

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K19982

研究課題名(和文)うごきの分散計算理論

研究課題名(英文)Distributed Computing in Motion

研究代表者

来嶋 秀治(Kijima, Shuji)

九州大学・システム情報科学研究所・准教授

研究者番号：70452307

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：分散計算論は、小さな計算(局所計算)を統合して全体を計算するための理論である。計算において、環境の変化(うごき)は本来回避して制御すべき対象であるが、本課題では、逆に「うごき」を分散計算に積極的に取り込むための理論研究に取り組んだ。

自律分散ロボットやモジュールロボットの分散アルゴリズム設計で成果を得たほか、線分上の中点探索問題や動的グラフ上のランダムウォークの解析などの新しい研究領域を開拓する成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

爆発的な普及と発展を見せる人工知能、ドローンやKilobotsなどの群ロボット、IoTや安価センサーネットワークなど、大規模・自律分散計算の社会的需要は高まっている。また、分子計算、化学反応系、ゲーム理論など潜在的/長期的な応用も多い。現実の計算においては、環境、計算主体とも時々刻々と変化するが、このような変化する環境での計算理論は未成熟で、世界的にも関心の高い課題である。上述の社会的需要も踏まえ、本課題の取り組む基礎理論の展開は重要といえる。

研究成果の概要(英文)：The theory of distributed computing is concerned with the way of integrating small computations. Environmental changes may not be desirable for a stable computation, while this research investigated how to utilize "motions" in distributed computing.

In the research, we obtained some results on designing algorithms for autonomous mobile robots and module robots. We also have developed some new research topics about computability of robots with a limited visibility, and about random walks on dynamic graphs.

研究分野：理論計算機科学

キーワード：アルゴリズム理論 分散計算論 自律分散ロボット

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

分散計算論は、小さな計算(局所計算)を統合して全体を計算するための理論である。爆発的な普及と発展を見せる人工知能、ドローンや Kilobots (Harvard 大)などの群ロボット、IoT や安価センサーネットワークなど、(大規模、自律)分散計算の需要はますます高まっている。一方で、分散計算論には、対称性の解消に代表されるように、原理的な計算可能性/不可能性すら未解決な問題も多い。

たとえば道で人がすれ違う際、お互いが(鏡面对称に)同じ方向に避けようとして“お見合い”が起こる。このような状況を対象とするのが自律分散ロボットの対称性の解消の研究で、分散計算論の主要トピックとして、2次元空間上の理論が現在も盛んに研究される。研究代表者らは2015年に世界で初めて、3次元空間中の自律分散ロボットの対称性解消の可能性/不可能性の特徴づけに成功した[1]。この特徴づけは、3次元中の動作には2次元の場合とは比べ物にならない豊かな計算構造が存在することを示唆しており、分散計算論の新たな展開を導くまさに萌芽期にある研究成果であった。

2. 研究の目的

ここでの“ロボット”は、幾何情報を応用した(自律分散)計算の抽象化である。[1]の成果は「うごきを伴う幾何情報」が自律分散計算に与える影響は、2次元空間と3次元空間で異なることを示唆する。本課題ではこの部分を掘り下げ、「うごき」と付随して変化する「情報」が(分散)計算に与える影響の本質を解き明かすことが主目的である。すなわち、「うごき」と計算を関係づける原理を、理論計算機科学の視点から発見することが目標である。計算において、環境の変化(うごき)は本来回避して制御すべき対象であるが、「うごき」を分散計算に積極的に取り込む分散制御・計算の理論の展開を目的とする。

3. 研究の方法

本課題全体は、研究代表者個人による理論研究として遂行された。各課題は必要に応じて諸分野の専門家と協力して共同研究として成果を発表した。うごきの分散計算理論に関する課題として、大きく二つの系統で研究を推進した。一つはこれまでの成果の継続研究で、[2,3,4]がこれにあたる。もう一つはうごきと計算の原理の探求を目的とし、これに関する新たな切り口による研究を推進した。[5,6,7]がこれにあたる。各課題の詳細は4で述べる。

4. 研究成果

分散アルゴリズムの設計に関して、大きく二つの成果を得た(以下の(1),(2))。また、うごきと計算に関する研究領域を開拓する新しい課題を二つ手掛け、興味深い成果を得た(以下の(3),(4))。詳細を以下に述べる。

(1) 3次元空間中の無記憶自律分散ロボット[2]

3次元空間中の無記憶自律分散ロボットの平面形成問題について、[1]で保留となっていたキラリティに関する合意がない場合について研究を進め、特徴づけを得た。

(2) 2次元格子上のモジュールロボットの探索問題[3,4]

2次元格子上のモジュールロボットによる長方形領域の探索問題について、全領域探索可能なモジュール数の最小数を明らかにした。上下左右が認識可能な場合はモジュールが2個以下では不可能だが3個以上で探索可能であることを示した。一方、上下左右の認識が不可能な場合はモジュール4個以下では不可能だが、5個以上で探索可能であることを示した。速報版[3]は査読つき国際会議 SSS で報告し、ベストペーパーを受賞した。フルペーパー [4]は現在ジャーナル印刷中である。

(3) 1次元線分上の中点探索問題[5,6]

自律分散ロボットの理論研究の多くは、理想的な状況としてすべてのロボットはお互いに見える範囲にあるという仮定を置くことが多い。ロボットがそれほど広範囲に散らばることが想定されない状況においては現実的な仮定であり、かつ、この仮定により理論的には取り扱いやすくなる。一方で有視界ロボットの解析は理論的に取り扱いが難しく、計算可能性/不可能性のいずれも証明が難しいという課題があった。この原因を探るべく、非常に単純化した有視界ロボットの問題を考えたのがこの研究である。

いま線分上にロボットがある。便宜のため線分を $[-D, D]$ とする。ロボットは0に居るときだけ両端が見え、それ以外の場合、たとえば位置 $x \in [-D, D]$ が $x < 0$ のときは左の端点しか見えず、右の端点は視界の外のあるどこにあるかわからない。ロボットの初期位置は線分上任意で、ロボット自身はもちろんどこにいるかわからない。ロボット自身は D の値も知らないものとする。このとき、ロボットは観測と移動の繰り返しで中点を見つけることができるか、という問題を考える。この問題設定は、視界 D のロボットが特定の位置に到達できるかという問いに対応する。

この問題に対し, [5,6]の成果の一つとしてロボットが1ビットのメモリをもてば解けるとい
うことを示している。ただしこのアルゴリズムでは実数に関する選択関数を用いている。一方で,
ロボットがメモリを一切もたない場合にはこの問題は未解決である。[5,6]では D に制限を設け
ると解ける場合があることを示している。興味深いところでは, D がカントール実数でないとな
定すると, 選択関数を用いてこの問題を解くことができる。

この論文の成果の示唆するところとして, 選択関数のような非常に強い計算モデルを入れる
と問題が解けてしまう場合があり, すなわち有視界ロボットの計算不可能性の証明を非存在性
の方針で示すには, 計算モデルまで考慮しなければ証明不可能であることを意味する。一方です
べてを有理数に限定した場合の未解決問題も残っており, うごきと計算の新たな課題を発掘し
た成果である。

(4) 頂点の増えるグラフ上のランダムウォーク[7]

現実のネットワークは時々刻々と変化する。このことから動的グラフ上のアルゴリズム解析は
近年の分散計算論の挑戦的課題のひとつである。ランダムウォークは分散アルゴリズム設計の
基本技法としても重要な確率過程であり, 動的グラフ上のランダムウォークの解析はここ 10 年
で注目を集める課題である。一方で, 従来研究のほとんどがグラフの辺が変化する場合のみを扱
い, 頂点数が変化する場合については, その重要性は認識されつつも手つかずの状態であった。

[7]ではまず, 確率論の古典的な問題のひとつであるクーポン収集問題に着目し, 増えるクー
ポン収集という確率過程を考えた。クーポンの種類が増えるスピードを導入し未取得のクー
ポンがどのくらい存在するかを示した。クーポン収集は完全グラフ上のランダムウォークとみな
すことができ, この増えるクーポン収集の解析技法を頂点数が増えるグラフ上のランダムウォ
ークの解析へと拡張した。

引用文献

- [1] Y. Yamauchi, T. Uehara, S. Kijima and M. Yamashita, Plane formation by synchronous mobile robots in the three dimensional Euclidean space, J. ACM, 64:3, Article 16, 2017.
- [2] Y. Tomita, Y. Yamauchi, S. Kijima and M. Yamashita, Plane formation by synchronous mobile robots without chirality, LIPIcs, 95 (OPODIS 2017), 13:1--13:17, 2017.
- [3] K. Doi, Y. Yamauchi, S. Kijima and M. Yamashita, Exploration of finite 2D square grid by a metamorphic robotic system, LNCS, 11201 (SSS 2018), 96--110, 2018.
- [4] K. Doi, Y. Yamauchi, S. Kijima and M. Yamashita, Search by a metamorphic robotic system in a finite 2D square grid, Information and Computation, to appear.
- [5] A. Monde, Y. Yamauchi, S. Kijima and M. Yamashita, Self-stabilizing localization of the middle point of a line segment by an oblivious robot with limited visibility, LNCS 10616 (SSS 2017), 172--186, 2017.
- [6] A. Monde, Y. Yamauchi, S. Kijima and M. Yamashita, Can a skywalker localize the midpoint of a rope?, ACM Transactions on Computation Theory, accepted.
- [7] S. Kijima, N. Shimizu, T. Shiraga, How many vertices does a random walk miss in a network with moderately increasing the number of vertices?, Proc. SODA 2021, 106--122, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Doi Keisuke, Yamauchi Yukiko, Kijima Shuji, Yamashita Masafumi	4. 巻 11201
2. 論文標題 Exploration of Finite 2D Square Grid by a Metamorphic Robotic System	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 96--110
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-03232-6_7	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 Akihiro Monde, Yukiko Yamauchi, Shuji Kijima, Masafumi Yamashita	4. 巻 10616
2. 論文標題 Self-stabilizing Localization of the Middle Point of a Line Segment by an Oblivious Robot with Limited Visibility	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 172--186
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_12	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 Yusaku Tomita, Yukiko Yamauchi, Shuji Kijima, Masafumi Yamashita	4. 巻 8633
2. 論文標題 Plane formation by synchronous mobile robots without chirality	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 21st International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS 2017)	6. 最初と最後の頁 13:1--13:17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4230/LIPIcs.OPODIS.2017.13	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Akihiro Monde, Yukiko Yamauchi, Shuji Kijima, Masafumi Yamashita	4. 巻 採録決定
2. 論文標題 Can A Skywalker Localize The Midpoint of A Rope?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACM Transactions on Computation Theory	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3460954	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 Kijima Shuji, Shimizu Nobutaka, Shiraga Takeharu	4. 巻 -
2. 論文標題 How Many Vertices Does a Random Walk Miss in a Network with Moderately Increasing the Number of Vertices?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2021 ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA 2021)	6. 最初と最後の頁 106--122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1137/1.9781611976465.8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Doi Keisuke, Yamauchi Yukiko, Kijima Shuji, Yamashita Masafumi	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Search by a metamorphic robotic system in a finite 2D square Grid	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Information and Computation	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ic.2021.104695	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 -

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------