

令和 3 年 5 月 25 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K00019

研究課題名(和文) CPSに基づいた自律分散ロボット群に対する理論的モデル化とその計算限界の解明

研究課題名(英文) A Theoretical Model for Autonomous Mobile Robots based on CPS and Limitations of its Computation

研究代表者

和田 幸一 (Wada, Koichi)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：90167198

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：CPSを考慮に入れた自律分散ロボット群に理論モデル構築とその上でのロボット群の計算能力に関して主として以下の成果を得た。(1) CPSを意識した新しい自律分散ロボット群のモデル化とその上でのロボットに対するオンライン経路探索アルゴリズムを開発した。(2) 従来のLCMロボットモデルにおける集合問題の可解性を耐故障性の観点から明らかにした。(3) ライト付きロボット群に対する計算能力を明らかにした。(4) リングネットワークにおける制限視野をもつライト付きロボット群の集合問題に対する色数最適なアルゴリズムを与えた。このアルゴリズムはロボットの動作が完全な非同期でも動作する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CPSに基づいた自律分散ロボットに対する理論的モデルの構築とその上での自律分散ロボット群の計算能力の解明は、分散情報学における分散アルゴリズムの進展に寄与するところが大きい。また、CPSに基づいた自律分散ロボット群の理論的モデルはより現実的な条件を取り入れているので、実機開発における評価基準となりえる可能性が高い。特に完全非同期で動作する制限視野をもつライト付きロボット群に対するアルゴリズムはその一例である。

研究成果の概要(英文)：We construct a theoretical model based on CPS for autonomous mobile robots and obtain several results about the computational power of autonomous mobile robots as follows: (1) A new model for mobile robots including the concept of CPS is proposed and an online routing algorithm for mobile robots is developed. (2) We give fault-tolerant gathering algorithms on an LCM robot model. (3) We clarify the computational power of mobile robots with lights. (4) We solve gathering problem of myopic mobile robots on ring-shaped networks, which can behave in completely asynchronous fashion.

研究分野：並列分散アルゴリズム

キーワード：自律分散ロボット CPS 非同期度 集合問題 自己安定 ライト

## 1. 研究開始当初の背景

実世界(物理システム)環境における実体の監視と制御に計算と通信が密接に連携するシステムが Cyber-Physical Systems(CPS)と言われている。ITS やセンサーネットワークなどのユビキタスサービスは CPS の例であるが、CPS ではより実世界とのかかわりを意識し、サイバー空間の計算能力を組み合わせ、社会的な課題を解決しようとしており、米国では NSF (National Science Foundation) が、さまざまな部門が掲げる課題を解決する基礎的研究の最重点課題のひとつとして 2006 年より CPS を掲げており、現在も最重要課題の一つに挙げられている。日本においても、国会図書館が知的基盤を整備するために、「知的インフラ」としての CPS の整備が求められている。また、世界に点在するデータは 2010 年でエクサバイト(ペタバイトの 1000 倍)レベルになっており、2020 年までにはその 1000 倍(ゼットバイト)に達するといわれている。CPS を分散ネットワークシステムとしてとらえると、その規模、構成機器や通信の多様性、システムのダイナミクス、および、機器の動作通信の不確かさの増大が著しい。そのため、システムが変化する環境のなかで自らを存続させる自己安定性、及び環境の変化に応じて、新たな安定状態すなわち秩序を求めて創造的に適応する自律適応性がこれまで以上に求められる。また、最近では、自律分散ロボット群、センサネットワーク、分子計算など、新たな形態の次世代分散システムについても、自己安定で自律適応をめざした分散アルゴリズムの研究も国内外で行われているが、自己安定性や自律適応性に関しては定性的な議論にとどまっている。特に、自律分散ロボット群による分散計算に関しては、鈴木山下の独創的な理論モデルが構築されて以来、このモデルのもとでロボット群の能力に関して数多くの研究がなされている。しかしながら、ロボットの能力と問題の可解性のみが明らかにされているのが現状であり、ロボットのエネルギーやアルゴリズムの効率性に関しては現在のモデルにおいては議論できない。申請者は、モバイルセンサーネットワーク、自律分散ロボット群、個体群プロトコルなどのさまざまな分散システムモデルを対象として、スケーラビリティ、多様性やダイナミクスに対する適応性や不確かさに対する頑強性(ロバストネス)を実現するための分散アルゴリズムについて研究を行ってきた。また、これまで科研費基盤研究(C)において、移動分散システムを統一的に取り扱い可能なモデルの構築を行い、その計算能力の限界を明らかにした。これは、従来モデルごとに独立に行われていたものを、モバイルネットワークとして統一的な取り扱いが可能なモデルを構築し、その本質的な特性を明らかにしたものである。そのなかで、CPS は、自己安定性と、自律適応性がより以上求められており、CPS がシステムとしてどの程度自己安定可能か、自律適応システムから創出できるものはなにかを解明する必要がある、それが CPS において本質的なもののひとつであるという考えに至った。また、自律分散ロボット群を、CPS としてペタスケールの分子計算からソフトウェアのモバイルエージェントをも含む大きな枠組みでとらえることによって、その自己安定性や自律適応性の観点から自律分散ロボット群の計算能力を明らかにできる可能性を秘めている。

## 2. 研究の目的

本研究は、まず CPS がシステムとして内包しなければならない自己安定性、及び自律適応性を解明するために、CPS をシステムの規模、機器の計算能力、通信能力の多様性、システムの不確かさの観点から分析し、CPS が内包する自己安定性と自律適応性に関する定量評価可能な指標を構築する。また、CPS としてとらえた自律分散ロボット群の新しい理論モデルを構築し、それらの指標を利用して、自律分散ロボット群を自己安定または自律適応可能な分散システムの計算限界を明らかにするとともに、自律分散ロボット群によって取り扱い可能な新しい問題とその分散アルゴリズムを創出することにより、それらを積極的に利用した分散計算の理論的基盤の確立を目的とする。

(1) CPS の分析: CPS は生活環境に偏在する物理エレメントと計算エレメントをより強固、密接に結びつけたシステムとして適応性、自律性、効率性、安全性、利便性を高度化したものであるために、それらを分散計算の枠組みに取り込むために、CPS の理論的分析を行う。CPS の特徴として、(a) ペタスケールを含む巨大規模、(b) 構成エレメントや環境の空間的、及び、時間的多様性、(c) CPS 内部または外部環境に内在するダイナミクス、(d) 構成要素の動作や入力の不確かさを取り上げ、これらを分散システムとして反映できるかどうかを明らかにする。

(2) 自己安定性と自律適応性の定量化: システムの規模、多様性、ダイナミクス、および、不確かさの増大が著しい環境下での CPS を考えるとき、環境の変化に対応可能な自己安定性と自律適応性の実現は重要である。しかしながら、これまでの分散システムにおける自己安定性は定性的なものであり、自律適応性に関しては、個別のモデルごとに考えられているものにすぎない。本研究では、(1)で分析した CPS の特徴に対して、自己安定性と自律適応性の本質的な性質を解明し、それらの定量的な指標を提案する。自己安定性は、変化する環境のなかで自らを存続させ、所望の状態にシステムを安定させる。これまでの研究では、所望の状態に必ず遷移すること、及び一たびその状態に遷移すると以降はその状態を維持することのみが議論されている。ここでは、システムの持つ「エントロピー」のような概念を導入することによって、これをどの程度減らせるかというような定量化を目指す。自律適応性に関しては、環境の変化に応じて、あら

たな安定状態（これを「秩序」と呼ぶ）を求めて創造的に適応することと考えており、この秩序に関する定量的な指標を提案することを目的としている。また、自己安定システムは、任意の初期状態から安定しなければならないので、本質的に停止しないシステムである。永遠に動作し続けるシステムからどのような秩序をどの程度創出可能であるかを議論できるような指標を目指す。

(3) 自律分散ロボット群のモデルとその計算能力の解明：自律分散ロボット群を分子計算やソフトウェアのモバイルエージェントをも包括できるように、(1)で分析したCPSの特徴を利用して新たな理論モデルを構築する。そのモデルのもとで(2)の自己安定性と自律適応性に関する定量指標を用いた新しい問題とその分散アルゴリズムを創出する。

### 3. 研究の方法

CPSの特徴である(a)ペタスケールを含む巨大規模、(b)構成エレメントや環境の空間的、及び、時間的多様性、(c)CPS内部または外部環境に内在するダイナミクス、(d)構成要素の動作や入力の不確かさを取り上げ、(1)CPSの特徴を分析する。その分析に基づき、規模、多様性、ダイナミクス、および、不確か性の増大が著しい環境下でのCPSを考え、環境の変化に対応可能な(2)自己安定性と自律適応性の定量化の指標を考案する。

また、(1)の特徴分析に基づき、自律分散ロボット群のモデル化を行い、(2)の自己安定性、自律適応性に関する定量指標に基づいた自律分散ロボット群の分散計算としての計算限界を明らかにする。

### 4. 研究成果

平成29年度—平成30年度

従来の自律分散ロボット群モデルにロボットがライト(状態)を搭載することによる計算能力の限界を明らかにした。特に、ライトが自身と他のロボットがともに認識できる場合(full-light)、他のロボットのみが認識できる場合(external-light)に対して、ライトの色数最小のランデブーアルゴリズムを開発した。また、ロボットの動作仮定に関して、移動位置まで必ず到達する場合(rigid)、必ずしも移動位置まで到達しない場合(non-rigid)を考慮している。non-rigidの場合は全く移動しないと問題が解けなくなるため、最小移動距離( $\delta > 0$ )は移動するものと仮定している。この $\delta$ の値をロボットが知っている場合(non-rigid+ $\delta$ )も考察している。具体的に得られた成果は以下の通りである。

(1) ロボットが非同期に動作する(ASYNC)とき、ランデブーはnon-rigid+ $\delta$ を仮定した場合、2色のfull-lightで解ける。非同期を少し制限したモデル(LCatomicASYNC)の場合、ランデブーはnon-rigidの下で2色のfull-lightで解ける。  
(2) アルゴリズムの動作をライトの状態だけで決定するアルゴリズムをL-アルゴリズムと呼ぶ。L-アルゴリズムを用いた場合は、ASYNCにおいては任意の色数を持つexternal-lightを用いてもランデブーは解けないことが示されていた。ここでは、LC-atomicASYNCにおいて、external-lightにおける色数最適なL-アルゴリズムが構成できることを示した。特に、非自己安定、擬似自己安定、自己安定のそれぞれの場合について、色数が最適なL-アルゴリズムを示した。

令和元年度—令和2年度

CPSを考慮に入れた自律分散ロボット群に理論モデル構築とその上でのロボット群の計算能力に関して以下の成果を得た。

(1) CPSを意識した新しい自律分散ロボット群のモデル化とその上でのロボットに対するオンライン経路探索アルゴリズムを開発した。

(2) 従来のLCMロボットモデルにおける集合問題の可解性を耐故障性の観点から明らかにした。

(3) 従来のLCMロボットモデルにおけるスケジューラに対する自己安定化を考慮した効率的な実現手法を与えた。また、ビザンチン故障を許したロボット群に対する自己安定アルゴリズム手法を開発した。

(4) ライト付きロボット群に対する計算能力を明らかにした。特に、ロボットの持つメモリとロボット間の直接通信の能力に焦点をあて、ロボットの同期度との関係を解明した。また、モデルチェックングを利用したライト付きロボットアルゴリズムの検証法を開発した。

(5) リングネットワークにおける制限視野をもつライト付きロボット群の集合問題に対する色数最適なアルゴリズムを与えた。このアルゴリズムはロボットの動作が完全な非同期でも動作する。

いずれの結果もCPSを考慮した新しい自律分散ロボット群のモデル化とそのモデル化のもとでの計算能力に対する限界の解明に寄与するものである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 12件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Xavier Defago, Yuval Emek, Shay Kutten, Toshimitsu Masuzawa, Yasumasa Tamura	4. 巻 179
2. 論文標題 Communication Efficient Self-Stabilizing Leader Election	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 DISC 2020	6. 最初と最後の頁 11:1-11:19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.DISC.2020.11	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Xavier Defago, Maria Potop-Butucaru, Philippe Raipin-Parvedy	4. 巻 33
2. 論文標題 Self-stabilizing gathering of mobile robots under crash or Byzantine faults	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Distributed Computing	6. 最初と最後の頁 393-421
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00446-019-00359-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Okumura Keisuke, Machida Manao, Xavier Defago, Tamura Yasumasa	4. 巻 -
2. 論文標題 Priority Inheritance with Backtracking for Iterative Multi-agent Path Finding	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IJCAI 2019	6. 最初と最後の頁 535-542
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24963/ijcai.2019/76	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shlomi Dolev, Sayaka Kamei, Yoshiaki Katayama, Fukuhito Ooshita and Koichi Wada	4. 巻 146
2. 論文標題 Brief Announcement: Neighborhood Mutual Remainder and its Self-Stabilizing Implementation of Look-Compute-Move Robots	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of 33rd International Symposium on Distributed Computing (DISC 2019)	6. 最初と最後の頁 43:1-43:3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.DISC.2019.43	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Xavier Defago and Adam Heriban and Sebastien Tixeuil and Koichi Wada	4. 巻 146
2. 論文標題 Brief Announcement: Model Checking Rendezvous Algorithms for Robots with Lights in Euclidean Space	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of 33rd International Symposium on Distributed Computing (DISC 2019)	6. 最初と最後の頁 41:1-41:3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.DISC.2019.41	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shlomi Dolev, Sayaka Kamei, Yoshiaki Katayama, Fukuhito Ooshita, Koichi Wada	4. 巻 11914
2. 論文標題 Brief Announcement: Self-stabilizing LCM Schedulers for Autonomous Mobile Robots Using Neighborhood Mutual Remainder	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 127-132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-34992-9_11	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yotam Ashkenazi, Shlomi Dolev, Sayaka Kamei, Fukuhito Wada	4. 巻 11914
2. 論文標題 Brief Announcement Forgive & Forget: Self-stabilizing Swarms in Spite of Byzantine Robots	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 16-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-34992-9_2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yotam Ashkenazi, Shlomi Dolev, Sayaka Kamei, Fukuhito Ooshita, Koichi Wada	4. 巻 -
2. 論文標題 Forgive & Forget: Self-Stabilizing Swarms in Spite of Byzantine Robots	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 Seventh International Symposium on Computing and Networking Workshops (CANDARW)	6. 最初と最後の頁 188-194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CANDARW.2019.00041	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fabian Frei and Koichi Wada	4. 巻 149
2. 論文標題 Efficient Circuit Simulation in MapReduce	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 30th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2019)	6. 最初と最後の頁 52:1-52:21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.ISAAC.2019.52	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Paola Flocchini, Nicola Santoro, and Koichi Wada	4. 巻 153
2. 論文標題 On Memory, Communication, and Synchronous Schedulers When Moving and Computing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. 23rd International Conference on Principles of Distributed Systems	6. 最初と最後の頁 25:1-25:17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.OPODIS.2019.25	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sayaka Kamei, Anissa Lamani, Fukuhito Ooshita, Sebastien Tixeuil and Koichi Wada	4. 巻 153
2. 論文標題 Gathering on Rings for Myopic Asynchronous Robots with Lights	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. 23rd International Conference on Principles of Distributed Systems	6. 最初と最後の頁 27:1-27:17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.OPODIS.2019.27	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Okumura, K. Wada, Y. Katayama	4. 巻 11011
2. 論文標題 Rendezvous of Asynchronous Mobile Robots with Lights	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 434-448
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-98355-4_25	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Terai, K. Wada and Y. Katayama	4. 巻 arXiv:1811.12068v1
2. 論文標題 Gathering problems for autonomous mobile robots with lights	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 1-39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Okumura, K. Wada, X. Defago	4. 巻 125
2. 論文標題 Optimal Rendezvous L-Algorithms for Asynchronous Mobile Robots with External-Lights	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 22nd International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS 2018), LIPICS	6. 最初と最後の頁 24:1-24:16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.OPODIS.2018.24	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okumura Keisuke, Tamura Yasumasa, Defago Xavier	4. 巻 -
2. 論文標題 Amoeba Exploration: Coordinated Exploration with Distributed Robots	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The 9th International Conference on Awareness Science and Technology (iCAST)	6. 最初と最後の頁 191-195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICAwST.2018.8517225	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Defago Xavier, Potop-Butucaru Maria, Tixeuil Sebastien	4. 巻 11340
2. 論文標題 Fault-Tolerant Mobile Robots	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 234-251
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-11072-7_10	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 森 将真, 田村 康将, Defago Xavier	4. 巻 -
2. 論文標題 非同期自律分散モバイルロボット群における排他制御とその効率化	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第18回複雑系マイクロシンポジウム	6. 最初と最後の頁 3-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Okumura, K. Wada, Y. Katayama	4. 巻 10616
2. 論文標題 Brief Announcement: Optimal Asynchronous Rendezvous for Mobile Robots with Lights	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Lecture Note in Computer Science	6. 最初と最後の頁 484-488
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-69084-1_36	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nur Syazwani Ghazali, Sabariah Baharun, A. K. M. Muzahidul Islam, K. Wada	4. 巻 80
2. 論文標題 Designing a Maintenance Free Multi-Channel Wireless Sensor Network Protocol	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 UTM Jurnal Teknologi	6. 最初と最後の頁 67-75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11113/jt.v80.6298	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 Xavier Defago
2. 発表標題 Distributed Agreement and Robot Coordination
3. 学会等名 JFLI-Tokyo Tech Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Xavier Defago
2. 発表標題 Distributed Algorithms for Robot Systems
3. 学会等名 149th NII Shonan Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xavier Defago
2. 発表標題 Model Checking Robot Algorithms in Euclidean Space
3. 学会等名 第15回情報科学ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xavier Defago
2. 発表標題 Self-Stabilizing Gathering of Mobile Robots under Crash or Byzantine Faults
3. 学会等名 2nd Japan-Taiwan Joint Workshop, Taipei, Taiwan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shlomi Dolev, Sayaka Kamei, Yoshiaki Katayama, Fukuhito Ooshita and Koichi Wada
2. 発表標題 Brief Announcement: Neighborhood Mutual Remainder and its Self-Stabilizing Implementation of Look-Compute-Move Robots
3. 学会等名 33rd International Symposium on Distributed Computing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xavier Defago and Adam Heriban and Sebastien Tixeuil and Koichi Wada
2. 発表標題 Brief Announcement: Model Checking Rendezvous Algorithms for Robots with Lights in Euclidean Space
3. 学会等名 33rd International Symposium on Distributed Computing ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xavier Defago
2. 発表標題 Dependability and Fault-Tolerance of Cooperative Mobile Robots: The Gap Between Theory and Pragmatism
3. 学会等名 Pacific-Rim Intl. Symp. on Dependable Computing ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shlomi Dolev, Sayaka Kamei, Yoshiaki Katayama, Fukuhito Ooshita, Koichi Wada
2. 発表標題 Brief Announcement: Self-Stabilizing Implementation of LCM Robots
3. 学会等名 21st International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yotam Ashkenazi, Shlomi Dolev, Sayaka Kamei, Fukuhito Ooshita, Koichi Wada
2. 発表標題 Brief announcement: Forgive & Forget: Self-Stabilizing Swarms in Spite of Byzantine Robots
3. 学会等名 21st International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yotam Ashkenazi、Shlomi Dolev、Sayaka Kamei、Fukuhito Ooshita、Koichi Wada
2. 発表標題 Forgive & Forget: Self-Stabilizing Swarms in Spite of Byzantine Robots
3. 学会等名 11th International Workshop on Parallel and Distributed Algorithms and Applications, in conjunction with CANDAR 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fabian Frei, Koichi Wada
2. 発表標題 Efficient Circuit Simulation in MapReduce
3. 学会等名 30th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Paola Flocchini, Nicola Santoro, and Koichi Wada
2. 発表標題 On Memory, Communication, and Synchronous Schedulers When Moving and Computing
3. 学会等名 23rd International Conference on Principles of Distributed Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sayaka Kamei, Anissa Lamani, Fukuhito Ooshita, Sebastien Tixeuil and Koichi Wada
2. 発表標題 Gathering on Rings for Myopic Asynchronous Robots with Lights
3. 学会等名 23rd International Conference on Principles of Distributed Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichi Wada
2. 発表標題 Gathering and rendezvous for autonomous mobile robots
3. 学会等名 SSS Seminar in ETH, Zurich (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koichi Wada
2. 発表標題 Rendezvous on asynchronous mobile robots with lights -Relationship between power of lights and synchrony
3. 学会等名 2nd Workshop on Self-organization in Swarm of Robots in SSS 2018, Tokyo (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koichi Wada
2. 発表標題 Parallel Complexity for MapReduce computation
3. 学会等名 Lip6 Computer Science Seminar, Paris (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 DEFAGO Xavier
2. 発表標題 Decentralized Route Planning and Exploration in Multi-Robot Systems
3. 学会等名 3rd Taiwan-Japan workshop on secure and dependable IoT systems, Tokyo (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Wada
2. 発表標題 Computing by Luminous Robots
3. 学会等名 Research Meeting and School on Distributed Computing by Mobile Robots (MAC 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Okumura, K. Wada, Y. Katayama
2. 発表標題 Rendezvous of Autonomous Mobile Robots with Lights in Asynchronous Schedulers
3. 学会等名 The 20th Korean-Japan Joint Workshop on Algorithms and Computation (WAAC2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Wada
2. 発表標題 Rendezvous and Gathering for Asynchronous Mobile Robots with Lights--Relationship between power of lights and synchrony
3. 学会等名 MoRoVer: Mobile Robots and Verification (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	DEFAGO Xavier  (Defago Xavier)  (70333557)	東京工業大学・情報理工学院・教授    (12608)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

## 8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
カナダ	University of Ottawa	Carleton University		
フランス	Sorbonne University			
イスラエル	Ben-Gurion University of the Negev			