

令和 3 年 5 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16K00016

研究課題名(和文) 組合せ位相幾何に基づく高レベル仕様からの並列・分散プログラムの生成

研究課題名(英文) Generating Distributed Programs from High Level Specification Based on Combinatorial Topology

研究代表者

西村 進 (Nishimura, Susumu)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10283681

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：並行分散システムが単体的複体(組合せ的に構成された高次元図形)から単体的複体への変換として与えられたとき、単体的複体の段階的変形によって実行可能なプログラムを導出するアルゴリズムを与えた。標準的な並行分散計算モデルに対応する即時スナップショットを、幾何的観点から複数回の並行計算の組合せに分解し、これに対してプログラム最適化を行う手法を提案した。さらに、標準的でない並行分散計算モデルの幾何的な性質や認識論理(分散システムの各プロセスが持つ知識を形式化した論理体系)を用いた分散計算不可能性の新たな証明を与えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

並行分散システムは現代ITインフラの重要な構成要素であるが、その設計と運用は実効順序の組み合わせに起因する非決定性と耐故障性への要求のため、非常に困難である。並行分散システムの性質を理解し、プログラムを正しく定義しこれを実行するための研究は、システムをより容易にかつ正しく設計・運用するための基礎となるものであり、より一層のIT社会の発展に資するものである。

研究成果の概要(英文)：We have developed an algorithm that derives an executable program from a given specification of a distributed system, which is defined by a mapping from a simplicial complex (i.e., a combinatorially-constructed geometric object of higher dimension) to another simplicial complex. Inspired by topological perspective, we have also redesigned the immediate snapshot, the core distributed protocol that characterizes the standard model of distributed computing, by multiple steps of simpler distributed computation. A program optimization method has been proposed for this topologically refined snapshot algorithm. Furthermore, we have studied the topological properties of distributed computing models other than the standard model and we have also worked out a novel proof for the impossibility of certain distributed tasks, making use of epistemic logic, i. e., a formal logic of knowledge held by the processes in a distributed system.

研究分野：計算機科学

キーワード：並行分散プログラム 位相幾何的手法 プログラム導出

1. 研究開始当初の背景

並行分散システムとは、複数の並行して動作するプロセスが互いにデータを交換しながら協調して計算を実行するシステムである。並行分散システムにおいては各並行プロセスの実行が非決定的に行われるため、膨大な実行順序の組合せをすべて考慮する必要がある。このようなシステムを正しくプログラミングするのは、単一プロセスからなる逐次システムと比べて格段に難しい。しかも分散システムでは耐故障性、すなわち一部のプロセスが突然故障して応答しなくなった場合にも対応することも要請される。並行実行順序制御の仕組みや故障発生モデルはシステムによって様々であり、このような異なる対象毎に合わせてプログラミングを行うのは一層困難である。

このように並行分散システムは複雑なものだが、近年になって並行分散システムの実行を組合せ幾何 (combinatorial topology) と対応させて論ずる幾何的手法 (topological method)[1] が登場したことにより、その性質の理解が大きく進んでいる。幾何的手法を用いることによって、並行分散システムの振舞いを組合せ幾何でモデル化し、システムの性質を組合せ幾何の問題と結びつけて見通しよく議論することができる。これによって多くの重要な知見が得られている。ただし、これらの成果の多くは並行分散計算の計算不可能性に関するものに限られていた。

2. 研究の目的

組合せ幾何モデルは、さまざまな並行実行順序の制御方式や故障発生モデルに対応して、さまざまな並行分散システムの振舞いを統一的に記述することが可能である。このことから、幾何的手法は計算不可能性ばかりでなく、並行分散システムによる計算を厳密に定義したり、定義された計算をどのようにして実現するかについて考察するためのしっかりとした理論的基礎を持つ道具としても利用可能であることが期待される。

本研究の目的は、並行分散システムの組合せ幾何モデルに関する研究で集積されてきた知見を適用することによって、並行分散プログラムの振舞いを単体的複体 (組合せ的に構成された高次元図形) から別の単体的複体への変換として幾何的に記述し、これから実行可能なプログラムを生成する手法を与えることであった。これによって、異なる並行分散システムにおける計算内容を統一的に定義し、それを実行するための一般的な枠組みを与えることができると考えた。

3. 研究の方法

(1) 単体的複体の変形によるプログラム導出

幾何的手法では、分散計算タスクは、入力を表す単体的複体から出力を表す単体的複体への関数として定義される。このふたつの単体を含みかつ両方の間をつなぐようなより大きな単体的複体を組合せ的に構成し、その中で入力の単体的複体から出力の単体的複体へと段階的に変形するアルゴリズムを設計する。これにより、分散計算タスクが定義するプログラムを導出する。

(2) 即時スナップショットプロトコルの幾何的解釈とプログラム最適化

標準的な並行分散計算モデル (wait-free な READ-WRITE 共有分散メモリモデル) は、幾何的には即時スナップショットプロトコルによる入力複体の細分 (並行計算部分に相当) と、細分された複体から出力複体への関数 (単体写像、並行計算結果を各プロセスが逐次的に処理する部分に相当) の組で表現できることが知られている。[2] この即時スナップショットのアルゴリズムを、幾何的観点から複数回の並行計算の組合せに分解し、これらと単体写像の合成に関するプログラム最適化を行う手法を提案する。

(3) 非標準的並行計算モデルの Euler 標数

標準的な並行分散計算の幾何的モデルについては、前述の即時スナップショットプロトコルによる細分としてよく研究され理解が進んでいる。一方、それ以外の非標準的なモデルについては、プログラム実行が単体的複体に「穴」を開ける操作に対応しており、しかもその穴が高次元であればあ

るほどそのシステムは高い計算能力を持つことが一般に知られているが、個々の非標準的なモデルの具体的な幾何構造については理解が十分とは言えず、これが非標準的なモデルに関して並行分散計算の仕様からプログラムを導出する際の足枷となっている。

具体的な非標準的なモデルにおける単体的複体について、その穴の大きさを測る尺度のひとつである Euler 標数を明らかにすることによって計算能力を同定することを試みる。

(4) 動的認識論理を用いたより一般的な故障モデルでの分散計算不可能性解析

上記のような非標準的なモデルの (穴の大きさのような) 抽象的な幾何的性質と、具体的な組合せ的単体的複体からのプログラム導出は、その抽象レベルの違いのためあまり相性がよろしくないということが研究の進展につれて判明してきた。

この問題に対するひとつの解決策として、最近提案された動的認識論理を用いた手法 [9] を用いて、より一般的な故障モデルでの分散計算不可能性の論証を試みる。認識論理を用いた方法は、これまでの幾何的手法よりもより細かく組合せ的単体的複体の連結性について言及することができ、この手法の研究を通して別ルートで当初の目的に近づくことができるのではないかと考えた。

4. 研究成果

(1) Carrier 複体とその変形によるプログラム導出アルゴリズム ([3])

並行分散タスクの定義から carrier 複体と呼ばれる単体的複体を組合せ的操作によって導出し、プロトコル実現性の問題がこの carrier 複体内での適切な部分複体変形可能性に帰着できることを示した。また、そのような変形をある程度現実的な計算時間内で解くためのアルゴリズムを開発した。このような変形が可能かどうかは一般的には決定不可能であるため、提案したアルゴリズムは健全ではあるが完全ではない。(変形可能と判定された場合は実際そうであるが、変形可能であってもそう判定されない可能性がある。) また、組合せ的には解の探索空間が非常に大きくなりがちで計算量爆発を起こしやすい。そのため、単体的複体をこれと等価な hypergraph で表し、これに既存の縮約アルゴリズムを適用することによって解の探索空間を大幅に縮退させる手法を開発した。これによってある程度小さなプロセス数 (4 くらいまで) の分散タスクに関しては現実的な計算時間で判定を行えることを確認した。

(2) Schlegel 図としての即時スナップショットと部分評価による最適化 ([4])

即時スナップショットを実現する当初のアルゴリズムは幾何的な構成 (単体的複体の細分) との対応が明確でなかったが、Kozlov[5] によって即時スナップショットによる細分は低次元部分からの段階的な Schlegel 図による細分の繰り返しで構成できることが指摘されていた。即時スナップショットのアルゴリズムを Schlegel 図による細分の繰り返しと対応するように再構成することができることを示した。

また、このように再構成された即時スナップショットのアルゴリズムに対して、部分評価の手法を適用することによって、分散プログラムの最適化を機械的な手続きで行うことが可能であることも示した。具体的には、分散プログラムの実行に含まれる無駄な共有メモリアクセスをプログラムの実行前に機械的に取り除けることを示した。

(3) Euler 標数による k -並列プロトコルの幾何構造の解析 ([6, 7], 大学院生との共同研究)

単体的複体に穴を開けることが可能な、非標準的な計算モデルのひとつである k -並列実行 (高々 k 個のプロセスまでが並行してプロトコルを実行可能) モデル [8] について、その組み合わせ幾何的構造とその幾何的特徴について研究を行った。具体的には、数え上げ組み合わせ論で用いられる母関数を用いて単体的複体に含まれる各次元の単体の個数を正確に数え上げることにより、 k -並列実行の単体的複体モデルが持つ Euler 標数の一般形を特定した。(Euler 標数によって、単体的複体の穴の開き方をある程度限定することができる。) この結果は、分散計算と組合せ論における母関数というふたつの分野の意外な関連を示唆している。

(4) ([10], 大学院生との共同研究)

近年 Goubault ら [9] によって新たに提案された動的認識論理の枠組みを用いた手法を用いて、並行分散計算システムにおける重要な問題のひとつである k 集合合意問題の計算不可能性を、標準的

な故障モデルである wait-free モデルだけでなくより一般の adversary モデルに関して示した。認識論理を用いた手法は Goubault らによって近年提案されたものの、その具体的な適用についてはあまり例が示されていなかった。本研究はその具体例を与えただけでなく、 k 集合合意問題の計算不可能性が、一般の高次元の場合や異なる故障モデルに対して統一的な数理論理的議論によって導かれることを示したという点で意義深いものである。

また、 k 集合合意問題の計算不可能性自体は幾何的手法による既知の結果ではあるが、その証明手法はまったく異なるものである。幾何的手法による証明では (Never 補題等の) 幾何学の洗練された結果を時には適用する必要があったが、認識論理を用いた手法では認識論理式の構造に関する帰納法に初等的な論証を組み合わせるだけで証明できる。

この結果は、まったく新しい視点からの並列分散システムの計算構造の理解を提供するものであり、将来のより一層の発展が大いに期待できる。

〈引用文献〉

- [1] Maurice Herlihy, Dmitry N. Kozlov, and Sergio Rajsbaum. *Distributed Computing Through Combinatorial Topology*. Morgan Kaufmann, 2013.
- [2] Maurice Herlihy and Nir Shavit, *The Topological Structure of Asynchronous Computability*. Journal of the ACM, vol. 4(6), pp. 858–923, 1999.
- [3] Susumu Nishimura. *Carrier Complex: A Poset Topology for Finding Distributed Protocols*. Dagstuhl Seminar 16282, Topological Methods in Distributed Computing, 2016.
- [4] Susumu Nishimura. *Schlegel diagram and optimizable immediate snapshot protocol*. In OPODIS 2017, pages 22:1–22:16, 2017.
- [5] Dmitry N. Kozlov. *Topology of the immediate snapshot complexes*. Topology and its Applications, vol. 178, pp. 160–184, 2014.
- [6] 西村 進. 単体数え上げによる分散計算の組合せトポロジー代数, 論理, 幾何と情報科学研究集会 (ALGI29), 2018.
- [7] 西村 進. 分散即時スナップショットの数え上げ組み合わせ論 第 14 回 情報科学ワークショップ, 2018.
- [8] Eli Gafni, Yuan He, Petr Kuznetsov, and Thibault Rieutord. *Read-Write Memory and k -Set Consensus as an Affine Task*. In OPODIS 2016, pages 6:1–6:17, 2016.
- [9] Éric Goubault, Jérémy Ledent, and Sergio Rajsbaum. *A simplicial complex model for dynamic epistemic logic to study distributed task computability*. In GandALF 2018, volume 277 of *EPTCS*, pages 73–87, 2018.
- [10] Koki Yagi and Susumu Nishimura. *Logical Obstruction to Set Agreement Tasks for Superset-Closed Adversaries*. 2020. Preprint available from <https://arxiv.org/abs/2011.13630>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Susumu Nishimura	4. 巻 95
2. 論文標題 Schlegel Diagram and Optimizable Immediate Snapshot Protocol	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 22:1--22:16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4230/LIPIcs.OPODIS.2017.22	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 西村進
2. 発表標題 動的認識論理を用いた分散計算タスクの不可解について
3. 学会等名 第37回 記号論理と情報科学 研究集会 (SLACS2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西村 進
2. 発表標題 単体数え上げによる分散計算の組合せトポロジー
3. 学会等名 代数, 論理, 幾何と情報科学研究集会 ALG129
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西村 進
2. 発表標題 分散即時スナップショットの数え上げ組み合わせ論
3. 学会等名 第14回 情報科学ワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西村進
2. 発表標題 Schlegel図と分散プロトコル最適化
3. 学会等名 代数, 論理, 幾何と情報科学研究集会 (ALGI 2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 西村進
2. 発表標題 単体的複体の連続変形による分散タスクの実現可能性判定アルゴリズム
3. 学会等名 第13回情報科学ワークショップ
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Susumu Nishimura
2. 発表標題 Schlegel Diagram and Optimizable Immediate Snapshot Protocol
3. 学会等名 21st International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Susumu Nishimura
2. 発表標題 Carrier Complex: A Poset Topology for Finding Distributed Protocols
3. 学会等名 Dagstuhl Seminar 16282 Topological Methods in Distributed Computing
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 西村進
2. 発表標題 分散プロトコル合成のための半順序位相
3. 学会等名 ALGI2016: 代数, 論理, 幾何と情報科学研究集会
4. 発表年 2016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
---------------------------	-----------------------	----

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