

Coiflets と Symlets フィルタによる音響電子透かし

伊藤世紀 姜 玄浩 岩村恵市

東京理科大学工学部第一部電気工学科
125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1

itou@sec.ee.kagu.tus.ac.jp, {kang, iwamura}@ee.kagu.tus.ac.jp

あらまし 近年、様々な電子透かし手法が提案されており、その中でも信号の周波数領域を利用して電子透かしを埋め込む手法は、品質、攻撃耐性の面で有効であるため、よく用いられている。離散ウェーブレット変換は周波数変換の一つであり、この変換を利用した電子透かし手法も提案されている。本研究では、離散ウェーブレット変換時に利用されるウェーブレットフィルタの種類による結果の違いに注目し、それを利用した新しい音響電子透かし手法を提案する。また電子透かしの評価を行う情報ハイディング及びその評価委員会の定める基準のもと、提案手法が基準を満たすことができた実験結果を示す。

Audio Watermarking Using Relation of Coiflets and Symlets Filter

Toshiki Ito Hyunho Kang Keiichi Iwamura

Tokyo University of Science.
6-3-1 Nijuku, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585, JAPAN
itou@sec.ee.kagu.tus.ac.jp, {kang, iwamura}@ee.kagu.tus.ac.jp

Abstract Various digital watermarking methods have recently been developed. Among them, the frequency component is often used in watermark embedding. The discrete wavelet transform is a general frequency conversion technique that has been adopted in some watermarking methods. We found that different wavelet filters provide different watermarking performances based on the wavelet transform. In recent years, the Information Hiding and its Criteria for evaluation (IHC) Committee of Japan has developed evaluation criteria for information hiding. In this study, we developed a new audio watermarking method that satisfies the IHC evaluation criteria.

1 はじめに

IT社会の拡大に伴い、画像や動画、音楽などのデジタルコンテンツ化が広まり、保存や配信が容易になった。しかし、その一方でコンテンツの不正利用が問題となり、著作権を保護する技術が必要となった。電子透かし技術はコンテンツに対して人に知覚できないように情報を

埋め込む技術で、著作権侵害の対策としても用いられている。電子透かしの手法として、周波数領域を用いて情報を埋め込むことは品質、攻撃耐性面で有効であり、これまでに様々な手法が提案されている [1, 2, 3, 4, 5, 6]。離散ウェーブレット変換は周波数変換の一つであり、信号を高周波成分と低周波成分に分割するもので、

この変換を用いた電子透かし手法も提案されている [7]。離散ウェーブレット変換では、2つのバンドパスフィルタを用いてフィルタリングを行う。その際利用されるフィルタはイングリット・ドブシーが提案したものをはじめ、様々なものがあり、その種類によって処理の結果が異なる。本論文では、このフィルタによる結果の違いに注目した新しい音響電子透かしを提案する。また、情報ハイディング及びその評価委員会（IHC委員会）[8]では、毎年電子透かしの評価基準を定め、コンテストが行われている。本研究では上記の手法を用いて第4回のIHC基準を満たす電子透かしを開発した。以降、2章ではIHC委員会の基準について説明する。3章では提案手法について説明する。4章ではIHC基準を満たす実験結果を示し、5章でまとめとする。

2 IHC 基準概要

IHC基準では埋め込みに使用する音源、埋め込まれるビット、音質の最低基準、行われる攻撃及びその条件下での最低ビットエラー率が定められている。使用する音源は60秒、ステレオ、44,100kHzのSQAM音源8種類である。埋め込まれるビット数は60秒に360ビットである。IHC委員会では音質評価の指標として、客観音質劣化度合（ODG）を採用しており、現在の基準ではオリジナルの信号と電子透かしを埋め込んだ信号とのODGの最低値が-2.5、オリジナルと埋め込んだ信号をMP3圧縮復元した信号とのODGの平均値の最低値が-2.0と設定されている。攻撃耐性の評価として、IHC委員会では必須攻撃としてMP3圧縮復元、DA/AD変換を行う、それに加えて7種類の攻撃処理から3つを選択して攻撃を行い、そのうえで60秒の信号からランダムに45秒を切り取りその中の180ビットを検出する。この条件でビットエラー率の最低値を10%以下に抑えなければならない。

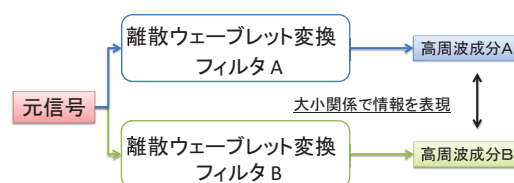


図 1: 提案手法概要

3 提案手法

本手法では、電子透かしは離散ウェーブレット変換によって得られた信号の周波数領域を利用して埋め込まれる。1章で述べたとおり、離散ウェーブレット変換は使用するフィルタの種類を変えることで異なる結果が得られる。そこで、本手法では、図1のように、1つの信号に対して2種類のフィルタを用いて変換を行い、その結果の違いの大小関係を利用して電子透かしを埋め込む。ここで、電子透かしの埋め込みは品質を考慮して、人間の聴覚の特性上、変化が知覚しづらい高周波領域を用いる。

3.1 離散ウェーブレット変換

離散ウェーブレットは一般的な周波数変換の一つである。フーリエ変換やコサイン変換に比べてウェーブレット変換は時間情報を残して変換できるという特性を持つ。時間領域信号 $X = \{x(t), 1 \leq t \leq M\}$ に離散ウェーブレット変換を行うことで、信号の高周波を表す係数 $Wc = \{w(T), 1 \leq T \leq (M-1)/2 + L/2\}$ と低周波成分を表す係数 $Sc = \{s(T), 1 \leq T \leq (M-1)/2 + L/2\}$ が得られる。ここで、 M は信号の長さ、 L は使用したローパスフィルタ $F_L = \{f_L(k), 1 \leq k \leq L\}$ とハイパスフィルタ $F_H = \{f_H(k), 1 \leq k \leq L\}$ の長さを表している。本研究では、離散ウェーブレット変換として、MatlabのWavelet Toolbox [9]の関数を利用した。この関数では、使用するフィルタの種類と長さを指定することが出来る。

3.2 フィルタの特性

離散ウェーブレット変換で使用される2つのフィルタは、フィルタの値の総和が0であり、正規直交性を持つという特性を持つ。また、ハイパスフィルタとローパスフィルタには式(1)のような関係がある。

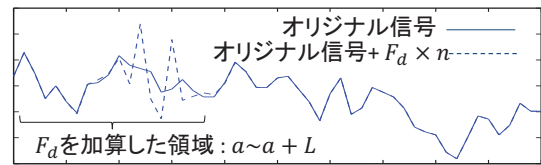
$$f_H(k) = (-1)^{k-1} f_L(L - k + 1), k = 1, 2, \dots, L \quad (1)$$

これらの条件を満たし、よく変換に用いられるフィルタの例として Haar フィルタや Daubechies フィルタがある。Matlab の Wavelet Toolbox にはこれらを含む様々なフィルタが利用できる。

3.3 係数の調整法

図1で示したように、2つのフィルタから得られた2つの高周波係数 W_{c1} 、 W_{c2} の大小関係を利用して電子透かしを埋め込むためには、情報に合わせて大小関係を変化させる必要がある。しかし、離散ウェーブレット変換の後、一方の高周波係数を変化させ、逆離散ウェーブレット変換を行った場合、もう一方の高周波係数もその影響を受けてしまうため、2つの大小関係が不明瞭になってしまう。そこで、本手法では変換に利用した2つのハイパスフィルタ F_{H1} 、 F_{H2} を用いて、2つの高周波係数を同時に調整する。図2で示すように、2つのハイパスフィルタの差 $F_d = F_{H1} - F_{H2}$ を時間領域信号に直接加算すると、特定の場所において、一方の高周波成分 W_{c1} は一定量増加し、もう一方の高周波成分 W_{c2} は一定量減少する。その結果、図2のように特定の場所の2つの高周波成分の差 $W_{cd} = W_{c1} - W_{c2}$ を α だけ変化させることが出来る。変化する場所はフィルタの長さを L とし、 F_d を時間領域信号 $x(a)$ から $x(a+L)$, $1 \leq a \leq M - L$ に加算した場合、高周波係数上の $(a+L)/2$ で表される。 W_{cd} の変化量 α は2つのフィルタの差 F_d すなわちフィルタの組み合わせによって異なり、また加算する際に F_d を n 倍にすることで、変化量は $\alpha \times n$ になる。埋め込みを行う際は、事前に使用するフィルタの組み合わせによる変化量 α がいくらになるか調べておく。

(A) 時間領域信号



(B) 高周波成分の差 W_{cd}

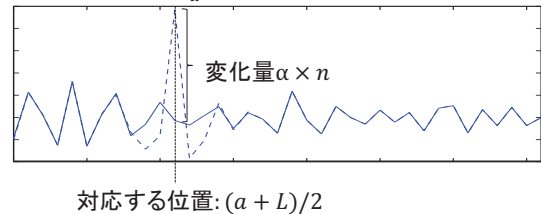


図 2: F_d 加算による高周波成分の調整



図 3: 切り取り攻撃とデータの配置

3.4 同期ずれ攻撃対策

IHC 基準の定める必須攻撃内容にはランダム切り取り攻撃や DA/AD 変換などの同期ずれが起きてしまう攻撃がある。これら2種類の同期ずれ攻撃に対しては別々の対策が必要となる。IHC 委員会が指定した疑似 DA/AD 変換を行うと、音響データの長さが拡張されてしまう。この対策として、検出を行う際にはいくつかのサンプルを削除してオリジナルの長さに戻すことで対応する。ランダム切り取り攻撃に対しては15秒ごとに電子透かしを埋め込む代わりに同期用コードを埋め込むことで対応する。この同期用コード $M_b = \{M_1, M_2, M_3, M_4\}$ は十分に長い M 系列信号からなり、検出側と共有される。15秒ごとに挿入されることで図3のようにどの位置で切り取られたとしても必ず2つ以上の同期用コードを検出することができる。

3.5 埋め込み方法

埋め込み処理において、まずオリジナル信号に2種類のフィルタを用いた離散ウェーブレ

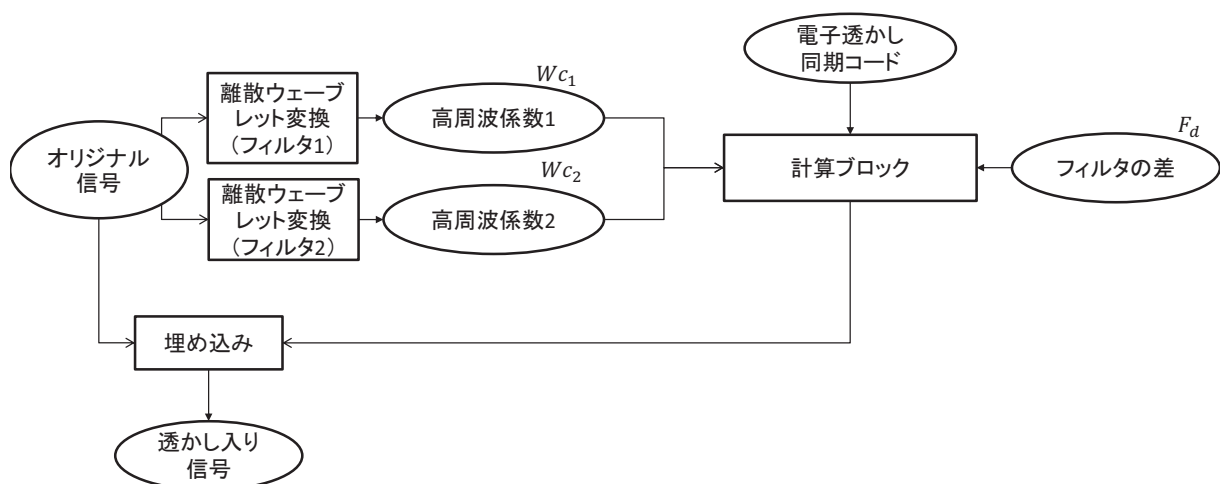


図 4: 提案手法の概要図

ット変換を行い、2種類の高周波成分 $W_{c1} = \{w_1(T), 1 \leq T \leq (M-1)/2 + L/2\}$ と $W_{c2} = \{w_2(T), 1 \leq T \leq (M-1)/2 + L/2\}$ を得る。これら2つの係数の差と埋め込む電子透かしビット及び同期用コードを参照しながら時間領域に加算する2つのフィルタの差 F_d の倍率を決定する。埋め込み処理の概要図は図4のとおりである。計算ブロックでは、まず2つの高周波成分の差 $W_{cd} = \{w_d(T), 1 \leq T \leq (M-1)/2 + L/2\}$ を以下の式より計算する。

$$W_{cd} = W_{c1} - W_{c2} \quad (2)$$

算出した W_{cd} から図5のように、長さ $L/2$ 毎に値を集めたものを $W_{cemb} = \{w_{emb}(s), 1 \leq s \leq ((M-1)/2 + L)/(L/2)\}$ とし、この値を電子透かしの埋め込みに使用する。ここで L はフィルタの長さ、 s は W_{cemb} のインデックスである。 $w_d(T)$ と $w_{emb}(s)$ の関係は以下の式のようにになる。

$$w_{emb}(s) = w_d(sL/2) \quad (3)$$

電子透かしビットと同期用コードは W_{cemb} を利用して表現される。電子透かしビットは図6で示すように1ビットの情報に対して N サンプル分繰り返して埋め込み、検出時には、 $N/2$ 以上のサンプルを検出した方のビットをその領域でのビット情報と判断する。 N は埋め込むビ

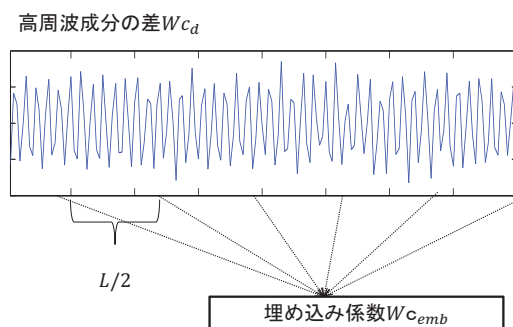


図 5: 埋め込み用係数の選択

ット数とオリジナル信号の長さによって調整する。3.3章で述べたように、 W_{cemb} は使用した2つのハイパスフィルタの差 $F_d = F_{H1} - F_{H2}$ を利用して埋め込む。オリジナル時間領域信号 $X = \{x(t), 1 \leq t \leq M\}$ に対して、埋め込む情報に対応させて F_d の大きさを変えながら加算することで $w_{emb}(s)$ の値を調整する。埋め込み処理は以下の式のように行われ、埋め込み済み信号 $X' = \{x'(t), 1 \leq t \leq M\}$ を得る。

- ビット1を埋め込む場合

$$\text{if } w_{emb}(s) \leq \gamma : x'((s-1)L + j) = x((s-1)L + j) + f_d(j)(\gamma - w_{emb}(s))/\alpha \quad (4)$$

$$(0 \leq j < L)$$

- ビット0を埋め込む場合

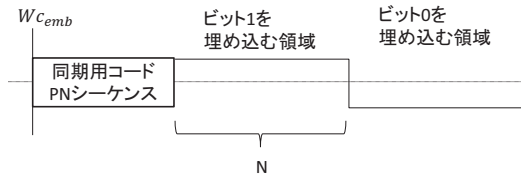


図 6: 埋め込み情報、同期コードの配置

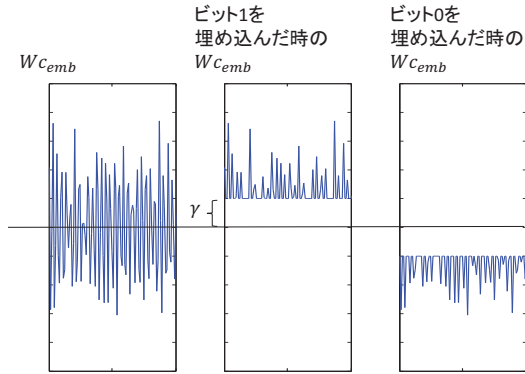


図 7: 埋め込み係数 $w_{emb}(s)$ の変化

$$\text{if } w_{emb}(s) \geq -\gamma : x'((s-1)L+j) = x((s-1)L+j) + f_d(j)(w_{emb}(s) - \gamma)/\alpha \quad (5)$$

$$(0 \leq j < L),$$

ここで、 α は 3.3 章で説明したフィルタによる変化量、 γ は埋め込みの強さを表している。この処理によって、 $w_{emb}(s)$ は図 7 のように変化する。

3.6 検出処理

検出処理では埋め込み済み信号 X' に対して、埋め込み処理で使用した 2 種類のフィルタを用いて離散ウェーブレット変換を行い、2 つの高周波成分 Wc'_1 と Wc'_2 を得る。次に埋め込み処理同様、2 つの高周波成分の差を計算し、埋め込みに使用した係数 Wc'_{emb} を取り出す。 N 回埋め込んだ領域の中で、 $Wc'_{emb} \geq 0$ のサンプル数が $Wc'_{emb} < 0$ より多ければビット 1 を検出し、そうでなければビット 0 を検出する。

3.7 パラメータ決定

この手法は γ を埋め込み強さのパラメータとする。 γ を強く設定すると Wc'_{emb} のビット間の

差が大きくなるため攻撃耐性が増す。一方で、データの変化量が大きくなるため音質は低下してしまう。人間の聴覚の特性上、音響のエネルギーが小さい領域では小さな変化でも知覚できてしまう。対して、エネルギーの大きい領域では小さな変化は知覚しにくい。そこで、埋め込みの際、音響のエネルギーに対応させて γ を設定し、高品質と攻撃耐性の両立を実現する。

4 実験結果

本研究では 3 章で述べた電子透かし手法を MatLab の Wavelet Toolbox を利用して実験を行った。Wavelet Toolbox では、離散ウェーブレット変換に使用するフィルタの種類と長さを設定できる。ここでは、フィルタの長さを 24、使用するフィルタの種類は Symlets フィルタと Coiflets フィルタを使用した。1 ビットの繰り返し回数 N は 200 回に設定した。 γ は IHC 委員会の品質基準と攻撃耐性基準を両立できるように厳密に設定した。

4.1 攻撃耐性評価

本研究では、IHC 委員会の選択攻撃として、ガウス雑音付加、遅延音付加、MP3 連続圧縮複合を選択した。表 1 にそれぞれの攻撃下でのビットエラー率を示す。切り取り攻撃のランダム性を考慮して、各条件 100 回の実験を繰り返し、その平均値を示す。結果、すべての条件でビットエラー率 10 % 以下を達成した。

4.2 音質評価

IHC 委員会の基準では、オリジナル信号と埋め込み済み信号の ODG、オリジナル信号と MP3 圧縮復元を行った信号との ODG を測定する。表 2 に音質評価の結果を示す。結果として埋め込み信号の最低 ODG はトラック 35 の -1.640 であり、MP3 圧縮した信号の平均 ODG は -1.997 となり、IHC 基準を満たす結果を得られた。

表 1: 攻撃項目とビットエラー率 [%]

No	必須攻撃		選択攻撃		
	MP3 圧縮	AD/DA 変換	ガウス雑音	MP3 圧縮二回	遅延音
27	0.560	0.000	0.000	0.556	0.000
32	5.000	3.889	3.900	4.444	4.444
35	0.000	0.556	0.000	0.000	0.000
40	3.890	3.889	3.439	3.889	2.778
65	0.560	0.000	0.217	0.556	0.000
66	0.000	0.556	0.000	0.000	0.000
69	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
70	0.000	0.000	0.094	0.556	0.000

表 2: ODG 値

No	埋め込み信号	MP3 圧縮
27	-0.715	-1.213
32	-1.055	-2.629
35	-1.640	-2.739
40	-0.775	-2.457
65	-1.166	-2.609
66	-0.769	-1.465
69	-0.705	-1.461
70	-0.972	-1.406
最小値	-1.640	-2.739
平均値	-0.975	-1.997

5 まとめ

本論文では、フィルタの違いに着目したウェーブレット変換ベースの音響電子透かしを提案し、IHC 基準に乗っ取って性能評価を行った。結果、埋め込み強さのパラメータを厳密に設定することで最新の IHC 委員会の音質基準を満たすことが出来た。攻撃耐性の評価として、MP3 圧縮復元、DA/AD 変換、ガウス雑音付加、遅延音付加、MP3 二回圧縮とランダム切り取りを行い、電子透かしの検出を行った。結果、すべての条件下で基準を満たすビットエラー率を達成した。今後の展望として、フィルタの組み合わせをより深く吟味し、最適なフィルタを発見することでさらなる性能向上を目指す。

参考文献

- [1] Cox, I.J., Kilian, J., Leighton, F.T., Shamoon, T.: Secure Spread Spectrum: Watermarking for Multimedia. IEEE Transactions on Image Processing. vol. 6, no. 12, (1997).
- [2] Chen, Q., Xiang, S., Luo, X.: Reversible Watermarking for Audio Authentication Based on Integer DCT and Expansion Embedding. IWDW 2012. LNCS 7809, pp. 395–409 (2013).
- [3] Huang, X., Ono, N., Echizen, I., Nishimura, A.: Reversible Audio Information Hiding Based on Integer DCT Coefficients with Adaptive Hiding Locations. IWDW 2013. LNCS 8389, pp. 376–389 (2014).
- [4] Hwai, T.H., Szu, H.C., Ling, Y.H.: Incorporation of Perceptually Energy-Compensated QIM into DWT-DCT Based. Tenth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing pp. 748–752 (2014)
- [5] Ali, A.: A dual transform audio watermarking algorithm. Multimedia Tools and Applications Volume 73, Issue 3, pp 1897–1912 (2014)

- [6] Xinkai, W., Pengjun, W., Peng, Z., Shuzheng, X., Huazhong, Y.: A blind audio watermarking algorithm by logarithmic quantization index modulation. *Multimedia Tools and Applications* Volume 71, Issue 3 , pp 1157-1177 (2014)
- [7] Lei, B., Soon, I.S., Li, Z.: A Robust Audio Watermarking Scheme Based on Lifting Wavelet Transform and Singular Value Decomposition. *IWDW 2011. LNCS 7128*, pp. 86–96 (2012).
- [8] Information Hiding and its Criteria for evaluation <http://www.ieice.org/~emm/ihc/en/>
- [9] MathWorks Wavelet Toolbox <https://mathworks.com/help/wavelet/index.html>.