

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26330007

研究課題名(和文) ナノ回路設計のための超大規模グラフに関する研究

研究課題名(英文) Study of Huge Graphs for the Design of Nano-Circuits

研究代表者

上野 修一 (UENO, SHUICHI)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：30151814

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：直交半直線交差グラフ(平面上の水平あるいは垂直な半直線の集合を点集合とし、直交する二つの半直線に対応する点对を辺で結んで得られるグラフ)の理論を更に発展させました。このグラフはナノ回路の耐故障設計に応用されますが、超大規模グラフになるため効率的なデータ構造と高速なアルゴリズムが必要になります。まず、OBDD(Ordered Binary Decision Diagram)が超大規模直交半直線交差グラフの効率的なデータ構造であることを明らかにしました。また、ナノ回路の耐故障設計において重要な役割を演じる「グラフの双辞書式順序問題」を凸グラフに対して解く高速な並列アルゴリズムを提案しています。

研究成果の概要(英文)：We further developed the theory of orthogonal ray graphs. An orthogonal ray graph is an intersection graph of a set of horizontal or vertical rays (half-lines). Since the size of orthogonal ray graphs for the defect-tolerant design of nano-circuits is huge, we need efficient data structures and algorithms for the graphs. We showed that the OBDD (ordered Binary Decision Diagram) is an efficient data structure for the orthogonal ray graph. We proposed an efficient parallel algorithm to solve the dual lexical ordering problem for convex graphs. The problem plays an important role in the defect-tolerant design of nano-circuits.

研究分野：情報学

キーワード：アルゴリズム グラフ ナノ回路

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 集合の族を点集合とし、2つの集合の共通部分が非空であるときに対応する2点を辺で結んで得られるグラフを交差グラフと呼びます。直交半直線交差グラフは平面上の水平あるいは垂直な半直線の集合の交差グラフです。直交半直線交差グラフの認識問題の計算複雑度は未解決ですが、その特別な場合である2方向直交半直線交差グラフは多項式時間で認識できることが知られています。実は2方向直交半直線交差グラフの様々な特徴付けが知られています。特に2方向直交半直線交差木はただ1つの禁止部分木により特徴付けられることから、線形時間で認識できることが知られています。雑誌論文としては未発表ですが、直交半直線交差木の特徴付け及びこれを用いた直交半直線交差木を認識するための線形時間アルゴリズムに関する予備的な研究が行われています。

(2) 現在の CMOS 技術に基づく大規模集積回路は近い将来に物理的な限界を迎えと言われており、それに代わる画期的な技術としてカーボンナノチューブなどのナノ技術に基づいた大規模ナノ回路が注目を集めています。特に、単純で規則的な構造のナノクロスバー技術は有望な実現可能候補と考えられており、この技術に基づいた PLA (Programmable Logic Arrays) によりナノ回路を実現する研究が活発に行われています。しかしながら、ナノ PLA は製造時の欠陥の比率が大きいことが知られており、欠陥を前提とした論理合成手法が必要になります。このナノ PLA の耐欠陥設計問題は「直交半直線交差グラフの部分グラフ同型問題」あるいはその部分問題である「直交半直線交差グラフの均衡完全2部部分グラフ問題」として定式化できることが知られています。前者は NP 困難ですが、「直交半直線交差木の部分木同型問題」を解く高速アルゴリズムが知られています。後者は多項式時間で解けることが知られています。特に、直交半直線交差グラフの特別な場合である2部置換グラフに対しては線形時間で解けます。

(3) 直交半直線交差グラフは「最小帰還点集合問題」、「バンド幅問題」、「カット幅問題」、「支配点集合問題」、「誘導マッチング問題」、「強辺彩色問題」などの様々な工学の問題にも応用されています。特に、「直交半直線交差グラフの均衡完全2部部分グラフ問題」の自然な一般化である「最密2部部分グラフ問題」は、直交半直線交差グラフを特別な場合として含む2部弦グラフに対しては NP 困難であることが知られています。

## 2. 研究の目的

本研究では、直交半直線交差グラフの理論を発展させて、ナノ PLA の耐欠陥設計に関する基本的な問題である「直交半直線交差グラフの部分グラフ同型問題」と「直交半直線交差グラフの均衡完全2部部分グラフ問題」に

対する実際的な高速アルゴリズムの設計へ応用することを目的とします。さらには、培った理論と技術を他の様々な工学の問題に応用して発展させ、直交半直線交差グラフとそのアルゴリズムの理論を構築したいと考えています。

## 3. 研究の方法

まず、直交半直線交差グラフに関する既存の理論を更に発展させて、直交半直線交差グラフの理論を構築します。次に、この理論に基づいて「直交半直線交差グラフの部分グラフ同型問題」と「直交半直線交差グラフの均衡完全2部部分グラフ問題」に対する実際的な高速アルゴリズムを設計します。さらに、直交半直線交差グラフの他の様々な工学の問題への応用についても考察します。

## 4. 研究成果

(1) 直交半直線交差グラフの理論の構築に関しては、懸案の「直交半直線交差グラフの特徴付け(必要十分条件)」に関して進展がありました。直交半直線交差木の特徴付け及び直交半直線交差木を認識するための線形時間アルゴリズムに関する研究成果を雑誌論文(4)に発表しています。また、未発表ですが、3方向直交半直線交差グラフの興味深い十分条件をいくつか発見しています。

(2) ナノ回路設計への応用に関しては、まず「直交半直線交差グラフの部分グラフ同型問題」に対して進展がありました。この問題が直交半直線交差グラフの特別な場合である2部置換木と2部置換グラフの対に対してさえも NP 困難であることを示しました(学会発表(6))。この結果はこの問題が非常に難しい問題であることを示唆しています。

一方、「直交半直線交差グラフの均衡完全2部部分グラフ問題」にも進展がありました。この問題は多項式時間アルゴリズムで解けませんが、ナノ回路を表現する直交半直線交差グラフの規模が膨大であるため、実際的であるとは言えません。本研究ではこの問題を解く並列アルゴリズムの設計について考察し、この問題を解く並列アルゴリズムの設計は「直交半直線交差グラフの双辞書式順序問題」を解く並列アルゴリズムの設計に帰着することを明らかにしました。また、直交半直線交差グラフの特別な場合である凸グラフに対してではありますが、双辞書式順序を計算する NC アルゴリズム(多項式個のプロセッサを用いて対数多項式時間で終了する高速な並列アルゴリズム)を提案しています(学会発表(2))。

ところで、ナノ回路設計に応用する場合、直交半直線交差グラフの規模が膨大になるので、直交半直線交差グラフに対するデータ構造の工夫も不可欠です。本研究では、OBDD(Ordered Binary Decision Diagram)が大規模な直交半直線交差グラフの効率的な表現方法であることを雑誌論文(8)で明らか

にしています。

なお、直交半直線交差グラフとそのナノ回路設計への応用に関して雑誌論文(10)で解説しました。

(3) その他の様々な工学の問題への応用に関しては以下のような成果があります。

「直交半直線交差グラフの均衡完全2部分グラフ問題」の自然な一般化である「最密2部分グラフ問題」を直交半直線交差グラフの特別な場合である2部置換グラフに対して解く効率的な近似アルゴリズムを提案しています(学会発表(9))。

2方向直交半直線交差グラフの最大マッチングを求める線形時間の画期的なアルゴリズムを提案しています(学会発表(1))。

直交半直線交差グラフに対して、支配点集合問題、誘導マッチング問題及び強辺彩色問題を解く多項式時間アルゴリズムを雑誌論文(6)と(9)で発表しています。

グラフの動的回避ゲームにおいて、一人の追跡者に必勝戦略が存在するための必要十分条件はグラフが2方向直交半直線交差木であることを明らかにしました。これは2方向直交半直線交差木の新しい特徴付けになります。また、必要な追跡者の数とグラフのパス幅の関係も解明しています。これらの研究成果は雑誌論文(2)で発表しています。

グラフの族Fに対して頻出極大部分グラフを列挙する問題は、Fがパス幅5の二つの木から成る場合でもNP困難であるが、Fが2方向直交半直線交差木から成る場合には多項式時間で解けることを明らかにしました(学会発表(19))。

他にも多くの発見がありました。特に、グラフの最小非可逆2転換集合問題に関する懸案を雑誌論文(7)で解決しています。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計10件)

- (1) Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; Stable Matchings in trees; Lecture Notes in Computer Science, Vol. 10392, pp. 492-503, 2017; 査読有.  
DOI: 10.1007/978-3-319-62389-4\_41
- (2) Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; On Evasion Games on Graphs; Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9943, pp. 253-264, 2016; 査読有.  
DOI: 10.1007/978-3-319-48532-4\_23
- (3) Satoshi Tayu, Toshihiko Takahashi, Eita Kobayashi, Shuichi Ueno; On the Three-Dimensional Channel Routing; IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E99-A, pp. 1813-1821, 2016; 査読有.  
DOI: 10.1587/transfun.E99.A.1813
- (4) Irina Mustata, Kousuke Nishikawa, Asahi Takaoka, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; On Orthogonal Ray Trees; Discrete Applied Mathematics, Vol. 201,

pp. 201-212, 2016; 査読有.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dam.2015.07.034>

- (5) Asahi Takaoka, Shingo Okuma, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; A Note on Harmonious Coloring of Caterpillars; IEICE Trans. Inf. & Syst., Vol. E98-D, pp. 2199-2206, 2015; 査読有.  
DOI: 10.1587/transinf.2015EDP7113
- (6) Asahi Takaoka, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; Dominating Sets in Two-Directional Orthogonal Ray Graphs; IEICE Trans. Inf. & Syst., Vol. E98-D, pp. 1592-1595, 2015; 査読有.  
DOI: 10.1587/transinf.2015EDL8068
- (7) Asahi Takaoka, Shuichi Ueno; A Note on Irreversible 2-Conversion Sets in Subcubic Graphs; IEICE Trans. Inf. & Syst., Vol. E98-D, pp. 1589-1591, 2015; 査読有.  
DOI: 10.1587/transinf.2015EDL8021
- (8) Asahi Takaoka, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; OBDD Representation of Intersection Graphs; IEICE Trans. Inf. & Syst., Vol. E98-D, pp. 824-834, 2015; 査読有.  
DOI: 10.1587/transinf.2014EDP7281
- (9) Asahi Takaoka, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; Dominating Sets and Induced Matchings in Orthogonal Ray Graphs; IEICE Trans. Inf. & Syst., Vol. E97-D, pp. 3101-3109, 2014; 査読有.  
DOI: 10.1587/transinf.2014EDP7184
- (10) 上野修一; 直交半直線交差グラフとナノ回路; 電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ機関誌, 第8巻, 30-36頁, 2014; 査読無.  
DOI: <https://doi.org/10.1587/essfr.8.30>

[学会発表](計29件)

- (1) Ryu Sugimoto, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; A Matching Algorithm for 2-Directional Orthogonal Ray Graphs; 電子情報通信学会総合大会, 2018年.
- (2) Tsukasa Kobayashi, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; A Note on the Parallel Complexity of Doubly Lexical Orderings; 電子情報通信学会総合大会, 2018年.
- (3) Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; On the Recognition of Unit Grid Intersection Graphs; 電子情報通信学会回路とシステム研究会, 2017年.
- (4) Hiroki Katsumata, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; On the Complexity of Finding a Largest Common Subtree of Trees; The 20<sup>th</sup> Japan Conference on Discrete and Computational Geometry, Graphs, and Games, 2017年.
- (5) Hiroki Katsumata, Satoshi Tayu,

- Shuichi Ueno; A Note on the Largest Common Subgraph Problem; 電子情報通信学会総合大会, 2017年.
- (6) Kotaro Mure, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; A Note on the Subgraph Isomorphism Problem; 電子情報通信学会総合大会, 2017年.
- (7) Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; A Note on the Spanning Subgraph Isomorphism Problem; 電子情報通信学会回路とシステム研究会, 2016年.
- (8) Hiroki Katsumata, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; On the Complexity of Finding a Largest Subtree of Trees; 電子情報通信学会回路とシステム研究会, 2016年.
- (9) Yuta Inaba, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; A  $3/2$ -Approximation Algorithm for the Bipartite Dense Subgraph Problem on Bipartite Permutation Graphs; 電子情報通信学会回路とシステム研究会, 2016年.
- (10) Tsukasa Kobayashi, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; A Note on the Parallel Complexity of Doubly Lexical Orderings; 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2016年.
- (11) Ryu Sugimoto, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; A Parallel Matching Algorithm for Chain Graphs; 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2016年.
- (12) Yuta Inaba, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; A  $3/2$ -Approximation Algorithm for the Bipartite Dense Subgraph Problem on Bipartite Permutation Graphs; 電子情報通信学会総合大会, 2016年.
- (13) Hiroyuki Gunji, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; On the Three-Dimensional Routing; 電子情報通信学会総合大会, 2016年.
- (14) Kenji Ichikawa, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; A Note on the Spanning Subgraph Isomorphism Problem; 電子情報通信学会総合大会, 2016年.
- (15) Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; On Evasion Games on Graphs; 電子情報通信学会回路とシステム研究会, 2015年.
- (16) Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; On Evasion Games on Graphs; The 18<sup>th</sup> Japan Conference on Discrete and Computational Geometry and Graphs, 2015年.
- (17) Yuta Inaba, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; A Note on the Bipartite Dense Subgraph Problem; 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2015年.
- (18) Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; On Evasion Games on Graphs; 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2015年.
- (19) Satoshi Tayu, Shuni Go, Shuichi Ueno; On the Complexity of Mining Maximal Frequent Subgraphs; 電子情報通信学会回路とシステム研究会, 2015年.
- (20) Haruki Itou, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; On Evasion Games on Graphs; 電子情報通信学会総合大会, 2015年.
- (21) Asahi Takaoka, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; A Note on Irreversible 2-Conversion Sets in Subcubic Graphs; 電子情報通信学会総合大会, 2015年.
- (22) Shuni Go, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; A Note on the Complexity of Mining Maximal Frequent Subgraphs; 電子情報通信学会総合大会, 2015年.
- (23) Asahi Takaoka, Shuichi Ueno; A Note on Irreversible 2-Conversion Sets in Subcubic Graphs; 電子情報通信学会コンピュータセッション研究会, 2015年.
- (24) Asahi Takaoka, Shingo Okuma, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; Harmonious Coloring of Caterpillars; 電子情報通信学会回路とシステム研究会, 2014年.
- (25) Satoshi Tayu, Asahi Takaoka, Dai Ito, Shuichi Ueno; On the Bipartite Dense Subgraph Problem; 電子情報通信学会回路とシステム研究会, 2014年.
- (26) S. Tayu, S. Ueno; A Note on the Energy-Aware Mapping for NoCs; IEEEAsia Pacific Conference on Circuits and Systems, 2014年.
- (27) Asahi Takaoka, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; Weighted Dominating Sets and Induced Matchings in Orthogonal Ray Graphs; International Conference on Control, Decision and Information Technologies, 2014年.
- (28) Asahi Takaoka, Shingo Okuma, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; Harmonious Coloring of Caterpillars; 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2014年.
- (29) Asahi Takaoka, Satoshi Tayu, Shuichi Ueno; Weighted Dominating Sets and Induced Matchings in Orthogonal Ray Graphs; 電子情報通信学会回路とシステム研究会, 2014年.

〔その他〕

東京工業大学工学院上野研究室ホームページ

<http://www.eda.ce.titech.ac.jp/ueno/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上野 修一 (UENO, Shuichi)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号: 30151814