

エグチ リョウタ

氏 名 江口 僚太

学位の種類 博士（工学）

学位記番号 博第1248号

学位授与の日付 2022年3月31日

学位授与の条件 学位規則第4条第1項該当 課程博士

学位論文題目 A Study on Sub-linear Time Algorithms in Mobile Agent Systems
(モバイルエージェントシステムにおける劣線形時間アルゴリズム
についての研究)

論文審査委員 主査 教授 片山 喜章
教授 犬塚 信博
教授 和田山 正
教授 増澤 利光
(大阪大学)
准教授 泉 泰介
(大阪大学)

論文内容の要旨

分散計算システムとは、ある計算実体の集まりが互いに交流を行いながらある特定の目的を達成する計算系であり、多くの分散計算システムが提案されている。設定された目的を達成する手続きは分散アルゴリズムと呼ばれ、時間面・空間面において効率的なアルゴリズムの開発が広く行われている。数々の分散計算システム上の計算手続きにおいて、しばしば共通して問題となるのが、他の計算実体の情報の欠落である。ある計算実体を持つ情報が、設定された共通の目的に対して大きく影響するとき、他の計算実体はその情報について共有もしくは収集を行う必要がある。この問題を解決するために、計算実体間で情報を収集する手続き、もしくは移動が可能な計算実体においては、特定の場所に集合するような手続きが考えられている。多くの分散計算システムにおいて、この問題はすべての計算実体が他の計算実体と交流を行うなどの手続きをとることで解決可能ある。しかしながら、このような手続きはしばしば冗長であり、より高速な収集・集合問題を解くためのアルゴリズムの開発が望まれる。そのような高速化の指標を劣線形時間可解性と呼ぶ。劣線形時間解決可能な手続きは、情報の収集のためにある計算実体を持つ情報を他の計算実体との交流によって取得するなどの、真に分散化された手続きとして望ましい性質を持つ。本論文では、モバイルエージェントシステムと呼ばれる分散計算システムにおいて劣線形時間解決可能となるための十分条件や極小の条件を探求する。

モバイルエージェントとは、ロボットや web クローラ、センサーデバイスの集まりなど移動が可能な計算実体のことであり、モバイルエージェントが計算実態となっている分散計算システムをモバイルエージェントシステムと呼ぶ。このモバイルエージェントシステムは大まかに自律的モバイルシステムと受動的モバイルシステムの2つの種類に分けることができる。この分類の大きな違いは、その可動性の特徴の違いである。自律的モバイルシステムでは、エージェント(計算実体)は事前に設定されたプログラムに基づいて自律的に移動することが可能である。その一方で、受動的モバイルシステムにおいては、エージェントは、ある物体や動物、人などのその他の移動体に取り付けられているために自らの移動を制御することができない。この受動的モバイルシステムの例として、自然観察のためにセンサーを取り付けられた鳥の群れや、スマートフォンを持つ人の集まりなどがあり、それぞれの集まりが持つ属性の計算を行う。自律的・受動的モバイルシステムの特徴を持つ計算モデルが提唱されている。

受動的モバイルシステムにおいては、Angluin らによって提唱された個体群プロトコルが代表的である。個体群プロトコルにおいて、エージェントは ID を持たず匿名の状態であり、また同一の状態を持つ決定性状態遷移機械として表現される。エージェント間の通信は2者間による交流によって行われ、交流の際エージェントは相手の状態を入力として状態遷移を行う。ある交流は、計算実体に取り付けられたエージェントが通信可能な十分に近い範囲に近づいたときに起こる通信と対応する。よって、システムがエージェントの移動を制御することのできない受動的モバイルシステムの特徴から、交流はシステムの制御の範囲外となる。形式的には、交流エージェントの選択はスケジューラによって決定される。本論文では、次の交流が確率的に一律に選ばれる確率的スケジューラを採用する。この個体群プロトコルにおいて、本論文では、基地局と呼ばれる特別なエージェントが行う情報収集問題を考え、この問題に対して劣線形時間アルゴリズムを提案した。能動的モバイルシステムに対しては、あるグラフ上に存在するエージェント群が隣接頂点間を移動することで計算を行うモデルを考える。本論文では、このようなモデルをグラフィカルモバイルシステムと呼ぶ。このグラフィカルモバイルシステムにおいて、本論文では2エージェントによるランデブー問題を考える。ランデブー問題とは、集合問題の一種であり、初期状態としてある異なる頂点に配置された2エージェントがある同期時間内に同じ頂点に到達する問題である。このランデブー問題に対して、本論文では劣線形時間で下界となるために十分となるグラフの特徴、問題の設定を探索する。より具体的には、グラフの最小次数の制限、隣接頂点の ID へのアクセス、初期位置の距離の制限、及び乱択化の4つの条件が満たされるとき劣線形時間でランデブーが可能であり、またそれら4つの条件が一つでも満たされなるとき劣線形時間が不可能であることを示した。

論文審査結果の要旨

申請者は、一貫して「分散計算システム上において問題解決にかかる時間が劣線形時間であるアルゴリズム」について研究している。ここでいう分散計算システムとは、複数の計算実体の集まりが互いに情報交換を行いながら特定の目的を達成する計算系であり、多くの分散計算システムモデルが提案されている。分散計算システム上で与えられた目的を達成する、つまり与えられた問題を解くための手続きを分散アルゴリズムと言い、分散計算システムの理論研究分野において主要な研究テーマのひとつある。分散計算システムで問題を解くためには、各計算実体が局所的に有する情報のうち、問題解決に大きく影響する本質的な情報のみを可能な限り少ない手順で交換・共有することが必要である。つまり分散アルゴリズム研究におけるアルゴリズム評価指標は、問題解決まで必要な情報交換の量（空間）や時間である。申請者は、このうち時間に着目し、劣線形時間（計算実体の数やシステムサイズに比例する時間より真に小さい時間）で問題を解く分散アルゴリズムについて研究に取り組み、それが可能となるための十分条件や極小の条件を探求した。

申請者の成果は、分散計算システムモデルのひとつであるモバイルエージェントシステムモデルにおける劣線形時間アルゴリズムについて研究した結果得られたものである。モバイルエージェントシステムとはロボットやセンサデバイスなど計算実体が移動するモデルであり、それは大きく分けると、ロボットなど計算実体が自律的に移動可能な自律的モバイルシステムと、移動物体に付随したセンサなどをモデル化した受動的モバイルシステムの2つである。申請者は、自律的モバイルシステムにおいて、あるグラフ上に存在する計算主体が隣接頂点間を移動することで計算を行うモデルで2つの計算主体によるランデブー問題について、アルゴリズム実行時間が劣線形時間で下界となるために十分となるグラフの特徴、問題設定を明らかにした。具体的には、グラフの最小次数の制限、隣接頂点の識別子へのアクセス、初期位置の距離の制限、および乱択化の4つの条件がひとつでも満たされないと劣線形時間アルゴリズムが存在しないことを示した。一方、受動的モバイルシステムにおいては、個体群プロトコルと呼ばれる計算モデル上で基地局と呼ばれる特別な計算主体の存在を仮定してそれによる情報収集問題について探求し、結果としてこの問題を解く劣線形アルゴリズムを提案した。

申請者によるいずれの研究成果も分散計算システム上での問題解決手法である分散アルゴリズムにおける問題解決までに必要な時間が劣線形時間であるアルゴリズムに関するものであり、分散計算システムの理論研究分野で主要な研究テーマをターゲットとしたものである。つまり、多くの研究者がしのぎを削る中、新たな視点と独自手法を用いて得られたこれらの成果は価値のあるものだといえる。また申請者による成果は、論文誌や国際会議で発表され、口頭発表も十分な数をこなしている。これらの成果は、申請者に博士の学位を授与するに足るものと判断する。