

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25240002

研究課題名(和文)データの巨大化から生じる不完全情報への対処に主眼をおいた近似計算

研究課題名(英文)Approximate Computing to Cope with Imperfect Information from Growing Data Size

研究代表者

岩間 一雄 (IWAMA, KAZUO)

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：50131272

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,400,000円

研究成果の概要(和文)：不完全情報をいかに扱うかが現代アルゴリズムの大きな課題になっている。本研究では「データの巨大化から生じる不完全情報に対処するための近似計算における、できるだけ一般性の高いアルゴリズム設計理論の体系化」を目的として研究を行った。結果として、グラフ問題、アルゴリズム的ゲーム理論、乱化に関する基礎理論の様々な問題において、情報の不完全性を克服できるアルゴリズムの設計と解析に成功した。

研究成果の概要(英文)：One of the main challenge in modern algorithm design is to cope with insufficient information.

In this study, we try to construct a general framework for design of approximation algorithms that can cope with insufficient information due to rapidly growing data size.

As a result, we give design and analysis of such algorithms for various problems in several fields such as graph problems, algorithmic game theory and randomized computation theory.

研究分野：計算機科学

キーワード：アルゴリズム 計算困難問題 情報の補填 数理モデル化 理論的性能保証

1. 研究開始当初の背景

不完全情報をいかに扱うかが現代アルゴリズムの大きな課題になっている。例えば、商品や為替の相場の様々に時々刻々と変化する系に対するアルゴリズムを設計する場合、将来の入力の変動が予測出来ないという条件のもとで現在の行動を決定するアルゴリズムを設計する必要がある、更にその行動の良さをなんらかの形で定量的に評価し、保証する必要がある。不完全情報のある種の近似によって克服するようなアルゴリズムの設計は90年代以降のアルゴリズム研究において常に主流の一角を占めてきた。

このような不完全情報は、時間的な情報の不完全性つまり将来の情報は原理的に得られないことからくる不完全性だと言える。しかし情報の不完全性は勿論これだけでは無い。例えば、世の中の人間活動はある種のゲームとして説明されることが多いが、この場合も敵対者の情報を得ることは易しくない。更には、より積極的理由として、誘因両立性 (incentive compatibility) を実現するためには、一部の情報を見ないで計算する必要がある。例えば、オークションのビッド独立性 (入札者への提示額を計算するとき、その入札者の入札額を見ない) などが、これに当たる。こうした不完全性は空間的な情報の不完全性と呼ぶべきであろう。

我々は一貫してこのテーマに取り組んできた。16年度から4年続いた特定領域研究「新世代の計算限界 - その解明と打破 -」(領域代表者: 岩間一雄) においても、このテーマは、ベストな解が得られないという状況下での解の品質をいかに評価するかという観点から主要な研究課題の一つであった。また19年度から4年計画で遂行した基盤研究(A)「情報補填を可能にするアルゴリズムの設計と解析」(研究代表者: 岩間一雄) では時間的不完全性を、またその後(期限の前年度で採択)22年度から3年の基盤研究(A)「空間的な情報補填を可能にするアルゴリズムの研究」(研究代表者: 岩間一雄) では空間的不完全性の克服をテーマにした。研究者の集中効果で成果を倍増させるというスローガンの元、FOCS, STOC, SODA, ICALP, ESA と言ったいわゆる頂上会議にはほぼ毎年複数の論文を発表し、また、本年1月にこの分野の頂上会議である ACM/SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA2012) を京都に招致 (初めての北米以外での開催) するなど (更に ICALP2015 の京都招致も決定)、わが国の理論計算機科学の牽引役としての役割を果たしてきた。

このように、不完全情報の克服を目的とした研究は順調に進んできたが、最近になってより本質的な情報の不完全性が問題になってきた。それは、情報自体は完全な形で存在しそれを取り込むことも原理的には可能であるが、その量が多すぎるという極めて単純

な理由でそれが不可能になり、よって情報の不完全性が生じるという現象である。特に、全体から見れば極少量のデータしか使わずに意味のある近似計算が実行可能であるという結果がいくつか発表され、瞬く間にアルゴリズム研究の主流の一角を占めるに至った。

2. 研究の目的

本研究の目的はこのようなデータの巨大化から生じる情報の不完全性を克服するための基盤技術の開発である。そのような技術の一つの例としてグラフの性質検査が挙げられる。例えばインターネットの広範な部分に広がるグラフデータは原理的には完全なデータとして存在するものの、それを欠損なく取得するのは極めて困難である。しかし、一部の情報を選択したりあるいは逆にできるだけ偏らないように取ってくることは可能であり、ネットワークが全体の構造で決まるある性質をもつかどうかを、非常に少ない一部の情報のみで推定することが可能になる場合が存在することが分かっている。しかし、現状ではグラフの枝数に関して、非常に密であるか非常に疎であるかのいずれかの場合しか満足の得られる結果が得られていない。この弱点を除去するためには、モデルの再構築や新たな乱択技術といった基本的な部分での新機軸が必要とされることが分かっており、世界的競争的となっている。

我々のグループが世界の拠点として君臨している安定マッチングに関しても近年この情報不完全性が大きな問題になっている。これは不完全性というよりも不正確性と言った方がより適当かもしれない。例えば、多くの実用例を擁する研修医の病院への配置に関して、研修医や病院が意図的にその希望リストを改竄する可能性が指摘されている。その様な改竄によって、他人を不利にするような状況を作ったり、逆に自分も含め有利になるような状況を作ることでも可能であることが分かっている。更には一回のマッチング作業では満足のいく結果が得られず、希望を出し直してやり直すと言った場面もでてくる。これはまさにオンラインアルゴリズムの考え方であり、我々の今までの時間的な情報の不完全性の研究が大いに生かせる。

他にもいくつかのテーマがある。例えば量子計算の不確実性も乱択に付随するものとみなすことができ、我々の経験が生かせる。オークションに代表される経済活動では、前述のような空間的な情報の不完全性が重要になってくるが、特にアルゴリズムの評価技術に関していまだに多くの論争がある。こうした幅広い一見異なったテーマに関して、情報の不完全性への対処という観点からの普遍的なアイデアで迫るのが本研究の基本的立場である。

3. 研究の方法

(1) グラフの性質検査アルゴリズムに対する枝サンプリングの重要性, (2) 安定マッチングとそれに関連するアルゴリズム的ゲーム理論における様々なタイプの不完全情報処理, を2大テーマとする. いずれも決定性の計算では良い結果を得ることが原理的に不可能であることが分かっており, 乱数の助けが必要である. 従って, (3) 基礎理論からのサポートとしては, アルゴリズムにおける乱化の威力の研究が最重要の課題である. 専用オフィスを用意し, ポスドク・訪問研究者も含めた研究センターによって研究者の集中効果を狙う.

4. 研究成果

以下では, 本研究における成果のうち, 主な結果のみを選択して述べる.

(1) 配属人数下限付き研修医配属問題

研修医配属問題においては, 通常各病院は定員の上限を宣言する. 本研究では, 地方における研修医不足を解消するための一手段として, 定員数の下限をも宣言するモデルを提案し, 定員条件を満たす安定マッチングが存在するか否かを問う問題が多項式時間で解けることを示した. また安定マッチングが存在しない場合に, 出来るだけ安定なマッチングを求めるという最適化問題を2つ(ブロッキングペア数最小化問題とブロッキングペアに関わる研修医数最小化問題)提案し, これらの近似可能性や近似困難性を示した.

(2) 研修医配属問題に対する安定性の証拠発見

研修医配属問題において研修医の希望リストおよびマッチング M が与えられた際に, M を安定とする病院の希望リストが存在するか否かを問う判定問題を取り扱った. この問題は, 研修医が不安定マッチングを提示され騙される危険性をどこまで排除できるかという動機に基づく. 病院の希望リストが任意の場合は必ず解が存在する. そこで, 病院の希望リストが k 種類しか存在しないという制約を加えた. $k=1$ の場合には多項式時間で解けること, および $k=2$ の場合には NP 完全となることを示した. また $k=2$ の場合に対する数種類の貪欲アルゴリズムを提案・実装し, 計算時間や誤り率の観点から計算機実験を行った.

(3) タイに制限のある安定結婚問題に対する厳密な近似限界

安定マッチングで希望リストに同順位と

不完全リストを許すと, 異なるサイズの安定マッチングが存在し, 最大サイズの安定マッチングを求める問題は NP 困難である. この問題は女性の希望リストのみにしか同順位がなく, 同順位の位置が希望リストの末尾であるという制限の下でも NP 困難であり, $P \neq NP$ の仮定の下では 1.25 よりも良い近似ができないことが知られている. 本研究では下限に一致する 1.25-近似アルゴリズムを開発した.

(4) 片方のみがタイを持つ安定結婚問題に対する 25/17-近似アルゴリズム

安定マッチングで希望リストに同順位と不完全リストを許すと, 異なるサイズの安定マッチングが存在し, 最大サイズの安定マッチングを求める問題は NP 困難である. この問題は女性の希望リストのみにしか同順位を許さなくても NP 困難であることが知られているが, そのような制限の下でも近似度は一般の場合と同じ 1.5 しか知られていなかった. 本研究では 1.5 を切る 25/17(1.471)の近似度を持つアルゴリズムを提案した.

(5) 希望リスト変更による男性最良安定マッチングの改善

安定マッチングを求める Gale-Shapley アルゴリズムは, 男性側にとって極端に有利となる「男性最適安定マッチング」を求める. これを利用し, 例えば研修医配属においては, 立場の弱い研修医側に有利な配属を求める方式が通常採られている. しかし, 入力によってはこの性質を生かせず, 研修医最適安定マッチングであっても研修医側にかなり悪い結果となってしまうことがあり得る. このような場合でも出来るだけ研修医に有利な結果をもたらすように1人の研修医の希望リストを調整する問題を考えた. その結果, 最大の利益をもたらす調整方法を求めるのが $O(n^3)$ 時間で, また, 少しでも利益を得られる調整方法があるか否かを判定する問題が $O(n^2)$ 時間で解けることを示した. ここで n は研修医の数である.

(6) 線形サイズ和積標準形論理式の最大充足問題に対する指数時間アルゴリズム

本研究では, 節の数が変数の数の高々定数倍である和積標準形論理式の最大充足問題に対する指数時間多項式領域の厳密アルゴリズムを与えた. このアルゴリズムは自明な計算時間である 2^n 乗より指数的に高速に動作する. また, 既存の最速アルゴリズムが指数領域を必要としたのに対し, 我々のアルゴリズムは多項式領域しか使用しない. さらに, 既存のアルゴリズムが扱うことができなかったいくつかの特性を持つ.

(i) 実数の重みが付いた例題を扱うことが可能,
(ii) ハード制約と呼ばれる必ず満たすべき制約を扱うことが可能,
(iii) 最適解の個数およびある閾値以上を達成する解の個数を数え上げることが可能.
アルゴリズムの設計には、「幅削減」「貪欲制約」と呼ばれる技法を用いており、その解析は回路計算量の研究に触発されたものである.

(7) 無向グラフに対する評判ゲーム

J. Hopcroft, D. Sheldon らは、ゲーム理論的なアプローチによって、自分の PageRank を上げることに興味があるウェブページの著者らによる利己的な行動を研究するために、PageRank ゲームを提案した。PageRank ゲームは多人数ゲームの一つであり、そこではプレイヤーは有向グラフの頂点として自分の PageRank を最大化するように自分の辺を配置するのである。彼らは各プレイヤーの最適反応戦略を与え、そしてに不変なナッシュ均衡の性質を導き出した。我々は、無向ウェブグラフ上での PageRank ゲームの 3 つのモデルを導入し研究を行った。特に、プレイヤーが自由に自分の双方向の辺を削除することが許されている、というモデルにおいて、与えられたグラフがナッシュ均衡かどうかを決定するという問題を考えた。結果として、グラフが木の場合に対する多項式時間アルゴリズム、グラフのすべての二重連結成分における頂点の最大次数をパラメータとした場合の固定パラメータアルゴリズムを得た。

(8) 3次元パッキング問題に対する調和アルゴリズム

3次元パッキング問題では3次元の長方形のアイテムの集合と3次元の箱が与えられる。目的はすべてのアイテムを箱に詰め込んだ時にできる限り高さを小さくすることである。我々はアイテムは斜めに入れてはいけない、というこの問題の最も基本的な設定を扱う。本研究ではCapraraの2次元ピンパッキング問題に対する研究を元に、3次元パッキング問題に対する1.69103近似アルゴリズムを得た。

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)

[雑誌論文](計57件)

Koki Hamada, Kazuo Iwama, Shuichi Miyazaki. The Hospitals/Residents Problem with Lower Quotas. *Algorithmica*, 74(1):440-465, 2016. 査読有.
DOI: 10.1007/s00453-014-9951-z

Jing Chen, Xin Han, Kazuo Iwama, Hing-Fung Ting. Online bin packing with (1, 1) and (2, R) bins. *J. Comb. Optim.*, 30(2):276-298, 2015. 査読有.
DOI: 10.1007/s10878-014-9749-6

Minseon Lee, Shuichi Miyazaki, Kazuo Iwama. Finding Witnesses for Stability in the Hospitals/Residents Problem. *JIP* 23(2):202-209, 2015. 査読有.
DOI: 10.2197/ipsjjip.23.202

Kazuo Iwama, Shuichi Miyazaki, Hiroki Yanagisawa. A 25/17-Approximation Algorithm for the Stable Marriage Problem with One-Sided Ties. *Algorithmica*, 68(3):758-775, 2014. 査読有.
DOI:
<http://dx.doi.org/10.1007/s00453-012-9699-2>

David Avis, Kazuo Iwama, Daichi Paku. Reputation games for undirected graphs. *Discrete Applied Mathematics* 166:1-13, 2014. 査読有.
DOI: 10.1016/j.dam.2013.09.022

Takao Inoshita, Robert W. Irving, Kazuo Iwama, Shuichi Miyazaki, Takashi Nagase. Improving Man-Optimal Stable Matchings by Minimum Change of Preference Lists. *Algorithms*, 6(2):371-382, 2013. 査読有.
DOI: 10.3390/a6020371

Kazuo Iwama, Harumichi Nishimura. Recovering Strings in Oracles: Quantum and Classic. *Int. J. Found. Comput. Sci.*, 24(7):979-994, 2013. 査読有.
DOI: 10.1142/S0129054113400261

Nikhil Bansal, Xin Han, Kazuo Iwama, Maxim Sviridenko, Guochuan Zhang. A Harmonic Algorithm for the 3D Strip Packing Problem. *SIAM J. Comput.*, 42(2):579-592, 2013. 査読有.
DOI: 10.1137/070691607

Takayuki Sakai, Kazuhisa Seto, Suguru Tamaki. Solving Sparse Instances of Max SAT via Width Reduction and Greedy Restriction. *Theory Comput. Syst.*, 57(2):426-443, 2015. 査読有.
DOI: 10.1007/s00224-014-9600-6

Kenya Ueno. Breaking the Rectangle Bound Barrier against Formula Size Lower Bounds. *Int. J. Found. Comput. Sci.*, 24(8):1339, 2013.
DOI: 10.1142/S0129054113500378

Yuichi Yoshida, Hiro Ito. Testing Outerplanarity of Bounded Degree Graphs. *Algorithmica*, 73(1):1-20, 2015. 査読有. DOI: 10.1007/s00453-014-9897-1

〔学会発表〕(計 52 件)

Chien-Chung Huang, Kazuo Iwama, Shuichi Miyazaki, Hiroki Yanagisawa. A Tight Approximation Bound for the Stable Marriage Problem with Restricted Ties. APPROX-RANDOM 2015, August 24-26, Princeton, NJ, USA.

Kazuo Iwama, Yuichi Yoshida. Parameterized testability. ITCS 2014, January 12-14, Princeton, NJ, USA.

Kazuo Iwama, Atsuki Nagao. Read-Once Branching Programs for Tree Evaluation Problems. STACS 2014, March 5-8, Lyon, France.

Jing Chen, He Guo, Xin Han, Kazuo Iwama. The Train Delivery Problem Revisited. ISAAC 2013, December 16-18, Hong Kong, China.

Jun Kawahara, Koji M. Kobayashi, Shuichi Miyazaki. Better Bounds for Online k-Frame Throughput Maximization in Network Switches. ISAAC 2013, December 16-18, Hong Kong, China.

Katsuhisa Yamanaka, Takashi Horiyama, David G. Kirkpatrick, Yota Otachi, Toshiki Saitoh, Ryuhei Uehara, Yushi Uno. Swapping Colored Tokens on Graphs. WADS 2015, August 5-7, Victoria, BC, Canada.

Yuichi Yoshida. A characterization of locally testable affine-invariant properties via decomposition theorems. STOC 2014, May 31 - June 03, New York, NY, USA.

Ken-ichi Kawarabayashi, Yuichi Yoshida. Testing subdivision-freeness: property testing meets structural graph theory. STOC 2013, June 1-4, Palo Alto, CA, USA.

〔図書〕(計 5 件)

Magnus M. Halldorsson, Kazuo Iwama, Naoki Kobayashi, Bettina Speckmann. Proceedings of the 42nd International Colloquium on Automata, Languages, and Programming (ICALP 2015), Part I. Springer, 2015.

Magnus M. Halldorsson, Kazuo Iwama,

Naoki Kobayashi, Bettina Speckmann. Proceedings of the 42nd International Colloquium on Automata, Languages, and Programming (ICALP 2015), Part II. Springer, 2015.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.lab2.kuis.kyoto-u.ac.jp/~iwama/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩間 一雄 (IWAMA, Kazuo)
京都大学・情報学研究科・教授
研究者番号: 50131272

(2) 研究分担者

エイビス デイビッド (AVIS, David)
京都大学・情報学研究科・教授
研究者番号: 90584110

宮崎 修一 (MIYAZAKI, Shuichi)
京都大学・学術情報メディアセンター・准教授
研究者番号: 00303884

玉置 卓 (TAMAKI, Suguru)
京都大学・情報学研究科・助教
研究者番号: 40432413

(3) 連携研究者

伊藤 大雄 (ITO, Hiro)
電気通信大学・情報理工学研究科・教授
研究者番号: 50283487

堀山 貴史 (HORIYAMA, Takashi)
埼玉大学・理工学研究科・准教授
研究者番号: 60314530

吉田 悠一 (YOSHIDA, Yuichi)
国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・准教授
研究者番号: 50636967

岡本 和也 (OKAMOTO, Kazuya)
京都大学・医学部附属病院・講師
研究者番号: 60565018

脊戸 和寿 (SETO, Kazuhisa)
成蹊大学・理工学部情報科学科・講師
研究者番号: 20584056

川原 純 (KAWAHARA JUN)
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教
研究者番号: 20572473