

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25年 6月 6日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21700012

研究課題名（和文） 交替性計算の潜在的な能力

研究課題名（英文） Potential on Alternating Computation

研究代表者

相田 慎 (AIDA SHIN)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：60345957

研究成果の概要（和文）： 交替性計算モデルの概念をより明確にするために、既存の計算モデルである決定性・非決定性・確率的計算モデルそれぞれを比較し、従来の計算量理論の手法や新しい技法を適用することで、各計算モデルで定義される計算量（すなわち、計算に必要な時間とメモリ領域）の各クラス間の未知なる関係性を明らかにすることである。さらに、計算量・アルゴリズム理論の応用的側面を考察した。そして、与えられたオブジェクト指向ソフトウェアが「ある種の複雑ネットワークを持つ」性質に着目し、ソフトウェア構造を再構成することで、ソフトウェアへの機能追加し易い構造（良構造）へ変形するアルゴリズムを構築した。

研究成果の概要（英文）： In order to clarify the concept of alternating calculation model, we compare the model with each existing deterministic, nondeterministic and probabilistic calculation model and show compare nontrivial relations among complexity classes based on their models(i.e. time and space required to calculate). Furthermore, we consider the application aspects of computational algorithms theory. We focus in object-oriented software regarded as “a certain complex network structure”. Then, by reconfiguring the structure, build an algorithm to transform a given software structure to “a good structure” easily to add new functions to the structure.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

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：計算量理論、アルゴリズム、ソフトウェア科学、ソフトウェア工学、オブジェクト指向、グラフ・ネットワーク理論

1. 研究開始当初の背景

「ゲーム理論」は、古くより様々な分野で幅広く研究されている理論であるが、いくつかの研究アプローチがある。特に、将棋や囲

碁などのゲームの盤面を計算理論的に抽象・一般化し、ゲームの進行を「ある種の計算機」と見なした計算モデルが交替性計算(alternating computation)である。このモ

デルは、計算量理論においては比較的古典的なものであるが、計算構造が他のモデルと比較すると極めて複雑であり、その本質的な計算能力について未解決問題が多い。本研究の課題は、この交替性計算モデルの概念をより明確にするために、既存の計算モデルである決定性・非決定性・確率的計算モデルそれぞれを比較し、従来の計算量理論の手法や新しい技法を適用することで、各計算モデルで定義される計算量（すなわち、計算に必要な時間とメモリ領域）の各クラス間の未知なる関係性を明らかにすることである。

計算量理論で広く研究されている計算モデル「チューリングマシン(Turing machine, TM)」に交替性の概念を初めて導入した「交替性チューリングマシン(Alternating Turing Machine, ATM)」に関する論文[Chandra-Stockmeyer] (“Alternation.” Proceedings of 17th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, pp.98-108, 1976.)は、計算量理論における最も重要な論文のひとつである。

交替性以外のその他の計算モデル(例えば P や NP など)は盛んに研究されている。一方で、交替性計算量クラスについては、[Chandra-Stockmeyer] が発表されてから 30 年以上経過しているにもかかわらず、既存の計算量クラスとの関係性はほとんど解明されていない。とりわけ、NP のような非決定性計算量クラスとの関係は、未だに下記の自明な包含関係しか知られていないのが現状である： $AL = P \subseteq NP \subseteq PSPACE = AP$ 。

2. 研究の目的

非決定性計算に「交替性」を導入したとき、初期状態から派生し生成される計算過程は、計算木として表現され、その全節点（計算状況）に「全称状態」あるいは「存在状態」のいずれかが付加される。計算木の全称状態節点では「計算済みの子節点の AND を取ったもの」を、「存在状態節点では計算済みの子節点の OR を取ったもの」とし、計算木のある種の論理回路とみなし、ボトムアップに計算され、初期状態まで辿ることでようやく計算結果(true or false) がわかる。これは、二人組合せゲーム理論におけるゲーム木による先手・後手必勝計算と本質的に等価である。

交替性計算は一般の非決定性計算と比較すると、非常に複雑な計算構造である。しかし、言い換えれば、交替性計算は「交替性」という強力な概念を導入したことによって、既存の計算モデルの計算リソースを新しい方法で大幅に減少しうる可能性も秘めている。この可能性への追及が、本研究目的である。

3. 研究の方法

交替性計算モデルの概念をより明確にするために、既存の計算モデルである決定性・非決定性・確率的計算モデルそれぞれを比較し、従来の計算量理論の手法や新しい技法を適用することで、各計算モデルで定義される計算量（すなわち、計算に必要な時間とメモリ領域）の各クラス間の未知なる関係性を明らかにすることである。

また、計算量・アルゴリズム的側面から、具体的な問題として、ソフトウェア科学へのアルゴリズム応用を行う。

4. 研究成果

(1) 交替性計算が決定性計算を別の側面で特徴付けるだけでなく、本質的に計算手法が異なるという示唆に基づき、「非決定性計算量・乱択計算量の交替性計算による非自明な特徴付け」に関する研究を行った。

具体的には、近年の交替性計算に関する論文をサーベイし、交替性計算の可能性を研究した。「決定性-交替性間の神託分離可能性」に関する先行研究を調査した結果、[Orponen] (“Complexity Classes of Alternating Machines with Oracles.” ICALP 1983, pp.573-584, 1983)において、以下の神託分離定理を見つけられた： $AP(A) \neq PSPACE$, $APSPACE(B) \neq EXP(B)$ を満たすような神託 A, B が存在する（注： $AP = PSPACE$, $APSPACE = EXP$ ）。この定理の証明は、対角線論法による古典的手法によるものであるが、以下の重要な考えを示唆している：交替性計算を用いると、決定性時間・領域を対数的に「計算量の時空」を圧縮する代わりに並列計算の幅を指数的に広げるトレードオフが存在するが、それは交替性計算が決定性計算を別の側面で特徴付けるだけでなく、本質的に計算手法が異なることを、神託 A, B が暗示している。

この示唆に基づいて、未解決問題である「非決定性計算量・乱択計算量の交替性計算による非自明な特徴付け」に関する適切な予想策定とその証明、ならびに（P に属さないであろうと信じられている）具体的な NP 問題を交替性計算に基づくアルゴリズムの構築を検討する。並びに、双対的という意味において交替性計算と類似性がある計算量クラス $NP \cap co-NP$ の帰納的可算性に着目した研究を行った。

交替制計算は、前述のとおり、二人組合せゲームに基づく対話証明系と見做せる。P と NP の中間に位置する種類の問題（ $NP \cap co-NP$ に属する問題やグラフ同型性判定問題など）を、既存の決定性・非決定性計算とは異なる交替制対話証明系アルゴリズムを設計できる可能性が有る。ここでこの対話証明系は、

与えられた問題のインスタンスサイズに対して、時間・領域が十分小さいものとする。この知見は、NP と AP(= PSPACE) は異なる事が予想されているにも関わらず、それぞれの完全問題を解く決定性アルゴリズムは、共に指数時間オーダーのものしか知られていないことに拠る。時間・領域が十分小さければ、その計算木のサイズは抑えられ、計算木の評価も準指数関数以下に抑えられる。

(2) 計算量・アルゴリズム理論の応用的側面を考察した。与えられたオブジェクト指向ソフトウェアが「ある種の複雑ネットワークを持つ」性質に着眼したアルゴリズムを構成した。

具体的には、オブジェクト指向ソフトウェアのクラス群を再構成しついでそれらを階層化することにより、[Martin] (Martin Fowler, “Refactoring: Improving the Design of Existing Code.” Addison-Wesley, 1999.) が提唱した「設計原理」に基づくソフトウェア構造をアルゴリズム理論の側面から実現する手法である。

この手法は 2 段階からなる。第 1 段階では、ソフトウェアをクラス要素(属性、メソッド)をノード、それらのアクセス関係をエッジとするグラフで表現する。さらに、そのグラフにグラフクラスタリングを適用しクラス要素を高凝集・低結合なまとまり(クラ

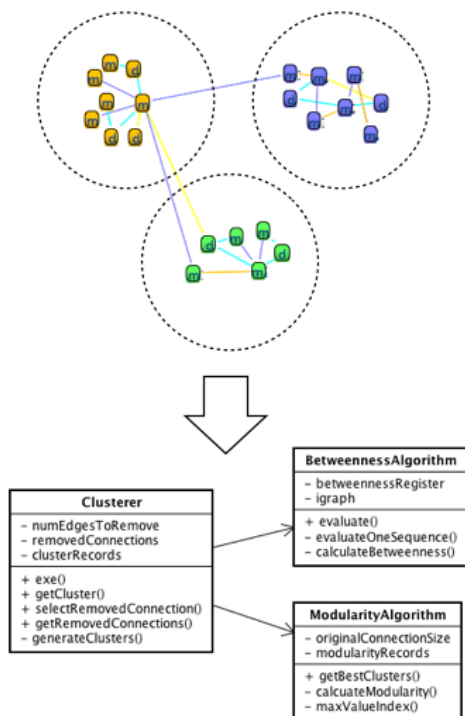


図 1 ソフトウェアを複雑ネットワークと見做した再構成アルゴリズムの実行例

ス)に再構成する。第 2 段階では、再構成されたクラス群を上位層と下位層に分け、上位層から直接利用されるクラスに対し、インターフェースと実装の分離を適用し、階層構造を導入する。提案手法の妥当性を検証する為に、中規模の Java ソースコードに本手法を適用し、手法適用前、適用後のソフトウェアメトリクス(ソフトウェアの拡張性・保守性・再利用性の指標)を測定した。結果として、改善効果を確認した(図 1)。

本研究をソフトウェア科学一般に発展させると、従来の定性的な「ソフトウェア開発における原則」を、定量的な「グラフ・ネットワーク理論の一問題」として扱える。さらに、従来のソフトウェアメトリクスを目的関数とする最適化問題として定式化し、計算量・アルゴリズム理論の従来手法を適用し、理論的にもソフトウェアを最良の構造を構成出来る可能性が高い。

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)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 市川友介、相田 慎、「設計原則に基づくソフトウェア再構成・階層化支援手法」、第 24 回回路とシステムワークショップ、査読有、pp. 465-470, 2011 年 8 月 2 日、淡路夢舞台国際会議場。
- ② 市川 友介、相田 慎、磯田 定宏、「設計原理に基づくソフトウェア階層化支援手法」、電子情報通信学会 情報・システムサイエティソフトウェアサイエンス研究会、査読無、pp. 133-138, 2011 年 3 月 7 日、沖縄県青年会館。

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

アウトリーチ活動等

- ① 相田 慎、「交替性計算の潜在的な能力」、
組合せゲーム・パズル ミニプロジェクト
第5回ミニ研究集、2010年3月10日、
東京工業大学。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

相田 慎 (AIDA SHIN)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助
教

研究者番号：60345957

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：