

機関番号：13302  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20500049  
 研究課題名（和文） デジタル著作物の適正流通を支援する電子指紋の超高速検出と実時間検索  
 研究課題名（英文） High speed audio fingerprint detection to support fair trade of digital contents and real time search.  
 研究代表者  
 井口 寧 (INOUCHI 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・准教授  
 研究者番号：90293406

## 研究成果の概要（和文）：

本研究では、インターネットに流通する音楽ファイルをリアルタイムに検出し、楽曲を特定するために必要な、インターネットを流通する音楽ファイル(mp3)などの楽曲を特定するために必要な、超高速電子指紋検出技術（音楽ファイルからの指紋生成）について研究を行った。ハードウェアに適合する Haar Wavelet 変換（HWT）を用いた新たなアルゴリズムを開発し、その検出速度は 21.86Gbps を得て、従来の FFT に基づいた手法の 1 万 8 千倍近い速度向上を達成した。

## 研究成果の概要（英文）：

This research addressed to develop an ultra-high speed audio finger print detection scheme to identify music from audio files such as mp3 which are exchanged through internet. We developed a new algorithm to synthesize audio fingerprint based on Haar-wavelet transform which is suitable for hardware implementation. Proposed scheme reached to 21.86Gbps detection speed and this speed is almost 18 thousand times faster than conventional FFT based method.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

## 研究分野：並列処理

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：FPGA, リコンフィギャラブル, 電子指紋, 音楽ファイル, インターネット配信

## 1. 研究開始当初の背景

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[1]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量することによって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。音楽などの著作物は、指紋によって楽曲が特定できるので、著作権者は流通しているデジタル化著作物の著作権の主張できるのである。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くない(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が良い傍証である)。つまり流通の利便性が確保できれば、ネットワークを介した著作物の公正な利用を大きく活性化できる可能性は大きいと考えられる。

これまで平成 17 年度～19 年度の若手研究 (A) で、電子透かしを用いたデジタル著作物の超高速検出について研究を行った。その過程で電子透かしを用いた超高速音楽ファイル検出技術は確立されたが(特許出願済み)、実用化に際して次の点が解決すべき課題であることが分かった。

- (1) 音楽ファイルに透かしを挿入することは、小さいとは言え雑音の混入につながり、音楽関係者から強い抵抗感があること、および
- (2) 透かしを検出した後、何百万曲もの楽曲の中から検出した楽曲をリアルタイムに検索・特定する技術が必要なこと。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、実用的にインターネット上で音楽を検出・特定するために必要な、次の研究課題に取り組む。

(1) 原音の音楽ファイルを改変せず楽曲を特定できる、電子指紋を用いた超高速電子指紋検出

(2) 多数の楽曲から電子指紋に合致する曲を瞬時に特定する、リアルタイム指紋照合検索

本研究で目指すものは、単なる音楽の特定ではなく、誰もが手軽に音楽を交換できるシステムの構築にある。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その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、伝えられた側は別途 CD 屋さんや iTunes 等からダウンロードする必要があった。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、許諾の付与や課金を容易に行うことができる。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、本研究の究極の目的である。

そこで本研究では、まず第一に (1) 電子指紋の検出をハードウェア回路で処理することによって、指紋検出処理の大幅な高速化を試みる。高速化の為のアイディアの骨子は次の通りである。

(i) VLSI チップ内の回路をユーザーが動的に構成可能な、FPGA や DRP 等のリコンフィギュラブル・デバイス(RC デバイス)を用いて、検出する指紋情報を回路内に埋め込む。この結果、比較器などが簡略化でき、回路の利用効率が向上する。さらに比較対象を外部メモリから読み込む必要が無い場合、ピン・ボトルネックが半減する。(ii) 同時に複数の指紋を並列に検出する。ハードウェア回路では、各部分回路は独立して並列に動作するので、複数の指紋セグメントに対する検出回路を並列に実装することによって、処理速度の大幅な向上を目指す。

第二に、この超高速電子指紋検出システムをインターネットに適用する際に必要となる (2) リアルタイム指紋照合検索技術を開発する。たとえ著作物の指紋が超高速に検出できたとしても、市場にはおよそ百万曲の楽曲が流通し、これらの指紋情報は膨大なものとなる。一方で、インターネットの通信速度は年々向上し、音楽ファイルがネットワークを通過する時間は極めて短い。そこで、音楽の流行廃れに着目し、次のような超高速照合指紋データベースの階層化・膨大な検索機構を考える。

(i) 楽曲のうち、一部の電子指紋を RC デバイス内へ埋め込み、高速に検出する。検出に漏れた楽曲は、ソフトウェアで処理を行う。(ii) どの楽曲を埋め込むか、オリコンヒットチャートなどの楽曲流行に基づいて回路を入れ替えるアルゴリズムを明らかにする。

音楽流通では、一般のデータアクセスに比べて (a) 少数のヒット曲が全体の流通の大部分を占める、(b) ヒット曲の入れ替わりは週単位で、しかも発売当初爆発的に流通し、徐々に減少する、といった特徴がある。そこで本研究では、楽曲のヒットチャートに基づく、音楽流通のための階層化検索アルゴリズムを研究開発する。前述したように、検出対象の電子指紋を RC デバイスに埋め込む場合、チップ容量の制限から 100 万曲分全ての指紋検出回路を埋め込むことはできない。そこで、出現頻度が高い楽曲の指紋検出回路を RC デバイス内に動的に入れ替え、平均応答時間を大幅に短縮する、音楽向け電子指紋照合検索のための高速アルゴリズムを開発する。具体的には、ある電子指紋を検索キーとして、100 万曲の中から 40 ミリ秒で照合検索できることが目標である。

### 3. 研究の方法

最初に、インターネットに適用可能な、電子指紋高速検出システムの構築に取り組む。指紋検出のハードウェア・コアは、音楽ファイル向けの電子指紋検出回路を並列実装することによって、処理の高速化を達成する。並列に検出処理を行なう回路のブロック図を考える。システムに入力された音楽データは、一定の長さ(バイト数)にセグメント分割された後、セグメントごとにFFTおよび周波数バンドごとのエネルギー計算を行う。この時間推移がその音楽の電子指紋となる。セグメントごとのFFTおよびエネルギー計算は独立して行えるので、FFTおよびエネルギー計算のための回路を並列に実装し、処理の高速化を図る。また、音楽向け電子指紋では、最終的に入力音楽の指紋と多くの楽曲の指紋データベース(指紋DB)のエントリを比較する必要があるが、指紋の比較は周波数のバンドごとに独立して行うことができる。そこで、指紋のバンドごとにも比較回路を並列実装し、検出処理速度を更に向上させる。つまり、本研究では、検出回路をセグメントごと、およびバンドごとの2段階の並列化によって処理の大幅な高速化を目指す。設計した並列指紋検出回路を、VLSI内の回路をユーザーが自由に書き換え可能なFPGAやDRP等のリコンフィギュラブル・デバイス(RCデバイス)を用いて実装する。

指紋検出ハードウェア・コアのもう一つの特徴は、「ある特定の指紋を検出する回路」を複数並列化して、RCデバイス内に構築することである。指紋照合検索では、インターネットを流通した音楽の電子指紋を指紋DBから照合検索し、該当する楽曲を特定する。この時に必要なハミング距離比較器を並列化し、参照元となる指紋DBの一部を回路内に埋め込めば、LSIのピン・ボトルネック(LSIの入出力ボトルネック)を解消し、ソフトウェアに比べて大幅な検索速度向上が期待できる。目標として、数百Mbps以上(理論性能1Gbps、実効500Mbps以上)の検出・検索速度を目指す。達成不可能な場合はシミュレーションで置き換え、この出力を次の第二段階の入力とする。

### 4. 研究成果

2008年度は、電子指紋検出アルゴリズムの計算量、回路量、被検出楽曲に対する耐改変性などについて、既存アルゴリズムをMATLAB上に実装することによって詳しく検討した。その結果、検出の基本的な要素はFFTによる周波数ごとの時間遷移の差分であることが判明し、検出率などについての基本的なデータを得た。一方、ハードウェア化の障害となっている要因は、FFTの計算複雑さであり、

この部分でハードウェア量や処理時間を大きく消費していることが分った。そこで、ハードウェア実装の観点から新しい電子指紋検出の実装法を研究し、実装時に問題となる回路量、クリティカルパス長など、ハードウェア実装における観点からアルゴリズムの評価を行った。新しいハードウェア向けアルゴリズムは、ハードウェア化の障害となったFFTの代わりに、Haar基底のWavelet変換を用いるアルゴリズムである。時間シフトや差分の計算方法を変えて、提案アルゴリズムの検出精度を確認した。128MbpsでのWMA及びmp3による圧縮、また22.05kHzでのサンプリングレート変換を施した10曲の音楽について実験を行ったところ、ハードウェア実装された既存アルゴリズムが315ミリ秒要していた処理を、ソフトウェア実装の提案アルゴリズムは128ミリ秒で処理可能になったことが分った。また、回路規模から試算したところ、ハードウェア実装された提案手法は、0.623ミリ秒の処理時間が推測された。更に検出精度について正規分布に従うと仮定した場合、提案アルゴリズムの誤検出率は10-30となることが分った。

2009年度は、楽曲から高速にFPIDを生成するために、ハードウェアでFPID生成を行うHiFPを提案し、HiFPのハードウェア実装性を評価した。既存のシステムはFPID生成に高速フーリエ変換を用いたが、今年度研究したHiFPではハードウェア実装に適した高速なFPID生成を行うために離散ウェーブレット変換のサブバンド分解を用いる。また、従来用いられてきたオーバーラップを用いないことで、精度を向上させている点が新しい。FPGAによる評価の結果、HiFPは既存のシステムと比較してスループットを25倍向上させ、使用リソース数も削減可能であることが分かった。

2010年度は、電子指紋検出アルゴリズムの計算量、回路量、被検出楽曲に対する耐改変性などについて、既存アルゴリズムをプログラムとして実装することによって詳しく検討した。前年度に引き続いて、ハードウェア実装向きの電子指紋検出アルゴリズムの改良を行った。今年度新たに提案したアルゴリズムは、1/4サンプルづつ間引きした上でHaar Wavelet変換(HWT)を行うものであり、ハードウェア実装の障害となる浮動小数点演算や乗算を用いないながらも、高い検出精度と実行速度を有するアルゴリズムである。提案アルゴリズムの実行時間をソフトウェアにて検証したところ、昨年アルゴリズムの実行時間とスループットがそれぞれ274ms、7.63Gbpsであった所、新アルゴリズムは95μ秒、21.86Gbpsが期待できることが分

った。従来のFFTベースのHaitsmaらのアルゴリズムは、同順で1.7秒および0.01Gbpsである。

様々な圧縮率や精度で改変を行った楽曲に対して、検出精度の評価を行ったところ、同じ楽曲なのに別楽曲として誤認識したケースが、Haitsmaらのアルゴリズムでは32万分の8、我々の昨年のアルゴリズムは32万分の1出会ったのに対し、新アルゴリズムは32万分の3、一方で実際は違う楽曲なのに同じ楽曲だと誤認識ケースが、同順で32万分の16、36、および新アルゴリズムは0であった。新アルゴリズムは、簡単にFPGAへの効率良い実装が可能ながら、従来アルゴリズムに比べて、有為に高い検出精度を達成できた。

## 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5件)

- ① M. M. Hafizur Rahman, Yukinori Sato and Yasushi Inoguchi, "On Nonuniform Traffic Pattern of Modified Hierarchical 3D-Torus Network", IEICE Transactions on Information and Systems, Vol. E94-D, No. 5, 1109-1112 (letter), May, 2011 (査読付)
- ② M. M. Hafizur Rahman, Yasushi Inoguchi, Faiz Al Faisal and Monz Kumar Kundu, "Symmetric and Folded Tori Connected Torus Network", Journal of Networks, Academy Publisher, Vol. 6, No. 1, pp. 26-35, Jan., 2011 (査読付)
- ③ M. M. Hafizur Rahman, Yasushi Inoguchi, Yukinori Sato, Yasuyuki Miura and Susumu Horiguchi, "Dynamic Communication Performance of a TESH network under the Nonuniform Traffic Patterns.", Journal of Networks, Academy Publisher, Vol. 4, No. 10, pp. 941-951, Dec., 2009 (査読付)
- ④ 荒木 光一, 佐藤 幸紀, 井口 寧, "動的リコンフィギャラブルプロセッサにおける並列タスクのデータ転送を隠蔽するための効果的な処理法", 信学論 D, Vol. J92-D, No. 12, pp. 2137-2146, Dec., 2009 (査読付)
- ⑤ M. M. Hafizur Rahman, Yasushi Inoguchi, Yukinori Sato and Susumu Horiguchi, "TTN: A High Performance Hierarchical Interconnection Network for Massively Parallel Computers", IEICE Transactions on Information and Systems, Vol. E92-D, No. 5, pp. 1062-1078, May., 2009 (査読付)

[学会発表] (計11件)

- ① Koichi Araki, Yukinori Sato, Vijay Jain and Yasushi Inoguchi, "Performance Evaluation of Audio Fingerprint Generation using Haar Wavelet Transform", Proceedings of the 2011 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP11), pp. 380-383, Tianjin SaiXiang Hotel, Tianjin, China, Mar. 3, 2011 (査読付)
- ② M. M. Hafizur Rahman, Yukinori Sato, Yasuyuki Miura and Yasushi Inoguchi, "Dynamic Communication Performance of Hierarchical 3D-Torus Network", IASTED, In 10th International Conference Parallel and Distributed Computing and Networks (PDCN 2011), pp. 9-16, Innsbruck, Austria, Feb. 15-17, 2011 (査読付)
- ③ M. M. Hafizur Rahman, Yukinori Sato and Yasushi Inoguchi, "High Performance Hierarchical Torus Network Under Adverse Traffic Patterns", In 13th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT 2010), 6 pages, Ahsanullah University of Science and Technology, Dhaka, Bangladesh, Dec. 23-25, 2010 (査読付)
- ④ M. M. Hafizur Rahman, Yukinori Sato and Yasushi Inoguchi, "Dynamic Communication Performance Enhancement in Hierarchical Torus Network by Selection Algorithm", In 13th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT 2010), 6 pages, Ahsanullah University of Science and Technology, Dhaka, Bangladesh, Dec. 23-25, 2010 (査読付)
- ⑤ Tan Yiyu, Yasushi Inoguchi, Eiko Sugawara, Yukinori Sato, Makoto Ohya, Yukio Iwaya, Hiroshi Matsuoka and Takao Tsuchiya, "A FPGA Implementation of the Two-Dimensional Digital Huygens' Model", Technical Co-sponsord by IEEE, The 2010 International Conference on Field-Programmable Technology (FPT'10), pp. 304-307, Tsinghua University, Beijing, China, Dec. 8-10, 2010 (査読付)
- ⑥ M. M. Hafizur Rahman, Yasushi Inoguchi and Yukinori Sato, "Dynamic

Communication Performance of a Modified Hierarchical 3D-Torus Network under Non-uniform Traffic Patterns”, In 2nd Workshop on Ultra Performance and Dependable Acceleration Systems (UPDAS) held in conjunction with The First International Conference on Networking and Computing (ICNC), pp.167-172, Hiroshima, Japan, Nov. 19, 2010 (査読付)

- ⑦ 荒木 光一, 佐藤 幸紀, V.K. Jain, 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生成システムの性能評価”, 先進的計算基盤システムシンポジウム SACSIS, pp.295-302, 奈良県, Jun. 27-28, 2010 (査読付)
- ⑧ M. M. Hafizur Rahman, Yasushi Inoguchi, Yukinori Sato, Yasuyuki Miura and Susumu Horiguchi, “Dynamic communication performance of a TESH network under the nonuniform traffic patterns”, In 11th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT 2008), pp.365-370, Khulna, Bangladesh, Dec. 12, 2008 (査読付)
- ⑨ M. M. Hafizur Rahman, Yasushi Inoguchi, Yukinori Sato, Yasuyuki Miura and Susumu Horiguchi, “On hot-spot traffic pattern of TESH network”, In 11th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT 2008), pp.359-364, Khulna, Bangladesh, Dec. 12, 2008 (査読付)
- ⑩ 荒木 光一, 佐藤 幸紀, 井口 寧, “マルチコンテキスト型リコンフィギャラブルプロセッサにおけるデータ並列タスクの処理法”, 信学技法 RECONF2008-41, Vol. 108, No. 300, pp.15-20, 北九州市, Nov. 20, 2008 (査読無)
- ⑪ 荒木 光一, 佐藤 幸紀, 井口 寧, “動的再構成デバイスにおけるデータ I/O と処理のオーバーラップを用いた処理法”, 先進的計算基盤システムシンポジウム SACSIS, pp.55-56, 茨城県, Jun. 11-12, 2008 (査読付)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :

出願年月日 :  
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

[その他]  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

井口 寧 (INOUCHI 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・准教授  
研究者番号 : 90293406

### (2) 研究分担者

佐藤 幸紀 (YUKINORI SATO)  
北陸先端科学技術大学院大学・情報科学センター・助教  
研究者番号 : 30452113

### (3) 連携研究者

福士 将 (FUKUSHI MASARU)  
東北大学・情報科学研究科・助教  
研究者番号 : 50345659