

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：13302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K00074

研究課題名(和文) インターネットにおけるFPGAを用いた音楽電子指紋の大規模検索

研究課題名(英文) Large scale audio fingerprint searching in the internet using FPGA

研究代表者

井口 寧 (Inoguchi, Yasushi)

北陸先端科学技術大学院大学・情報社会基盤研究センター・教授

研究者番号：90293406

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、インターネット上の音楽ファイルから電子指紋をリアルタイムに検出し、音楽情報DB(データベース)を検索しながら、電子ファイルの流通をコントロールするための要素技術を解明する。本研究の成果の概要としては、計算した電子指紋を大規模な楽曲データベースから実時間で照合するため、複数GPGPUを用いた検出機構を確立した。また従来電子指紋を楽曲の先頭128kサンプルのみで計算していたところ、楽曲全体から電子指紋サンプルを取得することによって、指紋の検出精度が向上した。更に検出システム全体を高位合成によって構築可能であるという知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、Winny や WinMXなど、インターネットでデジタル著作物を交換するソフトウェア(ファイル交換ソフト)が広く用いられ、デジタル著作物の著作権侵害が大きな社会問題となっている。ファイル交換ソフトを利用する理由は、必ずしも著作権を侵害することが目的ではなく、音楽等の便利な入手ツールとして利用している要素が少なくない。もし音楽の電子指紋が高速に検出・検索できれば、誰が誰にどの楽曲を送ったか把握でき、許諾の付与や課金が容易に可能になる。このような手軽で合理的な音楽共有のための手段を構築し、社会の豊かさに貢献することが、本研究の最終目的である。

研究成果の概要(英文)：In this research we develop a method to calculate audio finger print from an audio file sending via the internet and detect the song and controlling it's copyright. As the first result of this research, we establish a method to identify the calculated fingerprint from the billions number of songs in the audio fingerprint database using multi-GPGPUs. The second major result is a new audio fingerprint calculation algorithm. Conventional method calculates the fingerprint using 128k samples form the top of the audio file, thus the algorithm uses only 2.97 second of the song and it decrease the detection accuracy. We proposed a new sampling method that takes fingerprint samples from the whole of the music file, and we improve the detection accuracy. The final major result is to find the possibility of the design using high-level synthesis.

研究分野：並列処理，

キーワード：FPGA 音楽電子指紋 MIDI

1. 研究開始当初の背景

背景

近年, Winny や WinMX など, インターネットでデジタル著作物を交換するソフトウェア(ファイル交換ソフト)が広く用いられ, デジタル著作物の著作権侵害が大きな社会問題となっている. このデジタル著作物を保護するための一手法として, 電子指紋技術^[Haitsma2002]が注目されている. 電子指紋は, 音楽や画像などのデジタル著作物の周波数帯域ごとのエネルギー遷移など, 著作物ごとの特徴量を計算し, 数百ビットのコンパクトな表現で著作物を特定する技術であり, 著作物のコピーコントロールを成し得る重要な技術である. ところで, 電子指紋検出は従来ソフトウェアで行われており, 検出速度が低速であるため, ネットワークを介して流通するデジタル著作物の電子指紋の実時間検出・特定は困難という問題があった.

一方で, ファイル交換ソフトを利用する理由は, 必ずしも著作権を侵害することが目的ではなく, 音楽等の便利な入手ツールとして利用している要素が少ない(例えば, 米国 Apple 社による音楽のダウンロードサービスの成功は良い傍証である). 図 1 に本研究の実用例を示す. 従来では, 良い楽曲があっても著作権法の制約のため直接楽曲を伝えることはできず, アーティストや曲名を友達に伝え, 受信側は別途 CD 店や iTunes 等から購入する必要があった(図上部). もし音楽の電子指紋が高速に検出・検索できれば(図下部), 誰が誰にどの楽曲を送ったか把握でき, 許諾の付与や課金が容易に可能になる. このような手軽で合理的な音楽共有のための手段を構築し, 社会の豊かさに貢献することが, 本研究の最終目的である.

次頁図 2 にインターネットにおける電子指紋照合の処理の流れを示す. ルータで wave, mp3, AAC などの音楽ファイルが切り出され, Wave フォーマットに変換される. この処理はソフトウェアでも十分な速度で変換が可能である. 次に対象音楽の電子指紋が計算される. ここで得られた, つまり今ネットを通過中の音楽ファイルの電子指紋をクエリ指紋と呼ぶ. クエリ指紋は単なるビットパターンであり, 音楽の著作権情報などの属性は含まれていない. そこで電子指紋と音楽の属性情報を紐付けている音楽データベースを用意する. データベースに含まれる電子指紋を検索対象指紋と呼ぶ. クエリ指紋と DB の検索対象指紋を比較し, クエリ指紋に一番近いハミング距離を持つ電子指紋を見つける. これに紐付けられた属性情報を元に流通制御やライセンシングを行う.

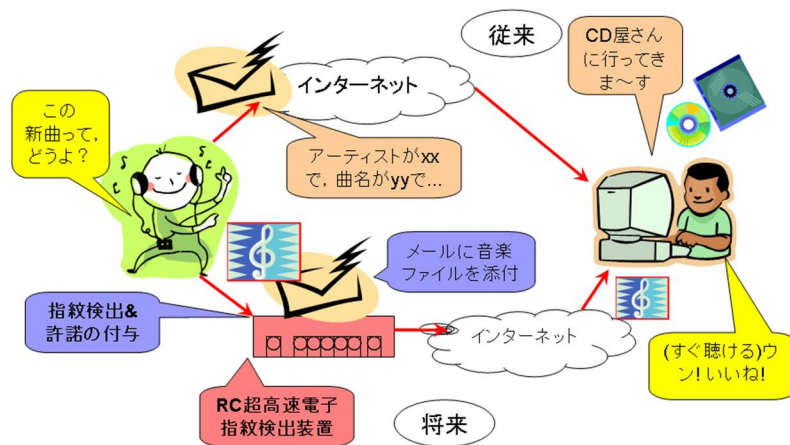


図 1 本研究の実用イメージ

これまで 2012 ~ 2014 年度の基盤研究(B)以前の研究から, FPGA を用いて電子指紋の検出速度を高速化することを試み, 成果として 指紋計算速度は 21.86Gbps, 検出精度として 99.99% (誤検出率は 0.01%)を達成した. 基盤研究(B)では指紋計算速度は達成したものの, 検索においては対象曲数が数百曲と少ないことが大きな問題である. この原因は, FPGA の内部メモリが少なく, また外部メモリを用いたとしてもメモリバンド幅が十分に取れないため, 検索対象数が増加できないところにある. 実用化す

るためには、リアルタイムで電子指紋を照合・検索する技術が必須である。更に電子指紋は、音楽ファイルのmp3化などの非可逆圧縮のため、同じ楽曲でも完全に一致しないので、似ている(ハミング距離が最小の)指紋を検索する点にも難しさがある。

2. 研究の目的 目的・目標

本研究では実用的にインターネット上で音楽を検索するという目的のために次の目標を掲げる。

- (1) 検索規模の目標: 検索対象の数量としての目標は Apple iTunes Store に収容されている数千万曲(本研究では 5 千万曲を仮定)とする。本研究で用いている電子指紋のサイズは 1 楽曲あたり 4,096bit なので、5 千万曲だと約 25GB になる。この電子指紋全てを FPGA 内のメモリに収容することは不可能である。そこで音楽 DB 内にある指紋をクラスタ分割し、音楽ファイルから得られた指紋(クエリ指紋)に近いクラスタから順に比較する。対象クラスタを高速に決定するために、指紋よりも更にコンパクトなハッシュを高速なメモリに置くことによって、少ないメモリで大規模な検索を可能とする。
- (2) 精度の目標: クラスタ分割では分割法が不適切だと検索精度が低下する点が問題になる。本研究では音楽電子指紋の周波数成分に注目し、mp3 圧縮等によるビット変化に対して高い耐性を持つビットを用いてクラスタリングを行い、探索精度を向上させる。周波数成分を指紋に反映すると、探索対象クラスタに近いクラスタが定義できる。そこで探索対象クラスタの近傍クラスタも同時に探索することによって、探索漏れを少なくする。周波数成分に基づく分割法その他、昨今のビッグデータ分析などの手法も参考にしながら、最適なクラスタ分割法を探索する。

目標とする誤検出率は、商用利用に耐える水準とするため、当面 10^{-6} 以下(1 億ダウンロードに 1 つ以下の誤り)、将来的には 10^{-8} 以下を目指す。

3. 研究の方法 研究方法

(1) Staged-LSH 法

電子指紋は音楽の周波数遷移などの特徴をコンパクトに表現したビット列である。元の音楽ファイルが数 MB 以上であるのに対し、本研究で用いる電子指紋は 4Kbit(512B)と十分コンパクトであるが、それでも数千万曲になると 25GB 程度となる。検索の度に 25GB 全部を照合することは不可能である。

そこで我々は FPGA 向けの Staged-LSH 法(図 3)を提案した。電子指紋を更にコンパクトな 96bit のハッシュとし、最初に粗い検索を行う。粗い検索で有望な指紋が見つければ、指紋のハミング距離を正確に計算するという二段階の方式であり、理論的には検索の高速化に大きく貢献できる。本研究で

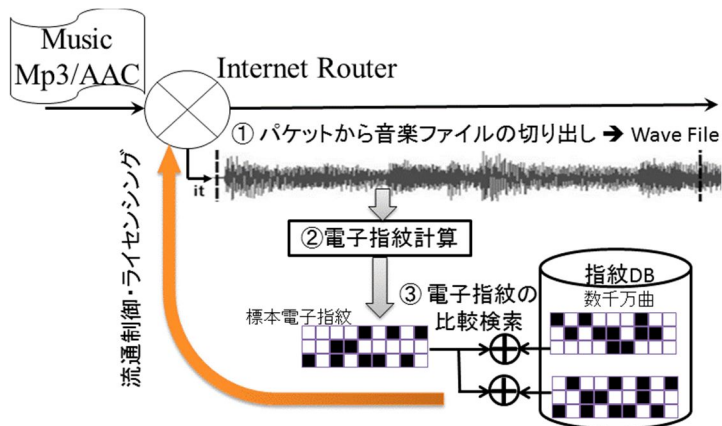


図2 電子指紋照合の処理の流れ

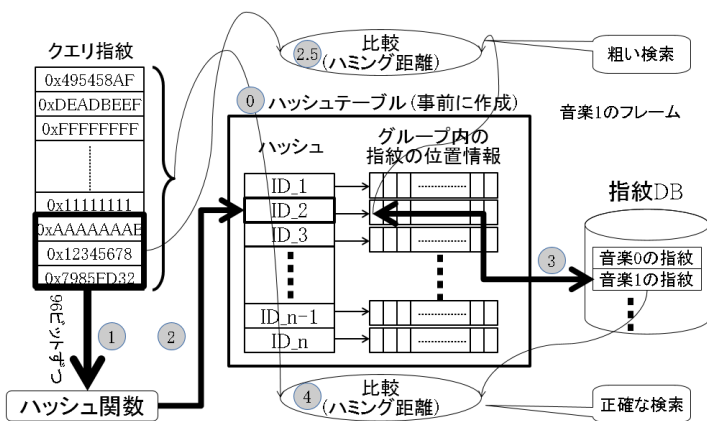


図3 Staged-LSH 法

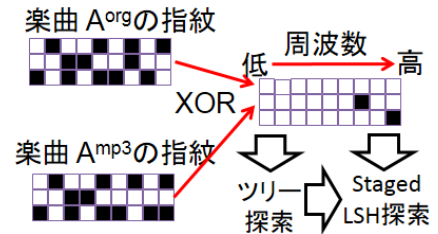
は、この Staged-LSH を FPGA に実装する。

(2) 楽曲の指紋サンプルの分散化

従来の電子指紋生成では、楽曲の先頭から 128k サンプル(サンプリング周波数が 44.1kHz の場合、楽曲の先頭 2.97 秒に相当)を用いて電子指紋を計算していた。これは Haitsma2002 で提案された FFT を用いた電子指紋計算方法に準じたサンプリング法であるが、指紋が楽曲の先頭に極度に偏るという問題点が懸念された。そこで本研究では楽曲の中から分散してサンプルを取得する手法を提案した。

(3) 高位合成による実装

本研究の進展にともない、C 言語に準じた高級言語での FPGA プログラミングが急速に普及してきた。本研究においても、生産性向上のため高級言語での実装を試みた。



4. 研究成果

2017 年度の研究実施項目は、FPGA による電子指紋検索基盤の構築、評価基盤の確立である。

FPGA による電子指紋検索システムの試作については、既にプロトタイプが完成し、国際会議で発表を行っている。加えて GPGPU による検索など、更なる高速検索の方法を確立している。GPGPU による検索では、一つ一つの検索速度は FPGA よりも低速だが、一度に多量の電子指紋を検索する場合には、複数の検索を同時実行できるメリットがあり、バッチ処理に向いていることが分かった。さらに複数の GPGPU を用いることによって、線形に処理性能が向上することが確かめられた。この成果はジャーナル論文として発表されている[発表論文 8]。

研究協力者の M. M. Hafizur Rahman (International Islamic University, Malaysia) 博士とは、将来のチップ化を見据えてハミング距離計算コアを Network on Chip で接続する時の構成を検討した。この成果は国際会議にて採択・発表された[発表論文 9]。

2018 年度は GPGPU によるアルゴリズムの検証に対して擬似音楽の自動生成アルゴリズムの開発を行い、MIDI での楽曲出力が得られた[研究成果 5]。また中規模(数千曲)の生成に対して、複数チップから成る大規模な検索に適用可能なクラスタリングアルゴリズムを開発した。この成果は国際会議で発表している[発表論文 4]。

研究協力者の M. M. Hafizur Rahman 博士とは、前年に引き続き、将来のチップ化を見据えてハミング距離計算コアを Network on Chip で接続する時の構成を検討した。前年の国際会議での発表を進化させ、ジャーナル論文誌に投稿したところ、採択された。[発表論文 3,9]。

2019 年度は 前年度に作成した MIDI 音源による擬似楽曲をデータベースとして、より検出精度が高く FPGA 向きの電子指紋検出アルゴリズム HiFP2.1 の開発と実装を行った。新しい電子指紋検出アルゴリズムは、以前の HiFP2.0 と同じく整数演算のみの計算で電子指紋を計算でき、かつ音楽ファイルから一様にサンプルを取り出すことによって、検出精度を向上させた[発表論文 2]。

更にデータベース検索方法として Staged LSH 法に基づく FPGA 実装および GPGPU での実装を改良した。前年度の Single GPU 向けの実装に対して、複数 GPU 向けの実装に取り組んだ。提案手法は複数の GPU に検出母体となるサンプルを割り当てる方法の改良および細かい周期での同期によって、検索精度と複数 GPU 利用時のスケーラビリティが向上している。

主要発表論文

- [1] Minh T. Nguyen, 河野 隆太, 井口 寧, "An approach to use High-level synthesis on HiFP 2.0: ND-range kernel & Single-task kernel", 2020 年度 電気関係学会 北陸支部連合大会,

- F2-1-1, 1 page in CD-ROM, 福井大学 (電子情報通信学会 優秀論文発表賞)
- [2] 山名友也, 井口 寧, "ハードウェアにおける高速なオーディオフィンガープリントを用いた楽曲全体のマッチング手法" 令和元年度北陸地区学生による研究発表会, 2020.
- [3] Mohammed N. M. Ali, M. M. Hafizur Rahman, Rizal Mohd Nor, Dhiren K. Behera, Tengku Mohd Tengku Sembok, Yasuyuki Miura and Yasushi Inoguchi, "SCCN: A Time-Effective Hierarchical Interconnection Network for Network-On-Chip", *Mobile Networks and Applications*, Springer, Vol. 24, No. 124, pp.1-10, Apr., 2019
- [4] Toan Nguyen Mau and Yasushi Inoguchi, "Scalable Dynamic Locality-Sensitive Hashing for Structured Dataset on Main Memory and GPGPU memory", 10th International Conference on Grid Computing (GridCom-2018), (accepted), Sydney, Australia, Dec. 22-23, 2018
- [5] YANG GEJUN, 井口 寧, "1 億曲スケールの人工楽曲データベースを用いた ネットワークにおける楽曲の高速検索システムの構築", 2018 年度 電気関係学会 北陸支部連合大会, F1-3, 1 page in CD-ROM, 北陸先端科学技術大学院大学, Sep. 8, 2018
- [6] M.M. Hafizur Rahman, Mohammed N. M. Ali, Adamu Abubakar Ibrahim, D K Behera, Yasuyuki Miura and Yasushi Inoguchi, "Soft Computing in Data Analytics, Advances in Intelligent Systems and Computing", A New Static Cost-Effective Parameter for Interconnection Networks of Massively Parallel Computer Systems, Springer, Vol. 758, pp. pp.147-155, Singapore, ISBN 978-981-13-0513-9, Aug., 2018
- [7] Tan Yiyu, Yasushi Inoguchi, Makoto Otani, Yukio Iwaya and Takao Tsuchiya, "A Real-Time Sound Field Rendering Processor", *Applied Sciences*, MDPI, Vol. 8, No. 1, 17 pages online, Jan., 2018
- [8] Toan Nguyen Mau and Yasushi Inoguchi, "Audio fingerprint hierarchy searching strategies on GPGPU massively parallel computer", *Journal of Information and Telecommunication*, Taylor and Francis, 26 pages online, Dec., 2017
- [9] Mohammed N. M. Ali, M. M. Hafizur Rahman, Dhiren K. Behera, and Yasushi Inoguchi, "Static Cost-Effective Analysis of a Shifted Completely Connected Network", *International Conference on Computational Intelligence in Data Mining (ICCIDM 2017)*, pp.165-175, Odisha, India, Nov. 11-12, 2017
- [10] 井口 寧, 福田 真啓, "FPGA による電子指紋検索の高速化事例", DA シンポジウム, 特別セッション: リコンフィギャラブルシステム ~ デバイス・設計環境・応用事例の最前線 ~, セッションオーガナイザー, pp.103-108, 石川県 山代温泉, Aug. 30-Sep. 1, 2017
- [11] Masahiro Fukuda and Yasushi Inoguchi, "Probabilistic Strategies Based on Staged LSH for Speedup of Audio Fingerprint Searching with Ten Million Scale Database", *International Symposium on Highly Efficient Accelerators and Reconfigurable Technologies (HEART)*, 6 pages in CD-ROM, Bochum, DE, June 7, 2017

参考文献

- [Haitsma2002] J. Haitsma, T. Kalker, "A Highly Robust Audio Fingerprinting System", *ISMIR 2002, 3rd International Conference on Music Information Retrieval*, Paris, France, October 13-17, 2002

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 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ali Mohammed N. M., Rahman M. M. Hafizur, Nor Rizal Mohd, Behera Dhiren K., Sembok Tengku Mohd Tengku, Miura Yasuyuki, Inoguchi Yasushi	4. 巻 24
2. 論文標題 SCCN: A Time-Effective Hierarchical Interconnection Network for Network-On-Chip	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mobile Networks and Applications	6. 最初と最後の頁 1255 ~ 1264
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11036-019-01262-2	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 該当する
1. 著者名 Nguyen Mau Toan, Inoguchi Yasushi	4. 巻 10
2. 論文標題 Locality-Sensitive Hashing for Information Retrieval System on Multiple GPGPU Devices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 2539 ~ 2539
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app10072539	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 Ali Mohammed N.M., Rahman M.M. Hafizur, Ibrahim Adamu Abubakar, Behera Dhiren K., Inoguchi Yasushi	4. 巻 8
2. 論文標題 The connectivity and the static-cost-effective analysis of a shifted completely connected network	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Computational Intelligence Studies	6. 最初と最後の頁 158 ~ 158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1504/IJCISTUDIES.2019.098021	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 該当する
1. 著者名 Mohammed N. M. Ali, M. M. Hafizur Rahman, Rizal Mohd Nor, Dhiren K. Behera, Tengku Mohd Tengku Sembok, Yasuyuki Miura and Yasushi Inoguchi	4. 巻 24
2. 論文標題 SCCN: A Time-Effective Hierarchical Interconnection Networkfor Network-On-Chip	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mobile Networks and Applications, Springer	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11036-019-01262-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Mohammed N.M. Ali, M.M. Hafizur Rahman, Adamu Abubakar Ibrahim, Dhiren K. Behera and Yasushi Inoguchi	4. 巻 8
2. 論文標題 The Connectivity and the Static-Cost-Effective Analysis of a Shifted Completely Connected Network	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Computational Intelligence Studies	6. 最初と最後の頁 158-175
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1504/IJCISTUDIES.2019.098021	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 該当する

1. 著者名 Tan Yiyu, Yasushi Inoguchi, Makoto Otani, Yukio Iwaya and Takao Tsuchiya	4. 巻 8,35
2. 論文標題 A Real-Time Sound Field Rendering Processor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Science	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app8010035	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Faiz Al Faisal, M.M. Hafizur Rahmana and Yasushi Inoguchi	4. 巻 101
2. 論文標題 A new power efficient high performance interconnection network for many-core processors	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Parallel and Distributed Computing	6. 最初と最後の頁 92-102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jpdc.2016.11.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 齋藤 卓磨, 井口 寧
2. 発表標題 高位合成を用いたFPGAによるCNN学習の電力効率の向上
3. 学会等名 2019年度 電気関係学会 北陸支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toan Nguyen Mau and Yasushi Inoguchi
2. 発表標題 Scalable Dynamic Locality-Sensitive Hashing for Structured Datase on Main Memory and GPGPU memory
3. 学会等名 10thInternational Conference on Grid Computing (GridCom-2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 YANG GEJUN, 井口 寧
2. 発表標題 1億曲スケールの人工楽曲データベースを用いた ネットワークにおける楽曲の高速検索システムの構築
3. 学会等名 2018年度 電気関係学会 北陸支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mohammed N. M. Ali, M. M. Hafizur Rahman, Dhiren K. Behera, and Yasushi Inoguchi
2. 発表標題 Static Cost-Effective Analysis of a Shifted Completely Connected Network
3. 学会等名 International Conference on Computational Intelligence in Data Mining (ICCIDM 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masahiro Fukuda and Yasushi Inoguchi
2. 発表標題 Probabilistic Strategies Based on Staged LSH for Speedup of Audio Fingerprint Searching with Ten Million Scale Database
3. 学会等名 International Symposium on Highly Efficient Accelerators and Reconfigurable Technologies (HEART) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomoki Kawamura, Yoneda Kazunori, Takashi Yamazaki, Takashi Iwamura, Masahiro Watanabe and Yasushi Inoguchi
2. 発表標題 A compression method for storage formats of sparse matrix in solving the large scale linear systems
3. 学会等名 19th Workshop on Advances in Parallel and Distributed Computational Models (APDCM) held in conjunction with 31rd IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井口 寧, 福田 真啓
2. 発表標題 FPGAによる電子指紋検索の高速化事例
3. 学会等名 DAシンポジウム, 特別セッション: リンコンフィギャラブルシステム~デバイス・設計環境・応用事例の最前線~ (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福田 真啓, 井口 寧
2. 発表標題 SnortのPCREからVerilog HDLへの自動変換
3. 学会等名 電子情報通信学会 リンコンフィギャラブルシステム研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山名友也, 井口 寧
2. 発表標題 ハードウェアにおける高速なオーディオフィンガープリントを用いた楽曲全体のマッチング手法
3. 学会等名 令和元年度北陸地区学生による研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Minh T. Nguyen, 河野 隆太, 井口 寧
2. 発表標題 An approach to use High-level synthesis on HiFP 2.0: ND-range kernel & Single-task kernel
3. 学会等名 2020年度 電気関係学会 北陸支部連合大会, F2-1-1
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 M.M. Hafizur Rahman, Mohammed N. M. Ali, Adamu Abubakar Ibrahim, D K Behera, Yasuyuki Miura and Yasushi Inoguchi	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 147-155
3. 書名 A New Static Cost-Effective Parameter for Interconnection Networks of Massively Parallel Computer Systems	

〔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
---------	---------