

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K11812

研究課題名(和文)ビッグデータ解析における列挙問題の困難性の追求と超高速列挙アルゴリズムの応用展開

研究課題名(英文)Computational complexity on enumeration problems on big data analysis and applications of high-speed enumeration algorithms

研究代表者

山中 克久(Yamanaka, Katsuhisa)

岩手大学・理工学部・教授

研究者番号：60508836

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、主に3つの研究成果を得た。1つ目の研究成果は、辺連結度が高い全域部分グラフを高速に列挙するアルゴリズムを与えたことである。2つ目は、包囲多角形という新たな単純多角形を定義し、それに対する高速な列挙アルゴリズムを提案したことである。3つ目は、置換Pに対する最適あみだくじに対して、ブレイドリレーションを遷移ルールとした場合の遷移グラフに関しての考察を行い、最短遷移長の特徴づけと最短遷移列を線形時間で計算するアルゴリズムを提案したことである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究において得られた主な研究成果について説明する。辺連結度が高い全域部分グラフを列挙する問題は避難路計画への応用に着目した問題設定である。この列挙問題は、古典的な列挙問題である全域木列挙問題の拡張になっており、学術的にも意味のある成果である。次に、2次元平面上の点集合に対して、包囲多角形という単純多角形を提案し、それに対する高速な列挙アルゴリズムを設計した。計算幾何分野における新しい多角形クラスを提案したという意義がある。最後に、置換Pに対する最適あみだくじと、あみだくじ間のブレイドリレーションによって定義される遷移グラフ上で、最短遷移という観点から考察を与える貢献を果たした。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have the following 3 contributions. The first contribution is to propose an efficient algorithm that enumerates all the highly-edge-connected spanning subgraphs of an input graph. The second contribution is to define a surrounding polygon, which is a new class of simple polygons, and to propose an efficient algorithm that enumerates all the surrounding polygons of an input point set. The third contribution is to present an characterization of the length of a shortest reconfiguration sequence between two optimal ladder lotteries of a permutation and a linear-time algorithm for finding a shortest reconfiguration sequence.

研究分野：アルゴリズム理論

キーワード：列挙 アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

ビッグデータから有用な情報を得るための最も基本的な方法は、指定した条件を満たすものを全て列挙することである。近年、ビッグデータ解析は必須の技術となり、その技術を支えるために高速列挙アルゴリズムが数多く提案されてきた。しかしながら、いくら列挙アルゴリズム設計技法が洗練されても高速なアルゴリズムが提案されていない列挙問題が数多く存在するのも事実である。そのような列挙問題に対して、高速なアルゴリズムを生成することはできるのだろうか？

2. 研究の目的

本研究の目的は主に2つある。目的の1つは、難しいとされている列挙問題に対して高速な列挙アルゴリズムは存在するのか？という問いに関する知見を探究することである。ここで得られた知見を、高速列挙アルゴリズムの設計にフィードバックすることで、高速な列挙アルゴリズムの設計を加速させ、応用分野への展開を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、主に逆探索法という列挙アルゴリズム設計技法に着目する。列挙問題に対して逆探索法を適用することで高速な列挙アルゴリズムが設計できるかどうかに関する知見を創出し、それをもとに高速な列挙アルゴリズムを設計する。

逆探索法による列挙では、列挙対象を頂点とし、互いに関係がある列挙対象同士を辺で繋いで得られるグラフ上で全域木(グラフ上の全ての頂点を含む木)を定義し、その全域木を探索することで列挙を行う。

ある列挙問題に対して逆探索法の適用可能性に関する知見を得るために「解の遷移性」という逆探索法に似た考え方に注目する。ある問題に対して解の遷移性とは、その問題の解が2つ与えられたとき、片方の解からもう片方の解への変形の列が存在するかどうかを問うものであり、変形の列の中に出現するものも問題の解になっているという制約がある。これを逆探索法による列挙に当てはめると、問題の解が列挙対象、解から解への変形が、列挙対象同士の関係となる。任意の2つの列挙対象の間に変形の列が存在するならば、逆探索法で用いる「列挙対象を全て含む木構造」を定義できるため、効果的に逆探索法を適用できるという強い証拠になる。一方、変形の列が存在しないならば、(その遷移規則に基づく限り)逆探索法によるアルゴリズム設計は困難であるという知見になる。

4. 研究成果

本研究で得られた主な研究成果は以下の3つである。

(1) 辺連結度が高い全域部分グラフの列挙

避難路計画への応用に着目した列挙問題として全域部分グラフの列挙問題に取り組んだ。本研究では、とくにグラフの辺連結度に着目して k -辺連結全域部分グラフの列挙問題を扱い、列挙アルゴリズムを設計することに成功した。ここで、どの $k-1$ 本の辺を取り除いても非連結にならないグラフを k -辺連結グラフと呼ぶ。我々が扱った列挙問題は、 $k=1$ とすると、グラフの全域木の列挙問題に相当する。グラフの全域木列挙問題は、列挙アルゴリズムの分野では古典的でいくつもの先行研究があり、学術的に重要な問題設定である。我々は、辺連結度に着目し、全域木の列挙問題を拡張した列挙問題を提案し、高速な列挙アルゴリズムを提案することに成功したと解釈できる。避難路計画を応用としていることから、グラフを平面グラフに限定して考えることにより、一般のグラフよりも高速な列挙アルゴリズムを構築することにも成功している。平面グラフは、道路結合網ネットワークなどのモデルとして利用される実应用的に重要なグラフクラスの1つである。

(2) 包囲多角形の列挙

単純多角形に関する列挙問題に取り組んだ。平面上に点集合が与えられたとする。すべての点が輪郭上、または、内部に含まれるような多角形を包囲多角形と定義し、包囲多角形を列挙する問題を扱った。この包囲多角形は、点集合に対する全域閉路を拡張した概念になっている。図1に包囲多角形と全域閉路の例を示す。全域閉路を多項式時間遅延で列挙するアルゴリズムは知られていないが(ただし、指数時間の前処理を許す場合は、多項式時間遅延で列挙できることが知

られている), 包囲多角形に対しては非常にシンプルな多項式時間遅延列挙アルゴリズムが存在することを示した. 具体的には, 本研究では, 包囲多角形を, 1つ当たり $O(n^2 \log n)$ 時間で列挙するアルゴリズムを提案した. ここで, n は点集合に含まれる点の個数である. 扱う単純多角形に対する制約を, 全域閉路から包囲多角形へ弱めることで, 逆探索法による列挙が適用しやすくなるという事例を与えたという意味で, 計算幾何分野において新たな知見を与えた研究成果であると考えられる.

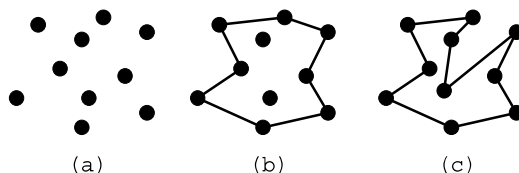


図 1: (a) 点集合 S , (b) S の包囲多角形, (c) S の全域閉路

(3) 最適あみだくじの最短遷移

代数学分野において, あみだくじは興味深い研究対象の 1つである. 置換 P のあみだくじは, 隣接互換による P の分解として定義される. 本研究では, 隣接互換の個数が最小であるようなあみだくじを最適あみだくじと定義し, 最適あみだくじに対する遷移問題を扱った. 図 2 に, 置換 $(5, 1, 4, 6, 2, 3)$ に対する最適あみだくじの例を示す.

置換 P が与えられたとき, P の最適あみだくじを高速に列挙するアルゴリズムが知られている. この列挙アルゴリズムは逆探索法に基づくアルゴリズムであり, 最適あみだくじ同士のブレイドリレーションという関係に基づいて設計されている. 列挙アルゴリズムの設計方法より「任意の 2つの最適あみだくじは, ブレイドリレーションにより遷移可能である.」という命題が成り立つ.

一方, 任意の 2つの最適あみだくじの最短遷移長はまだ知られていない. 本研究では, 任意の 2つの最適あみだくじが与えられたとき, 両者の最短遷移長を特徴づけるとともに, 最短遷移列を計算する線形時間アルゴリズムを設計した. また, 最も長い最短遷移長が $n(n-1)(n-2)/6$ であることを証明した. 本研究により, 置換 P の最適あみだくじとブレイドリレーションにより定義される遷移グラフに対して, 「最短遷移の特徴づけと遷移列の高速計算が可能」という知見が得られた.

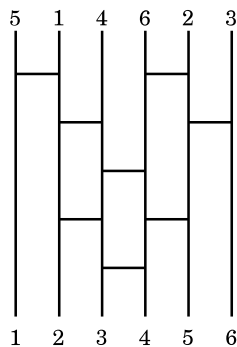


図 2: 置換 $(5, 1, 4, 6, 2, 3)$ に対する最適あみだくじ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yamanaka Katsuhisa, Avis David, Horiyama Takashi, Okamoto Yoshio, Uehara Ryuhei, Yamauchi Tanami	4. 巻 303
2. 論文標題 Algorithmic enumeration of surrounding polygons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Discrete Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 305 ~ 313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.dam.2020.03.034	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 ITO Taishu, SANO Yusuke, YAMANAKA Katsuhisa, HIRAYAMA Takashi	4. 巻 E105.D
2. 論文標題 A Polynomial Delay Algorithm for Enumerating 2-Edge-Connected Induced Subgraphs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 466 ~ 473
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2021FCP0005	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 Katsuhisa Yamanaka, Takashi Horiyama, Kunihiro Wasa	4. 巻 859
2. 論文標題 Optimal reconfiguration of optimal ladder lotteries	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 57 ~ 69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2021.01.009	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 Katsuhisa Yamanaka, Yasuko Matsui, and Shin-ichi Nakano	4. 巻 E102-A
2. 論文標題 Enumerating highly-edge-connected spanning subgraphs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 1002-1006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.E102.A.1002	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Katsuhisa Yamanaka
2. 発表標題 A polynomial delay algorithm for enumerating 2-edge-connected induced subgraphs
3. 学会等名 The 14th International Frontiers of Algorithmics Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Katsuhisa Yamanaka
2. 発表標題 Sorting by five prefix reversals
3. 学会等名 情報処理学会アルゴリズム研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Katsuhisa Yamanaka
2. 発表標題 Enumeration of Surrounding Polygons
3. 学会等名 3rd International Workshop on Enumeration Problems & Applications (国際学会)
4. 発表年 2019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
---------	---------