

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23500009

研究課題名(和文) ナノ回路設計のための実際的な高速アルゴリズムに関する研究

研究課題名(英文) Study of Practical Efficient Algorithms for Design of Nano-Circuits

研究代表者

上野 修一 (UENO, SHUICHI)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：30151814

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000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する交差グラフ)の理論を発展させました。この理論に基づいて、次世代集積回路の革新的な技術として注目を集めているナノ回路の耐故障設計において重要な役割を果たす「直交半直線交差グラフの部分グラフ同型問題」とその特別な場合である「直交半直線交差グラフの均衡完全2部部分グラフ問題」に関するアルゴリズムを発展させました。すなわち、直交半直線交差木に対して前者を解く従来よりも高速なアルゴリズムを提案すると共に、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後者を解く従来よりも高速なアルゴリズムを提案しています。

研究成果の概要(英文)： We 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). Based on the theory of orthogonal ray graphs, we proposed an efficient algorithm to solve the subgraph isomorphism problem for orthogonal ray trees. We also proposed an efficient algorithm to solve the balanced complete bipartite subgraph problem for bipartite permutation graphs, which are a subclass of orthogonal ray graphs. The problems play important role in the defect-tolerant design of nano-circuits.

研究分野：総合領域

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。平面上の水平あるいは垂直な直線分の集合の交差グラフを格子交差グラフと呼びます。特にすべての直線分の長さが等しいとき、単位格子交差グラフと呼びます。格子交差グラフに関しては四半世紀ほど前から活発に研究されています。格子交差グラフの認識問題はNP完全であることが知られていますが、単位格子交差グラフの認識問題の計算複雑度は未解決でした。

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を直交半直線交差グラフと呼びます。直交半直線交差グラフは特別な単位格子交差グラフであることが知られています。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。

(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ると言われており、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ために知られており、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。また前者はNP困難ですが、後者は多項式時間で解けることも知られています。

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の離散構造を明らかにし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、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、まず懸案の「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。我々は2方向直交半直線交差木のいくつかの特徴付けをすでに得ていますが、これを発展させて直交半直線交差木のいくつかの特徴付けを明らかにしました。更にこれらの特徴付けを用いて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を提案しました。また、2方向直交半直線交差グラフは以下のグラフと同値であることを明らかにしました：1) 区間包含2部グラフ；2) 限定耐性グラフの補グラフ；3) 平行四辺形交差グラフの補グラフ。

「直交半直線交差グラフの認識問題」の計算複雑度も懸案ですが、これに関しても進展がありました。直交半直線交差グラフを特別な場合として含む単位格子交差グラフの認識問題がNP完全であることを明らかにしました。また、単位格子交差グラフが直交半直線交差グラフであるための興味深い必要十分条件を導いています。残念ながら、単位格子交差グラフの認識問題がNP完全であるため、この特徴付けから直交半直線交差グラフの認識問題の計算複雑度が明らかになる訳ではありません。

(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」に対しても進展がありました。この問題はNP困難であることをすでに明らかにしていますが、部分木同型問題は多項式時間で解けることが知られています。我々は、この問題が2方向直交半直線交差木に対しては更に高速に解けることを明らかにしました。また、(1)で述べた直交半直線交差木の特徴付けを用いて、直交半直線交差木の部分木同型問題を解く従来よりも高速なアルゴリズムも提案しています。

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。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最大均衡完全2部部分グラフ問題が線形時間で解けることを明らかにしました。

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、データ構造の工夫が不可欠です。本研究では、直交半直線交差グラフのOBDD表現の規模を評価して有望なデータ構造であることを明

らかにしております。

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するこれまでの研究成果に関してインドで開催された離散数学に関する国際会議と電子情報通信学会回路とシステム研究会で招待講演を行いました。

(3) 様々な工学の問題への応用に関しては、「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「最密部分グラフ問題」と「最密2部部分グラフ問題」が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共にNP困難であることを示しました。

最小帰還点集合問題は2部グラフに対してもNP困難ですが、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は多項式時間で解けることが知られています。本研究では、凸グラフの特別な場合である2部置換グラフに対して帰還点集合問題を解く線形時間アルゴリズムを提案しました。

バンド幅問題は、2部弦グラフに対してはNP困難ですが、2部置換グラフに対しては多項式時間で解けることが知られています。本研究では、バンド幅問題が凸グラフに対してさえもNP困難であることを明らかにしました。また、凸グラフのバンド幅問題に対して定数近似比の線形時間近似アルゴリズムを提案しています。

以上の研究成果は雑誌論文(1)と(2)で発表しております。

様々な工学の問題への応用に関しては他にも以下のような発見がありました。まず、2方向直交半直線交差グラフに対して、最小重みの支配点集合を解く多項式時間アルゴリズムを示しました。また、3方向直交半直線交差グラフに対して、誘導マッチング問題と強辺彩色問題を解く多項式時間アルゴリズムも示しています。さらに、直交半直線交差木のカット幅問題に対する線形時間近似アルゴリズムを提案しています。

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2件)

- (1) A. Takaoka, S. Tayu, S. Ueno; On Minimum Feedback Vertex Sets in Bipartite Graphs and Degree-Constrained Graphs; IEICE Trans. on Information and Systems, Vol.E96-D, pp.2327-2332, 2013; 査読有。DOI: 10.1587/transinf.E96.D.2327
- (2) A.M.S. Shrestha, S. Tayu, S. Ueno; Bandwidth of Convex Bipartite Graphs and Related Graphs; Information Processing Letters, Vol.112, pp.411-417, 2012; 査読有。DOI: 10.1016/j.ipl.2012.02.012

[学会発表](計33件)

- (1) S. Tayu, D. Ito, S. Ueno; On the Bipartite Dense Subgraph Problem; 電子情報通信学会ソサイエティ大会; 2014年9月25日, 徳島大学, 徳島県徳島市。
- (2) A. Takaoka, S. Tayu, S. Ueno; OBDD Representation of Intersection Graphs, The 17th Japan-Korea Joint Workshop on Algorithms and Computation; 2014年7月14日; 沖縄コンベンションセンター, 沖縄県宜野湾市。
- (3) S. Tayu, T. Hongo, S. Ueno; A Note on the 3-D IC TSV Assignment Problem; 電子情報通信学会回路とシステム研究会; 2014年7月9日, 北海道大学, 北海道札幌市。
- (4) A. Takaoka, S. Tayu, S. Ueno; On Orthogonal Ray Trees; Japan Conference on Graph Theory and Combinatorics; 2014年5月19日, 日本大学, 東京都世田谷区。
- (5) A. Takaoka, S. Tayu, S. Ueno; Weighted Dominating Set Problem for Two-Directional Orthogonal Ray Graphs; 電子情報通信学会総合大会; 2014年3月19日; 新潟大学, 新潟県新潟市。
- (6) G. Zhao, Y. Aizawa, A.M.S. Shrestha, S. Tayu, S. Ueno; On the OBDD Representation of de Bruijn Graphs; 電子情報通信学会総合大会; 2014年3月19日; 新潟大学, 新潟県新潟市。
- (7) A. Takaoka, S. Tayu, S. Ueno; A Note on Two-Directional Orthogonal Ray Graphs and Related Graphs; 電子情報通信学会回路とシステム研究会; 2013年11月7日; 渡り温泉さつき, 岩手県花巻市。
- (8) S. Ueno; Orthogonal Ray Graphs with Applications to Nanocircuit Design; 電子情報通信学会回路とシステム研究会; 2013年11月6日; 渡り温泉さつき, 岩手県花巻市。
- (9) S. Tayu, S. Ueno; Stable Matchings in Trees; 情報処理学会アルゴリズム研究会; 2013年11月6日; 渡り温泉さつき, 岩手県花巻市。
- (10) A. Takaoka, S. Tayu, S. Ueno; On Unit Grid Intersection Graphs; The 16th Japan Conference on Discrete and Computational Geometry and Graphs; 2013年9月19日; 東京理科大学, 東京都新宿区。
- (11) S. Tayu, S. Ueno; Stable Matchings in Trees; The 16th Japan Conference on Discrete Geometry and Graphs; 2013年9月17日; 東京理科大学, 東京都新宿区。
- (12) A. Takaoka, S. Tayu, S. Ueno; On Unit Grid Intersection Graphs; 電子情報通

- 信学会回路とシステム研究会；2013年7月12日，熊本大学，熊本県熊本市。
- (13) S. Ueno; Orthogonal Ray Graphs; The 3rd International Conference on Discrete Mathematics; 2013年6月13日；Karnatak University, Dharwad, India.
- (14) K. Nishikawa, S. Tayu, S. Ueno; A Note on the Subtree Isomorphism Problem; 電子情報通信学会総合大会；2013年3月20日，岐阜大学，岐阜県岐阜市。
- (15) A. Takaoka, S. Tayu, S. Ueno; A Note on the OBDD Representation of Graphs; 電子情報通信学会総合大会；2013年3月20日，岐阜大学，岐阜県岐阜市。
- (16) K. Nishikawa, S. Tayu, S. Ueno; On Orthogonal Ray Trees; 電子情報通信学会回路とシステム研究会；2013年1月28日，別府国際コンベンションセンター，大分県別府市。
- (17) A. Takaoka, S. Tayu, S. Ueno; On Minimum Feedback Vertex Sets in Graphs; International Conference on Networking and Computing; 2012年12月6日，沖縄県男女共同参画センター，沖縄県那覇市。
- (18) S. Tayu, S. Ueno; A Note on Energy-Aware Mapping for NoCs; 電子情報通信学会回路とシステム研究会；2012年11月1日，岩手大学，岩手県盛岡市。
- (19) A. Takaoka, S. Tayu, S. Ueno; Representation of Bipartite Graphs by OBDDs; 情報処理学会アルゴリズム研究会；2012年10月4日，北海道大学，北海道札幌市。
- (20) S. Tayu, S. Ueno; A Note on the Energy-Aware Mapping for NoCs; 電子情報通信学会ソサイエティ大会；2012年9月12日，富山大学，富山県富山市。
- (21) K. Ishii, S. Tayu, S. Ueno; A Note on the Cutwidth of Trees; 電子情報通信学会ソサイエティ大会；2012年9月12日，富山大学，富山県富山市。
- (22) A. Takaoka, S. Tayu, S. Ueno; A Note on Two-Directional Orthogonal Ray Graphs; 電子情報通信学会ソサイエティ大会；2012年9月12日，富山大学，富山県富山市。
- (23) D. Ito, S. Tayu, S. Ueno; The Complexity of the Densest k -Subgraph Problem for Chordal Bipartite Graphs; 電子情報通信学会ソサイエティ大会；2012年9月12日，富山大学，富山県富山市。
- (24) K. Nishikawa, S. Tayu, S. Ueno; Characterizations of Orthogonal Ray Trees; 電子情報通信学会ソサイエティ大会；2012年9月12日，富山大学，富山県富山市。
- (25) A. Takaoka, S. Tayu, S. Ueno; On Minimum Feedback Vertex Sets in Graphs; 電子情報通信学会回路とシステム研究会；2012年7月3日，京都リサーチパーク，京都府京都市。
- (26) A. Takaoka, S. Tayu, S. Ueno; Minimum Feedback Vertex Sets in Permutation Bigraphs; 電子情報通信学会総合大会；2012年3月22日，岡山大学，岡山県岡山市。
- (27) S. Tayu, A.M.S. Shrestha, S. Ueno; On the Complexity of Energy-Aware Mapping for NoCs; 電子情報通信学会総合大会；2012年3月22日，岡山大学，岡山県岡山市。
- (28) S. Tayu, A.M.S. Shrestha, S. Ueno; On the Complexity of Energy-Aware Mapping for NoCs; 電子情報通信学会回路とシステム研究会；2012年3月9日，新潟大学，新潟県新潟市。
- (29) S. Tayu, T. Yamada, S. Ueno; On Efficient Universal Quantum Circuits; 電子情報通信学会回路とシステム研究会；2011年11月17日，山口大学，山口県山口市。
- (30) K. Nishikawa, S. Tayu, S. Ueno; A Note on the Maximum Balanced Biclique Problem; 電子情報通信学会ソサイエティ大会；2011年9月15日，北海道大学，北海道札幌市。
- (31) S. Tayu, K. Imai, S. Ueno; A Note on the Subtree Isomorphism Problem; 電子情報通信学会ソサイエティ大会；2011年9月15日，北海道大学，北海道札幌市。
- (32) A.M.S. Shrestha, S. Tayu, S. Ueno; Bandwidth of Convex Bipartite Graphs and Related Graphs; International Computing and Combinatorics Conference; 2011年8月15日，Double Tree Hotel, Dallas, U.S.A.
- (33) A.M.S. Shrestha, S. Tayu, S. Ueno; Bandwidth of Convex Bipartite Graphs and Related Graphs; Hungarian-Japanese Symposium on Discrete Mathematics and Its Application; 2011年5月31日，京都大学，京都府京都市。

〔その他〕

東京工業大学大学院理工学研究科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・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：30151814