

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 1 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2011

課題番号：20300051

研究課題名（和文） 超大規模な単一実メモリ空間を活用するデータベース解析処理アルゴリズムの研究

研究課題名（英文） Research on database analysis algorithms using very large-scale monolithic memory space

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

研究成果の概要（和文）：データベース分野では、当初はハードディスク内にデータを格納することが一般的だったが、2000年以降、中規模クラスの実用的なデータベースが計算機のメモリに納まるようになってきた。そこで本研究課題では、超大規模な単一実メモリ空間を持つ計算機に、二分決定グラフ（BDD）と呼ばれる巨大な圧縮データ構造を構築して、全てを高速アクセス可能なメモリ上に格納し、高速にデータベース解析処理を行う手法を提案し、その研究実用化を進めた。

研究成果の概要（英文）：Formerly, database applications required to store all the data into a hard disk, however, after 2000's, middle or large-scale practical databases become possible to be stored in the main memory of PCs. In this project, we proposed and developed a new method of high-speed database analysis with a very large-scale monolithic main memory. Our method is based on Binary Decision Diagram (BDD), which is a new type of compressed graph structure for efficiently manipulating large-scale combinatorial data.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	9,900,000	2,970,000	12,870,000
2011年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：知識発見とデータマイニング，二分決定グラフ

1. 研究開始当初の背景

高速ネットワーク技術と大容量記憶装置の進歩に伴い、科学技術や経済社会活動に関する膨大なデータがネットワークや計算機上に流通・蓄積されるようになってきた。このように爆発的に増大する一次データをそのまま扱うことは困難になりつつあり、何らかの方法で解析処理を行い、データに含まれる有意義な情報を取り出す効率の良い方法の

研究開発が、現代社会における緊急の課題となっている。大規模なデータベースを解析処理し、膨大な数のアイテムの組合せの中から特徴的な知識を半自動的に抽出する「データマイニング」「知識発見」の技術は、物流効率化や、ウェブ情報検索、疫学調査研究、遺伝情報解析等、社会の様々な局面で必要とされる重要な基盤技術の1つである。データベース解析処理の性能向上への取組みは国際

的に盛んであり、Agrawal らによる Apriori 法の研究(1993)に始まり、Eclat 法 (Zaki 他, 1997~), FP-Tree 法(Han 他, 2000~)等のアイテム集合マイニング技術、さらには系列集合やグラフ構造のマイニング等、様々な効率的解析・情報抽出手法が提案されている。このような背景の下、申請者は北海道大学において、科研費基盤研究(B)「二分決定グラフに基づく大規模データベースの効率的解析処理アルゴリズムの研究」(H17~本年度終了)を研究代表者として遂行するとともに、特別推進研究「半構造データマイニング」(H17~本年度終了, 代表: 有村博紀) および特定領域「情報爆発」公募研究 (H18~代表: トーマスツォイクマン) の研究分担者として、本研究分野の研究活動を推進してきた。申請者はこれらの研究プロジェクトを通して、ゼロサプレス型二分決定グラフ (ZBDD) と呼ぶグラフ構造を用いた新しい知識発見・データマイニングの基盤技術を提案・確立した。この3年間で、申請者が筆頭著者となっている論文だけでも、学術論文誌および査読つき国際会議に 14 件採択されている。(IJCAI2007, DS2007, DS2006, KDID2006, LLLL2005, WIRI2005 他。)

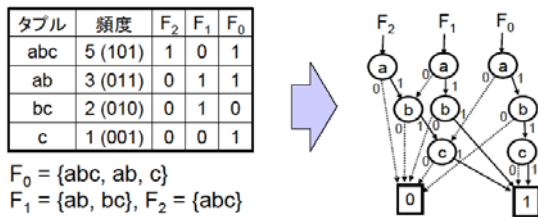


図1 データベースを表す BDD の例

表1 頻出パターン生成の実験結果

例題(mushroom)		処理時間(秒)	
最小頻度	頻出パターン数	ZBDD法	従来手法
1,000	123,287	0.50	0.64
500	1,442,504	1.32	3.29
300	5,259,786	2.25	9.96
200	18,094,822	3.21	31.63
100	66,076,586	5.06	114.21
70	153,336,056	7.16	277.15
50	198,169,866	8.17	357.27

BDD (Binary Decision Diagram, 二分決定グラフ) は図1に示すようなグラフを用いた組合せ論理データの表現方法であり、1986年に Bryant が提案し、VLSI 設計自動化の分野で発展してきた技術である。その特長は、メモリ上に単一のハッシュ表を用意し、グラフの全ての節点をハッシュ表に登録・共有することにより、冗長な部分グラフの生成を一切排除し、コンパクトな表現と高速な演算を可能にする技法である。BDD 技術は全てのデータをメモリ上に格納する必要があ

るため、扱える問題の規模は計算機のメモリ容量に依存する。VLSI 設計自動化の分野では、人手設計作業を補完する形で、1980年代後半から小規模な問題で BDD が使われ始め、その後、計算機のメモリ容量の拡大に従って、徐々に大規模な問題に適用されるようになった。一方、データベースの分野では、当初はデータを全てメモリに格納することは非現実的であったため、ハードディスクから必要なだけロードし、処理しては戻すという方法が一般的で、最近まで BDD が有効利用されることはなかった。ところが2000年前後から、中規模クラスの実用的なデータベースが計算機のメモリ上に納まるようになってきている。申請者らの研究により、BDD の改良型である ZBDD が、データベース解析処理の分野でも有効であることが初めて明らかになった。例えば、現在、世界最高速とされている LCM アルゴリズム (Uno 他, 2003) が、ZBDD 技術を組み合わせることで、さらに数十倍の高速化が可能となる例が実験結果により示されている。(表1)

データベース検索で古くから知られている suffix tree や suffix array の技術も、メモリ空間に、ある種の圧縮した索引構造を構築し、冗長性を排除しながら、メモリ上でランダムアクセスを行う演算により、大規模データを高速に解析処理する、という点では BDD と共通している。このような大規模メモリ空間での高速なデータベース処理技術が脚光を浴び始めたのは、メモリの大容量化が進んだ1990年代後半~2000年以降であり、現在も急速に進展を続けている。BDD はその典型的な成功例である。本研究では、これまでの申請者らの研究成果をさらに発展させ、BDD 技術に見られるような、超大規模な単一実メモリ空間を活用して演算処理量の圧縮・高速化を図る効率的なデータ処理アルゴリズムの研究を行う。

2. 研究の目的

本研究では、これまで研究を進めてきた BDD に基づく大規模データ解析処理方法をさらに発展・一般化させることにより、超大規模な単一実メモリ空間を活用する効率的なデータ処理・知識発見アルゴリズムの基盤技術を確立することを目的とする。具体的には、以下の3項目の課題に取り組む。

(1) BDD/ZBDD に基づくデータベース解析処理アルゴリズムの一層の高速化・効率化を図る。さらに、これを一般化し、系列データや木構造データの処理にも適用可能な、グラフを用いた圧縮データ構造と効率的な処理アルゴリズムの研究を行う。

(2) 超大規模な単一実メモリ空間を有する計算機ハードウェアを用いて、そのランダムアクセス能力を最大限に活用するアルゴリズム

ム実装技術の研究開発を行う。理論的・数学的な成果に閉じることなく、現実に効率よく動作するプログラムを開発し、国内外に公開することを目標とする。研究期間内に、予算の許す範囲で購入可能な最大規模のメモリを有する汎用 PC を導入し、実際に扱える問題の規模や処理速度を、実験により評価する。(3) 本基盤技術を様々な応用分野に適用し、実データでどれだけの性能が得られるかを評価し、そこで得られた課題をフィードバックする。例えば、Web 空間に存在する膨大な XML 文書データの解析と知識発見、生命情報科学分野におけるウイルスの変異予測や遺伝情報からのデータマイニング、ペイジアンネットワークによる確率統計モデルの解析処理などがあげられる。申請者らは、これまでの特別推進研究や特定領域研究のプロジェクトにおいて、それぞれの研究分野の第一線で活躍している著名な研究者と協力関係にあり、すでにいくつかの共著論文がある。今後も継続して実応用での評価を進める。

3. 研究の方法

(1) BDD/ZBDD に基づくデータベース解析処理アルゴリズムの効率化と一般化の研究

トランザクションデータベース解析処理の基礎的な処理である、組合せアイテム集合の出現回数(頻度)を、ZBDD によりインデックス化してメモリ上に生成・保持する効率的なアルゴリズムの研究開発を行う(湊, 有村)。頻出アイテム集合を生成することは、人工知能の分野においては、形式的な概念の束を抽出することに 1 対 1 に対応している。したがって、これを知識概念の抽出・学習過程と捉えて、知識概念を表す ZBDD を効率よく生成する手法の研究を行った(湊, 有村, 大久保)。さらに申請者は「共起成分の含意関係」(Minato, 2007)と呼ぶ新しい含意関係を提案しているが、これをさらに発展させ、出現頻度により重みをつけた共起含意関係を抽出するアルゴリズムの研究開発を行った(主に湊)。ZBDD は変数の順序づけによりその記憶効率が著しく影響することが知られている。申請者らは過去にデータベース中に含まれるアイテム変数の順序づけによる ZBDD 記憶量の影響を分析し、比較的良い順序づけを求めるアルゴリズム(Iwasaki 他, 2007)を提案しているが、この技法をさらに改良し、より大規模な問題に対して、現実的な時間で順序付けを求める方法をの開発を進めた(主に湊)。BDD およびその改良型である ZBDD は、理論的な観点から見ると、コルモゴロフ複雑度(あるデータを生成する最小のプログラムのコード長による情報量の表現)を近似的に定義する方法としても用いることができる。この観点から BDD/ZBDD の知識表現としての学術的側面を追求した(湊, ツォイクマン,

喜田)。

(2) 超大規模な単一実メモリ空間を活用するアルゴリズム実装技術の研究

本研究では、超大規模な単一実メモリ空間を有する計算機ハードウェアを想定し、その能力を最大限に引き出すアルゴリズム実装技術の研究開発を行った。申請者らは過去の特別推進研究において、汎用 PC としては最大級の 128 ギガバイトの単一実メモリ空間を備えたメモリサーバ PC を導入しており、これを用いて予備的な実験が行える環境にある。そこで、研究開始当初は、これまでに開発した各種の BDD/ZBDD 処理アルゴリズムを既存のメモリサーバ PC に実装し、性能評価と課題の抽出を行ったのち、3 年目にその時点の最高のコスト性能比を持つ超メモリサーバ PC を導入することとした。大規模な単一実メモリ空間を扱うための 64 ビットの Linux 系はかなり安定に動作するようになってきたが、互換性にまだ多少の問題があるため、実機での評価検証が不可欠である。大規模なメモリ空間を使い切る BDD/ZBDD 処理パッケージの保守管理を継続的に行い、利用ノウハウを蓄積するとともに、プログラムやドキュメント、評価用ベンチマーク例題などを国内外に随時公開した(喜田, 湊, 有村)。

(3) 本基盤技術の実データへの応用と性能評価、および課題のフィードバック

本技術を現実の諸問題に応用する場合、実問題の諸条件に合わせたアルゴリズムの研究開発を行う必要がある。そこでいくつかの問題を取り上げ、それぞれについてアルゴリズムの実装と性能評価を進めることとした。

- 現実の Web 上の文献情報の検索と類似文献のクラスタリング、XML のような木構造を持つデータの解析、さらに長大なテキスト情報の検索と知識発見を検討した(有村, 湊, ツォイクマン, 喜田)。
- 北大人獣共通感染症センタの伊藤准教授と連携して、インフルエンザウイルスのアミノ酸塩基配列のデータベースを題材に、ウイルスの変異予測のヒントとなる知識を抽出する手法の研究を進めた(有村, 湊)。
- 社会の様々な事象の相関モデルを確率的に表す大規模なペイジアンネットワークに対して、その事後確率や結合確率を厳密に計算することは、一般には膨大な計算コストを必要とする。このような問題に本基盤技術を適用した場合の有効性とその限界の検討を行った(湊)。上記のほかにも有望な応用が見つかれば、随時、検討を進めた。

4. 研究成果

(1) BDD/ZBDD に基づくデータベース解析処理アルゴリズムの効率化と一般化の研究

組合せアイテム集合の出現回数(頻度)を、ZDD によりインデックス化してメモリ上に生

成・保持する効率的なアルゴリズムを知識概念の抽出・学習過程と捉えて、知識概念を表す ZDD を効率よく生成する手法の研究を進めた。具体的な成果としては、毎日のデータベースから抽出した日毎の頻出パターンを ZDD の系列として表現し、ZDD 動詞の演算処理により特徴的な変化を効率よく発見する手法を提案した。この成果は本分野のトップカンファレンスの1つである SDM-2010 に採択され発表を行った。「共起成分の含意関係」(Minato, 2007)と呼ぶ新しい含意関係をさらに発展させ、誤差を許した共起含意関係を抽出するアルゴリズムの研究を進めた。本成果は国際会議 IEEE CIT2008 に採択され発表を行った。さらに、ZDD 同士の演算処理により特徴的な変化を効率よく発見する手法の開発を進め、web の新聞記事データベースから特徴的な話題を抽出する実験を行った。最後にソフトウェアのユーザインタフェースを強化して、様々な特徴パターンに対応可能とした。本成果は情報処理学会 FIT2010 他で発表を行っている。

(2) 超大規模な単一実メモリ空間を活用するアルゴリズム実装技術の研究

これまでに開発した各種の BDD/ZBDD 処理アルゴリズムを上記のメモリサーバ PC に実装し、性能評価と課題の抽出を行った。大規模なメモリ空間を使い切る BDD/ZBDD 処理パッケージの保守管理を継続的に行い、利用ノウハウを蓄積するとともに、プログラムやドキュメント、評価用ベンチマーク例題などを国内外に随時公開した。本科研費補助金により 256GB の単一実メモリを持つ汎用 PC を 3 台導入し、この PC のメモリを使い切るアルゴリズムの実験を行い、プログラムの完成度および動作安定度を向上させた。これらの機材と実装技術により、これまでにない大規模な BDD/ZDD の生成が可能になり、それが多くの研究成果に結実した。

(3) 本基盤技術の実データへの応用と性能評価、および課題のフィードバック

現実の Web 空間に存在するデータを題材に、本基盤技術の有効性の評価を進めた。Web 上の文献情報の検索と類似文献のクラスタリング、XML のような木構造を持つデータの解析、さらに長大なテキスト情報の検索と知識発見を検討した。生命情報科学分野におけるウイルスの変異予測や遺伝情報からのデータマイニングへの応用法の検討を進めた。

以上の研究成果は、以下に示した論文誌、国際会議、国内会議で発表しているが、特徴的であることは、発表された学会が単一のコミュニティではなく、多くの異分野に渡っていることである。大規模な単一実メモリを使い切る BDD/ZDD を扱う「離散構造処理系」は、社会的に重要な様々な応用に共通する基盤

的な技術であると言える。本科研費の研究成果を始めとする湊らによる近年の研究活動が評価され、JST により ERATO 湊離散構造処理系プロジェクトが採択され、今後、国家レベルで重点的に研究を推進することになった。

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 10 件)

1. S. Minato, T. Uno, and H. Arimura: "LCM over ZBDDs: Fast Generation of Very Large-Scale Frequent Itemsets Using a Compact Graph-Based Representation," In Proc. of 12-th Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (PAKDD 2008), (LNAI 5012, Springer), pp. 234-246, May 2008.

2. S. Minato: "A Fast Algorithm for Cofactor Implication Checking and Its Application for Knowledge Discovery," In Proc. of IEEE 8th International Conference on Computer and Information Technology (CIT 2008), pp. 53-58, July 2008.

3. Shigeru Yamashita, Shin-ichi Minato, and D. Michael Miller: "DDMF: An Efficient Decision Diagram Structure for Design Verification of Quantum Circuits under a Practical Restriction," IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E91-A, No.12, pp. 3793-3802, Dec. 2008.

4. Shin-ichi Minato: "Recent Results on BDD-Based Large-Scale Data Processing for Knowledge Discovery," In Proc. of Reed-Miller Workshop (RM-2009), pp. 27-32, May. 2009.

5. Haruya Iwasaki, Elsa Loekito, Shin-ichi Minato, James Bailey: "Comparison of ZDD-Vectors and WZDDs for Frequent Pattern Mining," Proc. of the Sixth Workshop on Learning with Logics and Logics for Learning (LLLL 2009), pp. 51-55, July, 2009.

6. Shin-ichi Minato and Takeaki Uno: "Frequentness-Transition Queries for Distinctive Pattern Mining from Time-Segmented Databases," Proc. of 2010 SIAM International Conference on Data Mining (SDM' 2010), pp. 339-349, Apr. 2010.

7. 湊真一: "BDD/ZDD を基盤とする離散構造と演算処理系の最近の展開," 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, Vol. 4, No. 3, pp. 224-230, Jan. 2011.

8. 湊真一, 有村博紀: "「おめでとうソサイエティ論文賞」ゼロサプレス型二分決定グラ

フを用いたトランザクションデータベースの効率的解析手法,"電子情報通信学会 情報・システムソサイエティ誌, Vol. 15, No. 3, p. 15, Nov. 2010.

9. Shin-ichi Minato and Nicolas Spyratos: "BDD-Based Combinatorial Keyword Query Processing," In G. Kreuzberger, A. Lunzer, and R. Kaschek, editor, "Interdisciplinary advances in adaptive and Intelligent assistant Systems: concepts, techniques, applications, and Use," chapter 2, pp. 26-39, Information Science reference by IGI Global, Jan. 2011.

10. Shigeru Yamashita, Shin-ichi Minato, and D. Michael Miller: "Synthesis of Semi-Classical Quantum Circuits," Journal of Multi-Valued Logic & Soft Computing, Vol. 18, No. 1, pp. 99-113, Old City Publishing, Jan. 2012.

[学会発表] (計 19 件)

1. 倉井龍太郎, 湊真一, ツオイクマン トーマス: "ゼロサプレス型二分決定グラフによる圧縮と知識発見," 電子情報通信学会データ工学研究会, 2008年6月19日, 小樽市民会館(北海道小樽市)

2. Shin-ichi Minato: "Efficient Method of Large-Scale Data Analysis Using BDD-based Data Compression," 2008 International Workshop on Multi-Media Signal Processing (IWMMSP 2008), invited, 2008年6月24日, 北海道大学

3. 齋藤高央, 湊真一, ツオイクマン トーマス: "コルモゴロフ複雑性に基づく画像圧縮と分類に関する実験と考察," FIT-2008 IEICE/IPSJ 第7回 情報科学技術フォーラム, 2008年9月4日, 慶応義塾大学湘南藤沢キャンパス

4. 鈴木拓, 湊真一: "BDD/ZDD を用いたペントミノパズルの解の列挙," 電子情報通信学会コンピュータシミュレーション研究会, 2009年5月26日, 埼玉大学

5. Shin-ichi Minato: "Recent Topics on BDDs/ZDDs for Data Mining and Knowledge Discovery," The International Workshop on Data Mining and Statistical Science (DMSS 2009), Invited, 2009年7月7日, 京都大学

6. 岡崎佑太, 湊真一: "頻出パターン抽出アルゴリズム「LCM over ZDDs」の変数順序付けの影響に関する考察," FIT-2009 IEICE/IPSJ 第8回 情報科学技術フォーラム, 2009年9月4日, 東北大学

7. 二木克也, 湊真一: "共起成分の含意関係に基づくデータマイニングの実験と考察," 情報論的学習理論ワークショップ (IBIS 2009), 2009年10月20日, 九州大学

8. 伝住周平, 有村博紀, 湊真一: "系列二分決定グラフを用いた部分文字列索引の構築," 第2回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム(DEIM 2010), 2010年2月28日, 淡路夢舞台国際会議場(兵庫県)

9. 岡崎佑太, 湊真一: "ZDDを用いた頻出パターン演算によるWebテキストデータからの知識発見," 第2回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム(DEIM 2010), 2010年2月28日, 淡路夢舞台国際会議場(兵庫県)

10. 二木克也, 湊真一: "2個組アイテムのデータベースにおける共起成分の含意関係の性質について," 第2回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム(DEIM 2010), 2010年2月28日, 淡路夢舞台国際会議場(兵庫県)

11. 岡崎佑太, 湊真一: "ZDDを用いた頻出パターン演算によるWebテキストデータからの知識発見とその評価," FIT-2010 IEICE/IPSJ 第9回 情報科学技術フォーラム, 2010年9月7日, 九州大学

12. Shin-ichi Minato: "Recent Topics on Decision Diagrams and Discrete Structure Manipulation," 9th International Workshop on Boolean Problems (IWSBP 2010), invited, 2010年9月16日, Freiberg 大学(ドイツ)

13. Shin-ichi Minato: "Discrete Structure Manipulation for Discovery Science Problems," 25th Annual International Symposium on Computer and Information Sciences (ISCIS 2010), invited, 2010年9月22日, 王立科学協会(ロンドン)

14. Shin-ichi Minato: "PiDD: A New Decision Diagram for Efficient Problem Solving in Permutation Space," 14th International Conference on Theory and Applications of Satisfiability Testing, 2011年6月19日, Univ. Michigan (USA)

15. Shuhei Denzumi, Ryo Yoshinaka, Hiroki Arimura and Shin-ichi Minato: "Notes on Sequence Binary Decision Diagrams: Relationship to Acyclic Automata and Complexities of Binary Set Operations," Prague Stringology Conference 2011 (PSC2011), 2011年8月30日, Czech Technical Univ., Prague (Czech)

16. Yusaku Kaneta, Shingo Yoshizawa, Shin-ichi Minato, and Hiroki Arimura: "High-speed String and Regular Expression Matching on FPGA," Asia Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference 2011 (APSIPA ASC 2011), 2011年10月18日, Grand New World Hotel Xi'an (China)

17. Hiroshi Aoki, Shigeru Yamashita and Shin-ichi Minato: "An Efficient Algorithm

for Constructing a Sequence Binary Decision Diagram Representing a Set of Reversed Sequences," 2011 IEEE International Conference on Granular Computing, 2011年11月8日, Garden Villa, Kaohsiung (Taiwan)

18. 湊真一: "DA 分野から発展した BDD/ZDD 技術の最近の研究状況について," 情報処理学会 DA シンポジウム招待講演, 2011年8月31日, ホテル下呂温泉水明館(下呂市)

19. 湊真一: "BDD/ZDD を基盤とする離散構造処理系の技法と最近の展開," 日本ソフトウェア科学会第28回大会 招待講演, 2011年9月28日, 沖縄県市町村自治会館(那覇市)

[図書] (計3件)

1. Shin-ichi Minato: "Data Mining Using Binary Decision Diagrams," In T. Sasao and J. Butler, editor, "Progress in Representation of Discrete Functions (Synthesis Lectures on Digital Circuits and Systems)," chapter 5, pp. 97-109, Morgan & Claypool Publishers, May 2010. (13 ページ分担執筆)

2. S. Chawla, T. Washio, S. Minato, S. Tsumoto, T. Onoda, S. Yamada, A. Inokuchi, (Editors): "New Frontiers in Applied Data Mining," PAKDD 2008 International Workshops, Osaka, Japan, May 20-23, 2008, Revised Selected Papers, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 5433, ISBN: 978-3-642-00398-1, Springer, Feb. 2009. (全213 ページ)

3. Shin-ichi Minato and Nicolas Spyrtos: "BDD-Based Combinatorial Keyword Query Processing," In G. Kreuzberger, A. Lunzer, and R. Kaschek, editor, "Interdisciplinary advances in adaptive and Intelligent assistant Systems: concepts, techniques, applications, and Use," chapter 2, pp. 26-39, Information Science reference by IGI Global, Jan. 2011. (14 ページ分担執筆)

[産業財産権]

なし

[その他]

ホームページ

<http://www-alg.ist.hokudai.ac.jp/~minat>
[o](#)

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

有村 博紀 (ARIMURA HIROKI)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号: 20222763

ツオイクマン トーマス (ZEUGMANN THOMAS)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号: 60374609

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

大久保 好章 (OKUBO YOSHIAKI)

北海道大学・大学院情報科学研究科・助教

研究者番号: 40271639