

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 29 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24650062

研究課題名(和文) 極限的に簡潔なBDDデータ構造の研究

研究課題名(英文) Research on Asymptotically Succinct BDD Data Structures

研究代表者

湊 真一(MINATO, Shin-ichi)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：10374612

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：BDD(Binary Decision Diagram; 二分決定グラフ)は、論理関数や組合せ集合を圧縮して索引化するデータ構造であり、近年、様々な用途に広く応用されている。しかしBDDではポインタやハッシュ表のための記憶を使用するため、BDDの圧縮率があまり高くない例題に対しては、単純なビット列表現に比べて効率が大幅に悪化することがある。本研究では、BDDの構造情報をビット列に圧縮して格納することで、極限的に簡潔なBDD構造を生成するアルゴリズム「DenceZDD」を開発した。さらに既存のBDD構造とハイブリッドに結合することで、動的なデータ変更にも対応する手法の開発を進めた。

研究成果の概要(英文)：BDD(Binary Decision Diagram) is a data structure to represent Boolean functions or combinatorial sets in a compressed index structure. Today, BDDs are widely used for various applications, however, since a BDD needs to manipulate pointers and hash tables, BDD's compression rate may become worse than naive bit string representation, for the data where BDD's compression is not very effective. In our research, we developed a new algorithm, named "DenceZDD," which generates asymptotically succinct BDD structures by packing the structural information into a bit string. In addition, we proposed a method for dynamically manipulating BDDs by hybrid combination of a Dence ZDD system and a conventional BDD manipulation system.

研究分野：大規模離散構造データ処理アルゴリズム

キーワード：BDD ZDD 簡潔データ構造 離散構造 論理関数 組合せ集合

1. 研究開始当初の背景

BDD (Binary Decision Diagram; 二分決定グラフ) は、論理関数や組合せ集合を圧縮して索引化し、多様な演算を素早く行うデータ構造であり、実用的な場面で 1000 倍以上の圧縮率が得られることがあるため、近年、様々な用途に広く応用されている。特に D.E.Knuth の名著「The Art of Computer Programming」の最新巻 (Vol.4-1, 2009 年) で、180 ページに渡って BDD 技術の解説が掲載されたことにより、その注目度が一層高まっている。しかしながら BDD は万能な技法ではなく、例題の性質によって圧縮率が非常に高くなることもあれば、ほとんど圧縮が効かない場合もある。既存の BDD 処理系では、ポインタやハッシュ表のために 1 節点あたり 30~40 バイトの記憶量を使用するため、圧縮があまり効かない例題に対しては、単純なビット列表現に比べて速度や記憶効率が数十倍も悪化することがある。つまり BDD はハイリスク・ハイリターンな性質を持つ。そのため、計算機の性能限界に近い超大規模なデータ処理を、少しでも良いから確実に改善したい、という用途には適用しづらい側面があった。

これまでに世界各地で開発され提供されているほぼ全ての BDD 処理系は、約 25 年前に CMU の Bryant により考案された原理にもとづいて構築されている。すなわち、主記憶の任意のアドレスに定数クロックで素早くアクセス可能であるという、今日の標準的な計算機モデルの特長を最大限活用し、「ポインタによるグラフ操作」と「ハッシュ表による一致判定」を効率よく行うことで、BDD の一意性を保ち、重複する演算を省いて高速な演算処理を実現している。本研究では、ポインタやハッシュ表を極力使用しないという点で、これまでの四半世紀に渡る BDD 処理技法の常識を打破しようとするものである。

通常の BDD 処理系では、個々の分岐節点が 30~40 バイトの固定長のレコードからなる配列を主記憶に格納する形になっており、各レコードは、2 つの分岐先を指すポインタ、変数番号、および一意性を保つハッシュ表を管理するためのポインタや参照数を数えるカウンタ、等からなる。これに対し、本研究では、ある一定の順序で BDD 全体を重複なくたどる順序を設定し、その順序に現れる順で BDD の構造情報をビット列に圧縮して格納することで、1 節点あたり 1~2 バイトにできるだけ近い、極限的に簡潔な BDD 構造を目指す。さらに簡潔データ構造の分野では定石として使われている Rank/Select 辞書のテクニックを活用して、圧縮データに対して擬似的にランダムアクセスや一致判定を高速に行う。これまでに、定兼や岡野原らにより木やトライの簡潔データ構造は提案されているが、BDD についてはまだほとんど研究されておらず、簡潔圧縮化によって BDD

の持つ豊富な演算体系が支障なく実行できるのか、それとも一部の機能のみが効率よく実現できるのか、という点についても、今後の研究が待たれている。

2. 研究の目的

本研究計画では、ポインタやハッシュ表を極力使用せずに極限的に簡潔な BDD データ構造を研究し、圧縮率が出ない最悪のケースでも単純ビット列とほぼ同等の記憶効率が得られるような、真に有効な圧縮データ構造を目指す。さらに、そのような簡潔な BDD データ構造で、どのような演算が効率よく実行できるかを明らかにする。得られた知見をもとに、具体的な実用問題に適用できる効率の良い演算アーキテクチャを開発し、その性能を評価する。本研究は、元々圧縮データ表現の一種である BDD を、さらに極限まで圧縮度を高めて簡潔に表現することを目指すものである。

3. 研究の方法

本研究では、大きく分けて、以下の 3 項目についてそれぞれ研究を進める。

(1) 極限的に簡潔な BDD データ構造の基本実装技術の研究 (湊)

まず平成 24 年度は、ある一定の順序で BDD 全体を重複なくたどる順序を設定し、その順序に現れる順で BDD の構造情報をビット列に圧縮して格納することで、1 節点あたり 1~2 バイト程度の極限的に簡潔な BDD 構造を生成するアルゴリズムを実装する。ただし、そのままでは、単に構造をビット列表現しただけであり、それ以上に意味のある演算処理が行えるわけではない。この状態からスタートし、Rank/Select 辞書の技法を用いて、メンバーシップや要素数のカウンタ、制約条件による絞り込み等、種々のクエリ演算を高速に実行するための補助データ構造を追加する方法の検討を進め、記憶効率と演算速度のトレードオフの見極めを行う。

平成 25 年度以降は、本格的なソフトウェアを再実装し、実用的な例題に適用して、圧縮率や演算速度に関する性能評価を行う。また、計算理論の観点から、種々の演算機能に関する理論的な計算限界を求め、極限的に簡潔なデータ構造を目指す。

(2) 一般的な文字列データ圧縮符号化・高速検索法との比較研究 (喜田、湊)

LZ 符号のような一般的なデータ圧縮法との比較や、圧縮状態のまま高速検索が可能な新しい圧縮符号化技法を本研究に活用することを検討する。まず平成 24 年度は、BDD によるデータ圧縮技術と関係が深いと考えられる文法変換による圧縮アルゴリズムに関するこれまでの知見を元に、計算量の観点から、BDD ストリームの平均処理時間および平均圧縮率の研究に着手する。さらに、SAT

問題や組合せ最適化問題で扱われる組合せ論理データの特徴を分析し、平成 25 年度以降にかけて、文法変換圧縮や算術符号圧縮法の技術を、簡潔 BDD データ構造に効果的に適用する方法の研究を行う。さらにこれを発展させて、情報検索技術と簡潔 BDD データ構造を融合させたアルゴリズムとデータ構造の研究を行う。

(3) 簡潔な BDD データ構造を有効活用する演算アーキテクチャの研究(湊、喜田)

本研究の成果を、ストリーム型 BDD 処理系のような新しい演算アーキテクチャに適用する。まず平成 24 年度は、過去に提案されたストリーム BDD 処理系のアルゴリズムをベースにして、本研究計画において対象としている簡潔 BDD データ構造を扱うための実装に必要な機能の検討を進める。その過程で、固定的な論理演算だけではなく、外部から指定した汎用的な演算処理をストリーミング実行する機構を研究開発する。平成 25 年度以降は、新しい演算アーキテクチャの本格的な実装を行うとともに、既存のストリーム型 BDD 処理系を一般化し、1 本のストリームを入力として 1 本のストリームをオンライン出力する、汎用的な計算フィルタとして捉え直して再構築を行うことを検討する。処理系の開発と並行して、本技術を SAT 問題や組合せ問題に適用する実験を行い、その評価結果を処理アルゴリズムにフィードバックする。計画が順調に進んだ場合には、単一の計算機だけではなく、複数の計算機を組合せ並列に実行した場合の効果についても研究を進める。

4. 研究成果

(1) 極限的に簡潔な BDD データ構造の基本実装技術の研究(湊)

本研究では、BDD の構造情報をビット列に圧縮して格納することで、極限的に簡潔な BDD 構造を生成するアルゴリズム「DenseZDD」を構築した。Rank/Select 辞書の技法を用いて、メンバシップや要素数のカウント、制約条件による絞り込み等、種々のクエリ演算を高速に実行するための補助データ構造を追加する方法の検討を進め、記憶効率と演算速度のトレードオフの見極めを行った。

さらに「DenseZDD」を実装するための諸問題に取り組んだ。既存の BDD 構造と、簡潔な BDD 構造をハイブリッドに結合することで、記憶効率を高めつつ、論理演算による動的なデータ変更にも対応する手法の研究を進めた。

本研究成果は、国際ワークショップ ALSIP2012 および電子情報通信学会コンピュータ学会で発表を行った。さらに本分野で著名な国際会議の 1 つである SEA2014 に論文投稿し、高い競争倍率を勝ち抜いて採録された。それらの学会の場で、国内外の著

名研究者と活発に意見交換し、今後の研究の方向性について知見を得ることができた。

(2) 一般的な文字列データ圧縮符号化・高速検索法との比較研究(喜田、湊)

一般的な高速検索法として、リンクリストを用いた高速索引を用いる方法が知られている。本研究では、「DenseZDD」法と併用可能な方法として、現実的な大規模疎行列の検索を高速化する簡易な手法「Z-Skip-Links」法を考案した。本手法は従来の BDD 処理系に容易に導入できる点と、極限的・平均的には「DenseZDD」法と同じ高速化が得られる点の特長とする。ただし最悪時の性能保証の面では「DenseZDD」法が優れている。本成果は本分野で著名な国際会議の 1 つである ESA2013 に論文投稿し、高い競争倍率を勝ち抜いて採録された。

(3) 簡潔な BDD データ構造を有効活用する演算アーキテクチャの研究(湊、喜田)

極限的に簡潔な BDD 構造を生成するアルゴリズムの応用として、膨大な個数の解を生成して圧縮・列挙索引化する問題についての研究を行った。主な成果としては、与えられた非巡回有向グラフに含まれる全ての半順序集合を圧縮列挙索引化する手法、および与えられたグラフのオイラー路を全列挙索引化する手法などが挙げられる。本研究成果は、国際会議 ISSAC2014 および WALCOM2015 に論文投稿し、それぞれ高い競争倍率を勝ち抜いて採録された。今後の発展が期待される。

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 4 件)

1. Shin-ichi Minato: "Z-Skip-Links for Fast Traversal of ZDDs Representing Large-Scale Sparse Datasets," In Proc. of European Symposium on Algorithms 2013 (ESA 2013), LNCS 8125, Springer, pp. 731-742, Sep. 2013.
2. Shuhei Denzumi, Jun Kawahara, Koji Tsuda, Hiroki Arimura, Shin-ichi Minato and Kunihiro Sadakane: "DenseZDD: A Compact and Fast Index for Families of Sets," In Proc. of Symposium on Experimental Algorithms (SEA 2014), LNCS 8504, Springer, pp. 187-198, Jun. 2014.
3. Yuma Inoue and Shin-ichi Minato: "An Efficient Method for Indexing All Topological Orders of a Directed Graph," In Proc. of the 25th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2014), LNCS 8889, Springer, pp. 103-114, Dec.

2014.

4. Hiroyuki Hanada, Shuhei Denzumi, Yuma Inoue, Hiroshi Aoki, Norihito Yasuda, Shogo Takeuchi, and Shin-ichi Minato: "Enumerating Eulerian Trails via Hamiltonian Path Enumeration," In Proc. of 9th International Workshop of Algorithms and Computation (WALCOM2015), LNCS 8973, Springer, pp. 161-174, Feb. 2015..

〔学会発表〕(計8件:ただし再掲4件を含む)

1. Shuhei Denzumi, Jun Kawahara, Koji Tsuda, Hiroki Arimura, and Shin-ichi Minato: "Fast and Succinct Indices Based on Zero-Suppressed Binary Decision Diagrams," In Proc. of Third Workshop on Algorithms for Large-Scale Information Processing (ALSIP 2012), Miyazaki (Japan), Nov. 2012.
2. Shuhei Denzumi, Jun Kawahara, Koji Tsuda, Hiroki Arimura, Kunihiro Sadakane, Shin-ichi Minato: "Succinct Indices Based on Zero-Suppressed Binary Decision Diagrams," 電子情報通信学会コンピュータ研究会, 信学技報, Vol. 112, No. 498, COMP2012-56, pp. 23-30, 岐阜大学(岐阜市), Mar. 2013.
3. 湊真一: "大規模疎行列を扱うZDDの演算を高速化する飛び越しリンク構造," 電子情報通信学会コンピュータ研究会, 信学技報, Vol. 112, No. 498, COMP2012-55, pp. 15-22, 岐阜大学(岐阜市), Mar. 2013.
4. Shin-ichi Minato: "Z-Skip-Links for Fast Traversal of ZDDs Representing Large-Scale Sparse Datasets," In Proc. of European Symposium on Algorithms 2013 (ESA 2013), Nice (France), Sep. 2013.(再掲)
5. Shuhei Denzumi, Jun Kawahara, Koji Tsuda, Hiroki Arimura, Shin-ichi Minato and Kunihiro Sadakane: "DenseZDD: A Compact and Fast Index for Families of Sets," In Proc. of Symposium on Experimental Algorithms (SEA 2014), Copenhagen, Denmark, Jun. 2014. (再掲)
6. 井上祐馬, 湊真一: "順列決定グラフ(DD)を用いたオイラー路の高速な列挙索引化," 電子情報通信学会コンピュータ研究会, 信学技報, Vol. 114, No. 238, COMP2014-30, pp. 25-29, 中央大学(東京都), Oct. 2014.
7. Yuma Inoue and Shin-ichi Minato: "An Efficient Method for Indexing All Topological Orders of a Directed Graph," In Proc. of the 25th

International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2014), Jeonju (Korea), Dec. 2014. (再掲)

8. Hiroyuki Hanada, Shuhei Denzumi, Yuma Inoue, Hiroshi Aoki, Norihito Yasuda, Shogo Takeuchi, and Shin-ichi Minato: "Enumerating Eulerian Trails via Hamiltonian Path Enumeration," In Proc. of 9th International Workshop of Algorithms and Computation (WALCOM2015), Dhaka (Bangladesh), Feb. 2015. (再掲)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

湊 真一(MINATO, Shin-ichi)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号: 10374612

(2)研究分担者

喜田 拓也(KIDA, Takuya)

北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号: 70343316