、それを相手に間接的に知らせるといったような場合である。モバイルネットワークではこのような通信が主となると考えられる。

(d)システムの不確実性: これは粒子の故障によるものとゆらぎのようにシステムに固有に存在するものがある。粒子の故障は従来の方法でモデル化可能だが、ゆらぎのようなシステムの状態をいかにモデル化するかが問題である。

以上の特性を反映できる枠組みとしてのモバイル計算粒子ネットワークモデルを提案する。

(2) 個々のモバイルモデルと統一モデルとの対応を明らかにする。特に、これまで継続して行ってきた自律分散ロボット群と Population Protocol は統一モデルからのフィードバックとして以下のような問題に取り組む。

(a) 自律分散ロボット群: 理論モデルは完全非同期モデル(CORDA)とロボット動作が瞬時に行えるがロボット同士は同時には動作しない部分非同期モデル(SYM)の計算能力差が大きな未解決問題として残されている。また、これまでの自律分散ロボットに対する自己安定性はロボットの無記憶性に依存しており、無記憶性に依存しない自己安定アルゴリズムの設計手法が耐故障性の観点からも重要である。これらに関しては統一理論モデル化における特性の分類や通信能力の新たな視点が解決の糸口になると考えている。さらに、ロボットシステム内に利用できる(共有)メモリ構築する手法や単一なタスクだけでなく複数タスクを組み合わせた問題をロボット群に実行させるにも、統一モデルで導入した、ロボット位置のスナップショットをシステム内の共有メモリを利用した通信とみなす考え方が利用可能である。

(b) Population Protocol: PPはまだまだ解くべき問題が山積みしているが、統一モデルからのフィードバックとしては、計算限界を明らかにすることがあげられる。統一モデルで行った粒子の移動能力と通信能力の分類に

基づいて、計算能力がどのようになるかを考察する。

4. 研究成果

統一モバイルネットワークモデル構築のために、自律分散ロボット群、モバイルセンサーネットワークの考察によって、モバイル計算粒子に基づくネットワークに内包する本質的な特性を解明するとともに、そのシステムとしての計算能力限界を明らかにすることは達成できた。主な結果は以下の通りである。

(1)自律分散ロボット群に対する耐故障性モデルの構築と計算限界の解明：自律分散ロボット群の理論モデルにおいては、ロボットを点とする匿名ネットワークで、ロボットは無記憶性である。一方、ロボット同士の直接通信はできず、通信は周りのロボットの位置を（正確に）判断し、そこから次の移動位置を（正確に）計算でき、（正確に）目的位置まで移動可能なモデルである。このモデルはモバイル計算粒子（ロボット）が匿名で無記憶性であるなど能力が抑えられている反面、ロボットのセンサ能力、計算能力や移動能力が非常に強力であるという特性をもつ。このことによって、解くべき問題の本質が明らかになることを可能にしており、このモデルが卓越した理論モデルである所以である。しかしながら、このモデルにおける耐故障性に関しては、これまで各ロボットの故障以外考えられていない。本研究では、ロボットのセンサーに関する故障をロボットの持つコンパスの誤差（正しい方向との角度差）でモデル化を行った。また、誤差が時間と共に変化する場合（動的コンパス）と固定されている場合（静的コンパス）を考察した。ロボット群の動作が動作するロボットは同期的に動く（ATOM モデル）と完全非同期（CORDA モデル）のいずれの場合を考え、ロボットの1点集合問題に対して、コンパスと同期性のそれぞれの場合に対して計算限界を以下のように示した（雑誌論文⑤）。

(a)（静的コンパス，ATOM モデル）2台のロボットに対する1点集合問題に対して、角度のずれが ϕ で動作するアルゴリズムが存在する必要十分条件は $0 \leq \phi < \pi/2$ である。

(b)（静的コンパス，CORDA モデル）2台のロボットに対する1点集合問題に対して、角度のずれが ϕ で動作するアルゴリズムが存在する必要十分条件は $0 \leq \phi < \pi/4$ である。

(c)（静的コンパス，ATOM モデル）2台のロボットに対する1点集合問題に対して、角度のずれが ϕ で動作するアルゴリズムが存在する必要十分条件は $0 \leq \phi < \pi/2$ である。

(d)（動的コンパス，CORDA モデル）2台のロボットに対する1点集合問題に対して、角度のずれが ϕ で動作するアルゴリズムが存在

する十分条件は $0 \leq \phi < \pi/6$ である。

(d)の場合（動的コンパス，CORDA モデル）を除いて計算限界の上下界が一致している。

さらに、ロボットの視界が実際と異なるような故障モデルに対して、従来のモデルよりもより現実性のあるように修正したモデルでも1点集合問題は非可解であること、及び1点集合問題を弱めた1点集合問題に対するアルゴリズムを与えた（雑誌論文②）。また、故障ロボットを含む自律分散ロボット群に対して、故障をより一般化し、フロッキング問題を解くプロトコルを与えた（雑誌論文⑦）。

②能力の弱いモバイルセンサーネットワークの効率的な構築と計算限界の解明：モバイルセンサーネットワークや分子計算を包括する理論モデルとして、個体群プロトコル（Population Protocol: PP）モデルが提案されている。PPはモバイル計算粒子を定数メモリを有する有限状態機械とした匿名ネットワークで構成され、粒子間の直接通信はなく、近接した粒子のみが干渉して状態を変えることにより計算がなされる。ネットワーク全体の粒子の状態が計算結果となるモデルである。PPはモバイルセンサーネットワークからアモルファス計算を含む分子計算までもモデル化が可能であると考えられ、モバイルネットワークの理論モデルとしては非常に有望である。しかしながら、研究は始まったばかりであり、現在までに計算能力が明らかにされたところであり、ネットワークとしての計算能力はそれほど高くなく（プレスブルガー算術と同じ）、一般のモバイルネットワークとしてのモデルにするためには新たな方向性が必要である。本研究では、自己安定なリーダー選出問題をPPで解くために必要なメモリ量の下界を導出する一般的な手法を与え、その下界値でリーダー選出問題を解くプロトコルを与えた（雑誌論文④）。ここで得られたメモリ下界導出法は他の問題にも適用可能である。また、PPでは系内にあるセンサー数を計算することは能力上できないが、センサー以外に能力の高いエージェント（基地局という）を加えるとセンサー数を求めることが可能である。しかしながら、このモデルでは自己安定で計数問題を解くプロトコルは存在しない。本研究では、基地局のみ初期化を許し、他のセンサーは任意の初期状態で動作するメモリ効率のよい計数プロトコルを与えた（学会発表⑦）。MCPにおける統一モデルとしてはPPモデルが非常に有望であることが確認できた。最終的なMCPによる統一的なモデル構築には至らなかったが、本研究で得られた上記の結果と知見を利用した統一的モデルの構築は残された課題である。

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] (計 8 件)

- ① A.K.M.M. Islam, K. Wada, J. Uchida, W. Chen, 7. A better dynamic cluster-based structure of wireless sensor network for efficient routing, to appear in International Journal of Innovative Computing, Information and Control(IJICIC), 8, 9, (Sep. 2012) 16 pages(査読有).
- ② K. Yamamoto, T. Izumi, Y. Katayama, N. Inuzuka, K. Wada, 8. The optimal tolerance of uniform observation error for mobile robot convergence, to appear in Theoretical Computer Science, (2012) (査読有).
- ③ J. Hosoda, J. Hromkovic, T. Izumi, H. Ono, M. Steinova, K. Wada, On the approximability and hardness of minimum topic connected overlay and its special instances, Theoretical Computer Science, 429, 20, (Apr. 2011) 144-154(査読有).
- ④ S. Cai, T. Izumi, K. Wada, How to prove impossibility under global fairness: On space complexity of self-stabilizing leader election on a population protocol model, Theory of Computer Systems, 50, 3, (Apr. 2012) 433-445(査読有).
- ⑤ T. Izumi, S.Souissi, Y. Katayama, N. Inuzuka, X. Defago, K. Wada, M. Yamashita, The gathering problem for two robots with unreliable compasses, SIAM Journal on Computing, 41, 1, (Jan. 2012) 26-46(査読有).
- ⑥ N. Banu, T. Izumi, K. Wada, Adaptive and doubly-expedited one-step consensus in Byzantine asynchronous systems, Parallel Processing Letters, 21, 4, (Dec. 2011) 461-477(査読有).
- ⑦ S. Souissi, T. Izumi, K. Wada, 14. Oracle-based flocking of mobile robots in crash-recovery model, Theoretical Computer Science, 412, 33,

(Jul. 2011) 4350-4360(査読有).

- ⑧ To. Izumi, Ta. Izumi, H. Ono, K. Wada, Approximability and inapproximability of the minimum certificate dispersal problem, Theoretical Computer Science, 411, 31-33, (Jun. 2010), 2773-2783(査読有).

[学会発表] (計 13 件)

- ① Ta. Izumi, To. Izumi, H. Ono, K. Wada Minimum Certificate Dispersal with Tree Structures, , 9th annual conference on Theory and Applications of Models of Computation, LNCS 7287, (May 19th 2012) 548-559.
- ② T. Izumi, Z. Bouzid, S. Tixeuil, K. Wada, The BG-simulation for Byzantine mobile robots (Brief Announcement), 25th International Symposium on Distributed Computing, LNCS 6950, (Sep. 21st 2011) 330-331.
- ③ J. Hosoda, J. Hromkovic, T. Izumi, H. Ono, M. Steinova, K. Wada, On the Approximability of Minimum Topic Connected Overlay and Its Special Instances, 36th International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science, LNCS 6907, (Aug. 25th 2011) 376-387.
- ④ A.K.M. Islam, W. Chen, K. Wada, Time-efficient data congregation protocols on Wireless Sensor Network, 6th International Symposium on Ubiquitous Virtual Reality (ISUVR2011), (July 2nd 2011), 33-36
- ⑤ A.K.M. Islam, K. Wada, S. S. Abdullah, J. Uchida, W. Chen, An efficient routing protocol on a dynamic cluster-based architecture for wireless sensor networks, 6th Int'l ICST Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks (Crown Com 2011), (June 2nd 2011), 6pages.
- ⑥ S. Souissi, T. Izumi, K. Wada, Byzantine-tolerant circle formation by oblivious mobile robots, 2011 International Conference on Communications, Computing and Control Applications, (Mar. 15th 2011) 10pages.
- ⑦ K. Kinpara, To. Izumi, Ta. Izumi, K. Wada, Improving space complexity of

self-stabilizing counting on mobile sensor networks, 14th International Conference of Principles of Distributed Systems (OPODIS 2010), LNCS 6490, (Dec. 16th 2010), 504-515.

- ⑧ N. Banu, T. Izumi, K. Wada, Doubly-expedited one-step Byzantine consensus, Proceedings of the 2010 IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks(DSN), Dependable Computing and Communication Symposium(DCCS), (Jun. 30th 2010) 373-382.
- ⑨ T. Masuzawa, T. Izumi, Y. Katayama, K. Wada, Communication-efficient self-stabilizing protocols for spanning-tree construction (Brief Announcement), 13th International Conference of Principles of Distributed Systems (OPODIS09), LNCS 5923, (Dec. 17th 2009) 219-224.
- ⑩ S. Souissi, T. Izumi, K. Wada, Oracle-based flocking of mobile robots in crash-recovery model, 11th International Symposium of Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS 2009), LNCS 5873, (Nov. 5th 2009) 683-697.
- ⑪ To. Izumi, Ta. Izumi, H. Ono, K. Wada, Relationship between approximability and request structures in the minimum certificate dispersal problem, 15th Annual International Computing and Combinatorics Conference (COCOON 2009), LNCS5609, (July 13th 2009) 56-65.
- ⑫ S. Cai, T. Izumi, K. Wada, Space complexity of self-stabilizing leader election in passively-mobile anonymous agent, 16th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO 2009), LNCS 5869, (May 2009) 113-125.
- ⑬ K. Yamamoto, T. Izumi, Y. Katayama, N. Inuzuka, K. Wada, Convergence of mobile robots with uniformly-inaccurate sensors, 16th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO 2009), LNCS 5869, (May 31st 2009) 320-333.

6. 研究組織
(1)研究代表者

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

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者

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

泉 泰介 (IZUMI TAI SUKE)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：20432461