

オーディオ信号の低ビットレート分析 / 合成符号化[†]

小館 亮之 ホルガー ヘッセ* ベルント エドラー*

早稲田大学 大学院理工学研究科、ハノーバー大学 TNT 研究所*

〒169 東京都新宿区大久保 3-4-1

本稿では、MPEG4において検討されている低ビットレートオーディオ符号化の一手法として、分析 / 合成符号化法を提案し、その概念について述べる。提案する方式は、パラメータベース符号化であり、高压縮符号化及びピッチコントロール、スピードコントロールなどの機能を備える。入力信号から最も顕著だと推定される音の推定を行ない、その基本周波数を抽出し、基本周波数と倍音の振幅値を符号化パラメータとする方式について検討した。基本周波数の抽出には定 Q 変換を用い、振幅値の近似にはフーリエ級数を利用し、モノラルの入力信号を 6 kbps 程度での符号化を実現する符号化器の設計を行なった。シミュレーション実験の結果、単独の楽器からなる信号については、おおむね 4 kbps 程度のビットレートでもある程度の品質に達することができ、提案手法の基本的な有効性を確認した。

A Study on Analysis/Synthesis Audio Signal Coder for Low Bit Rate Transmission[†]

Akihisa KODATE Holger HESSE* Bernd EDLER *

Graduate School of Science and Engineering, WASEDA University

Institut für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung, Universität Hannover*

3-4-1 Ohkubo Shinjuku-ku, Tokyo, 169 JAPAN

Email:akikod@tom.comm.waseda.ac.jp

In this paper, we propose an Analysis/Synthesis Audio Signal Coder to enable very low bit rate coding at around 6 kbps, which is a target of MPEG4. This proposed coder has also accompanying functions such as pitch control and speed control. We have designed a coder whose parameters are single fundamental frequency and its overtone amplitude by using constant-Q Transform for the fundamental frequency estimation and Fourier Series to approximate the parameters in order to realize the target bit rate. Through simulation experiments, we achieved about 4 kbps for test signals played by a single musical instrument and convinced its basic applicability of the proposed method.

[†]本研究は、ハノーバー大学 TNT 研究所の研究プロジェクトの一部である。

□ オーディオ信号の低ビットレート分析 / 合成符号化

1. はじめに

近年、急速に普及しつつある自動車電話や携帯電話のみならず、将来実現が期待される高品質移動体マルチメディア通信において、音声のみならず、音楽信号も対象とした高能率オーディオ符号化技術がますます重要なものになりつつある⁽¹⁾⁽²⁾。高能率オーディオ符号化方式のアプリケーションは、前述の移動体マルチメディア通信の他、INTERNETを介したラジオ番組の放送、Audio on Demandなども挙げられ、ユーザの使用する環境(ISDN、アナログ電話回線+モデム)によって異なる伝送速度に対処するべく、従来のMPEG符号化においても、異なる伝送速度の標準化がなされている⁽³⁾。このように、高能率オーディオ符号化とは、単に低伝送レート=高圧縮を実現するだけでなく、ある種の機能を備えたものが望まれる。それらは、例えば、再生時のスピードコントロール、ピッチコントロール、ビットレート/品質スケーラビリティ⁽⁴⁾であり、現在、この分野の国際標準化作業を推し進めているMPEG4研究グループにおいても、これらの機能をサポートするものが求められている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。MPEG4研究グループにおいて、符号化伝送レート6kbps~16kbpsをターゲットとして活動がなされている。本稿では、このうちの6kbpsを一応の伝送レートの目標として、これまで音情報処理の分野において検討してきた音源分離、基本周波数抽出、音合成等の技術⁽⁷⁾を導入してサウンド信号の分析/合成符号化の一手法について、基礎的な検討を行なった結果について報告する。

2. 提案手法の基本概念

人は、演奏される音階とその楽器が分かれば、既知の楽器については、その楽音を想像することができる。また、音声情報は、話者の持つ特徴と発話内容とに情報の意味を分類できる。この2種類の情報の分類・認識する技術が、話者認識や音声認識である。オーディオ信号の場合、話者認識が楽器認識に、音声認識が音階認識に該当する。この音階情報と楽器情報との抽出技術は、極低ビットレートでのオーディオ信号符号化への利用性は高い。そこで、入力信号から、音源を抽出・分離し、各音源の特徴を取り出して、符号化することを目指す。

2.1 提案方式の概要

提案手法では、送信側では、全信号や分割された帯域の信号を送信する代わりに、入力信号を構造的に解析し、パラメータを抽出し、量子化・符号化を行ない、受信側では、受信信号を復号し、合成す

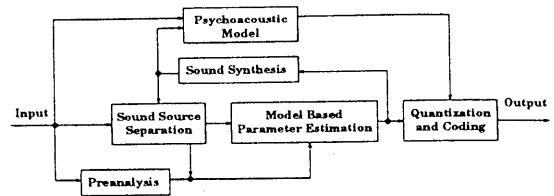


図1：分析 / 合成符号化器ブロック図

る。本手法の基本処理ブロック図を図1に示す。以下各ユニットの処理の概略について述べる。

●信号分離部分

送信されるパラメータによって、異なる合成手法が適用されるため、入力信号は、各部分ごとに、それぞれの合成手法に応じた処理を行うため分離される。

●モデル依存パラメータ推定部分

最適な合成手法に依存した符号化パラメータの推定がなされる。信号分離部分とこのモデル依存パラメータ推定部分は、いわば、入力信号から符号化パラメータを抽出する信号分析部分と位置付けられる。合成部分で、合成される合成信号をフィードバックすることで、次なるパラメータの抽出・推定が行なわれる。信号の分離・パラメータ推定部分には、予備解析部分からパラメータが与えられる。

●量子化 / 符号化部分

●心理聴覚モデル

合成功能パラメータの相関性に着目して、量子化/符号化部分の制御を行なう。具体的には、与えられた入力信号によって生じるマスキング効果の閾値を計算する⁽⁸⁾。ここでは、既に抽出されたパラメータによる合成信号によるマスキングの影響を計算し、合成信号によってマスクされていない範囲の“最も重要な”要素を残差信号から抽出する。

●前処理部分

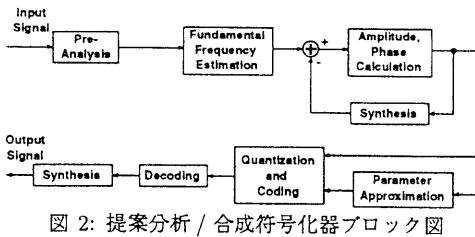
合成手法と独立に、入力信号からパラメータ情報を抽出する。

2.2 本手法の特徴

本手法は、以下の機能への拡張性を有する。

●スピードコントロール

上述したように、提案手法では、伝送パラメータとして、その周波数成分と振幅、位相が計算されるが、人間の聴覚システムは、位相の変化に対して、さほど敏感でないとされているため、基本パラメータとして、ある楽音の始まりのブロック以外は、周波数と振幅情報を基本符号化パラメータとして



伝送され、位相情報は各ブロックの終わりに計算されて、バッファに保存される。つまり、ある一音が連続する範囲内においては、位相の連続性は保たれ、スピードコントロールは、ブロック長を変更することで容易に実現できる。

●ピッチコントロール

ピッチコントロールは、抽出した周波数パラメータを整数倍することで実現できる。

3. 提案符号化アルゴリズム

本手法は⁽⁹⁾、楽音(musical tone: 楽器によって出される音⁽¹⁰⁾)における調音特性に注目し、対象フレームにおける n 番目の音 $T(n)$ は、1つの基本周波数 f_0 とその倍音 $N \times f_0$ によって構成されているという式 1 のモデルに基づいて、1 楽音の再生に必要なパラメータ(基本周波数、及びその倍音の振幅・位相の値)を抽出・符号化し、受信側に伝送する。本手法のブロック図を図 2 に、処理の流れを以下に示す。

$$T(n) = \sum_{l=1}^N a_l(n) \times f_0(n) \sin(\phi_l(n)) \quad (1)$$

1. 予備信号解析

FFT によって入力信号の周波数成分を調査する。ここでは、以下の 2 つの手法について検討する。

●段階的に周波数解像度を上げていく方法

周波数分析における時間解像度と周波数解像度の問題を解決するために、まず時間解像度を優先させ、フーリエ変換を施す。フーリエ変換の結果より、入力成分における顕著な周波数成分の中心周波数 $f_{i,m}$ の位置を大まかに推定する。そして、 $f_{i,m}$ の近傍において、高解像度周波数分析法の適用により、スペクトルの中心周波数成分の精密な推定⁽¹¹⁾を行う。処理ブロック図を図 3 に示す。最初に残差信号スペクトルを、2 選択された FFT スペクトルが 0 とな

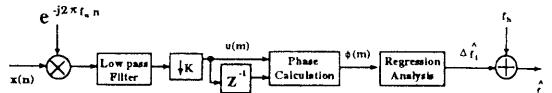


図 3: DFT と線形後退法を用いた周波数解析

るよう、周波数空間においてシフトさせる。この操作によって得られる複素出力は、ローパスフィルタを介した後、ダウンサンプリング処理を行う。線形後退法によって求まる位相の値の傾きより、周波数軸上で差分 Δf_i が算出され、これを中心周波数 $f_{i,m}$ に加えた f_i を推定中心周波数とする。FFT と線形後退法を用いた 2 段階周波数解析の手法に従って、顕著なスペクトルを N 本求める。

●定 Q 変換⁽¹²⁾による対数周波数分析法

定 Q 変換(Constant-Q Transform)は、音楽信号の分析において、フーリエ変換よりも効率的な手法として知られている。定 Q 変換は、特定の周波数成分に対して、特定の解析窓を用意する。例えば、低周波成分の解析には長い解析窓を、高周波成分の解析には、短い解析窓を用意する必要がある。DFT と定 Q 変換の比較を表 1 にあげる。隣接する二つの半音は、周波数軸上において相対的に約 6% の差があり、従って両者の識別には 3% の解像度を必要とする。1 オクターブは、12 の半音から成り立っており、全ての半音の識別には、その倍の 24 のスペクトルを 1 オクターブ当り計算する必要がある。これは、1 オクターブを 24 の帯域に分割する作業であり、1/24 定 Q 変換は、1/24 フィルタバンクに相当する。定 Q 変換は、対数周波数軸における多重解像度解析であり、計算効率上 STFT に劣るが、改良アルゴリズム⁽¹³⁾によって高速計算が可能である。

2. 基本周波数の推定

予備分析手法に応じて異なる方法を用いる。以下、簡単にその概略について述べる。

・DFT と線形後退法による方法

1. 基本周波数(f_0)候補(f_r)の最小値を f_{min} 、最大値を f_{max} (\leq サンプリング周波数/2)として、 $f_{min} \leq f_r \leq f_{max}$ の範囲内で、 f_0 のサーチを開始

2. 各基本周波数候補 f_r について、周波数軸上の $f_r, 2f_r, \dots, n \times f_r$ の周辺に図 4 に示すよう

□ オーディオ信号の低ビットレート分析 / 合成符号化

表 1: 定 Q 変換と短時間フーリエ変換の特性比較

項目	定 Q 変換	STFT
k 番目の周波数成分	$2^{1/24^k} \cdot f_{\min}$	$k\delta f$
解析窓サイズ (W)	$N[k] = \text{標本化周波数} \cdot Q/f_k(\text{可変})$	$N(\text{一定})$
解像度	$f_k/Q(\text{可変})$	標本化周波数 / $N(\text{一定})$
$f_k/\delta f_k$	$= Q(\text{一定})$	$k(\text{可変})$

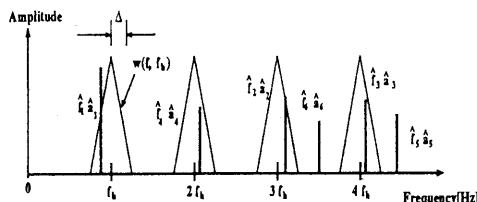


図 4: 基本周波数推定用コスト関数

に、底辺幅 $2 \times \Delta$ の三角形のコスト関数 ($G(f_r)$) を計算する。

$$G(f_r) = \sum_{n=1}^N W \cdot |m \cdot f_r - f_n| \cdot a_n \quad (2)$$

但し、 W は、重み付け関数、 $f_n (n = 1, 2, \dots, N)$ は、抽出された N 本の有意周波数成分であり、次式により決定される。

$$W = \begin{cases} 1 & \text{if } |m_{\min} \cdot f_t - f_n| \leq \Delta \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

3. コスト関数を最大にする f_r を、基本周波数の推定値とする。

・定 Q 変換法による方法

音楽信号を対数周波数軸上にプロットした時に、参照周波数成分と倍音の対数周波数軸上の間隔(オクターブ)が、参照周波数成分の値によらず常に一定であるという調音特性(図 5)を利用する。ここでは、定 Q 変換の結果 $W[n]$ と、新たに定義する関数 $p[n]$ との相互相関関数 $xcorr[m]$ を定義する⁽¹⁴⁾。

$$xcorr[m] = \sum_{n=m}^{N-1} W[n] \cdot p[n-m] \quad (3)$$

但し、

$$p[n] = \begin{cases} 1 & \text{if } n=1, 25, 39, 49, \dots (Q=34) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (0 \leq n \leq N)$$

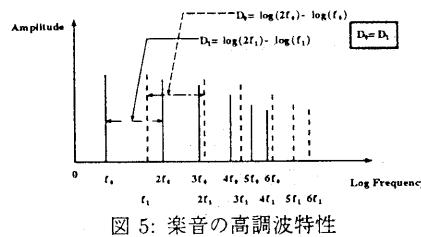


図 5: 楽音の高調波特性

$p[n] = 1$ となる n の間隔が 1 オクターブに相当する。相関関数 $xcorr[m]$ が最大値をとる m_{\max} 番目の周波数成分が基本周波数の最有力候補となる。上記の 2 つの手法による予備実験の結果を示す。(図 6, 7) DFT と線形後退法による方法では、立上りは良好な結果が得られたものの、後半において、1 オクターブ低い音を抽出するいわゆるオクターブエラーが認められる。これに対し、定 Q 変換による方法では、各音の立上り部分を除いては、ほぼ全フレームにおいて良好な結果を得ることができた。

3. 基本周波数及びその倍音の振幅・位相の算出

提案方式 1 と同様の手法で、対応する基本周波数 f_0 の振幅 a_1 、位相 Φ_1 を計算する。抽出されたパラメータによる合成信号を求め、入力信号との差分より残差信号を計算し、統いて 2 倍音(周波数 $2 \times f_0$)の振幅 a_2 、位相 Φ_2 を計算。このパラメータを用いて再び信号を合成し、その残差信号を計算し、これを求める n 倍音まで $n-1$ 回繰り返す。具体的には、振幅と位相は残差信号と周波数 f_i の調波信号の複素相関係数を計算することで求まる。相関係数の絶対値が f_i の振幅 a_i に、argument 関数の値が位相 Φ_i である。

4. 抽出されたパラメータによる合成

上で求めたパラメータによって、以下のサイン波モデルによって、合成波 $x(n)$ を計算する。

$$x(n) = \sum_{l=1}^N a_l(n) \sin(\phi_l(n)) \quad (4)$$

5. 第 n 番目基本周波数の計算

第 $2, \dots, n$ の基本周波数は、残差信号を再び入力信号として、1 ~ 4 の手順を繰り返し、求められる。

6. 振幅パラメータの近似

基本周波数 f_0 と、各振幅の値が符号化パラメー

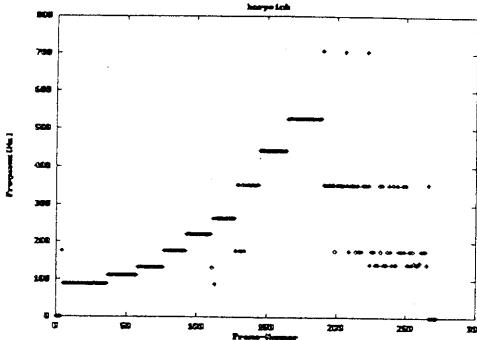


図 6: 基本周波数の推定結果 (DFT と線形後退法)

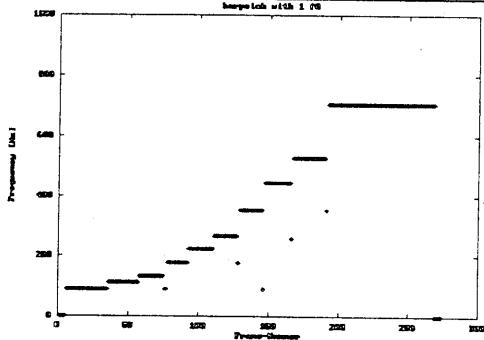


図 7: 基本周波数の推定結果 (定 Q 変換)

タである。3,500 ヘルツ以下を考慮の対象とするとき $f_0 = 111[\text{Hz}]$ の時、倍音の数は 31 となり、伝送レートは平均 10kbit/s 程度となる。そこで、振幅パラメータを近似することを考える。近似手法として、多項式近似の手法も考慮したが、処理が簡単なことから、フーリエ級数を利用した⁽⁹⁾。手順を以下に示す。

1. 振幅値 $X(nf_0), (n = 1, \dots, N)$ の対数値を取り、フーリエ変換を施す。複素フーリエ級数列

$$C(k) = \sum_{m=0}^{N-1} X((m+1)f_0) \times e^{-j2\pi mk/N} \quad (k = 0, 1, \dots, N-1) \quad (5)$$

を得る。 $X(f_0)$ は、実数であり、

$C(k) = C^*(N - k)$ である。つまり、級数列の前半 $C(0), C(1), \dots, C(N/2)$ から、後半の $C(N/2 + 1), \dots, C(N - 1)$ を求めることができるので、伝送に必要なパラメータは級数列の前半の $N/2$ 個となる。

2. $N/2$ 個のパラメータを、 $K (< N/2)$ 個のパラメータで近似する。

$$D(k) = \begin{cases} C(k) & 0 \leq k \leq K \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (k \leq N/2, K < N/2) \quad (6)$$

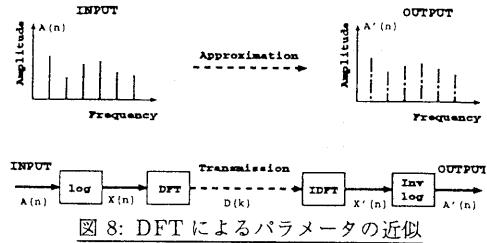


図 8: DFT によるパラメータの近似

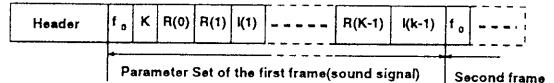


図 9: ビットストリーム構成

$k > N/2$ である k に対して、 $D(k) = D*(N - k)$ であり、 $X(nf_0)$ の近似 $X'(nf_0)$ は、

$$X'(nf_0) = \frac{1}{N} \times \sum_{k=0}^{N-1} D(k) \times e^{j2\pi k(n-1)/N} \quad (7)$$

となる。係数の次数 K を下げるにつれて近似の精度は下がる。復元に必要なパラメータの数は、推定される基本周波数の高さに依存しており、 f_0 が高い場合は、パラメータを近似せずに、そのまま量子化・符号化して伝送する。

7. 量子化・符号化

4. パラメータ数及び各係数の選定

図 9に、本方式のビットストリーム構成を記す。符号化パラメータは、各ブロック当たり、基本周波数、近似の次数、級数の値(第 1 項、第 k 項)(または、振幅値)である。本稿では、符号化レート = 信号全体の平均伝送レートとする。符号化の対象となる 1 ブロックの長さを 0.024[秒 / Block]とした。この時、目標とする 6kbit/s の伝送レートを実現するためには、平均、144 bits/Block の範囲で符号化する必要がある。符号化レートは、1. 基本周波数の値、2. 振幅の近似の次数の両パラメータに左右される。各パラメータの許容値は、表 4 の通りに設定した。次数 K と最大符号レートとの関係を表 3 に示す。各フレームにおいて、量子化の際に、周波数は 1[Hz] 間隔に、級数の値は 0.5 間隔になるように考慮して各パラメータに割り当てたビットは、表 4 の通りである。

表 2: 各パラメータの許容値

パラメータ	最小値	最大値
基本周波数 $f_0 [Hz]$	50	3500
フーリエ級数の次数 K	0	31
フーリエ級数第一項	0	255
$R(0) = C(0)$		
フーリエ級数第 k 項	-64	63
$C(k) = R(k) + jI(k)$		

表 3: 次数 K と最大伝送レートとの関係

フーリエ級数の次数 K	最大伝送レート ($kbit/s$)
2	1.8
4	3.1
6	4.4
8	5.8
10	7.1

表 4: 各パラメータに割り当てたビット数

パラメータ	ビット数 (Bits)
基本周波数	12
フーリエ級数の第一項 $R(0)$	9
フーリエ級数 $R(k), I(k) (k > 0)$	8
フーリエ級数の次数 K	5

5. 符号化シミュレーション実験

テスト信号として標本化周波数 $8kHz$ の、単独の楽器からなる音楽信号 (*clarinet*, *harpsichord*, *trumpet*)、複数の楽器からなる音楽信号 (*haydn*)、単独話者の音声信号 (*german speech*) を用いた符号化実験を行なった。

5.1 基本周波数の推定

図 14、図 15に *clarinet*, *german speech* 信号の基本周波数推定結果を示す。今回は、予備実験の結果より、定 Q 変換による方法を採用した。

5.2 振幅値のフーリエ級数による近似

前述したように、本方式の符号化レートは、フレームの基本周波数の推定結果とフーリエ級数の次数 K に依存する。つまり、低周波の基本周波数が抽出されると、倍音の数が多くなり、伝送パラメータ数は多くなる。図 16、図 17に、ブロック当たりの符号化パラメータの伝送レートを示す。表 5に、各テスト信号の平均伝送レートを示す。

5.3 復号品質について

clarinet, *harpsichord*, *trumpet* 等の単独の楽器によって演奏された信号は、平均レート $4kbit/s$ 付近においても、ある程度の結果が得られた。復号・再合成した信号を原信号と主観的に比較した結果を表 6に示す。

表 5: 入力信号とその符号化レート

入力信号	伝送レート ($kbit/s$)
clarinet	3.42
harpsichord	3.79
trumpet	3.79
german speech	9.04
haydn	4.92

表 6: 復号信号の主観品質評価

サンプル信号	主観品質
clarinet	1 基本周波数 / フレームでも十分。
trumpet	同上
harpsichord	合成音では、音階の変化時に発生する残響が消え、物足りない。
haydn	中間ブロックにおいて顕著なトランペットの音のみが拾われる。
german speech	内容の理解は可能。

5.4 結論

- 単独の楽器からなる信号では、若干歪みが聞き取れるものが、最も顕著なパラメータの抽出は十分なされている。
- オーケストラ信号 (*haydn*) は、その中程の部分において、顕著な主成分であるトランペットの音が抽出され符号化されているため、復号品質は単一の基本周波数を用いた割にはいい印象を受ける。
- 音声信号は、周波数の変動が大きく、また基本周波数が比較的低く、多くの倍音パラメータとして必要とするため、伝送レートは他テスト信号と比較して高くなつた。

6.まとめ

本稿では、低ビットレートサウンド符号化を実現する分析 / 合成符号化法を提案し、その概略について述べた。また、入力信号から、最も顕著だと推定される音を抽出し、その基本周波数と倍音をパラメータとする極低ビットレート符号化器を提案し、定 Q 変換による基本周波数の推定とフーリエ級数によるパラメータ近似法を導入することで、 $6kbps$ 付近の伝送レートを実現する符号化器を設計した。シミュレーション実験の結果、単独の楽器からなる入力信号については、 $4kbps$ 以下の平均符号化レートを実現し、楽器の種類によつては、ある程度の品質の復号信号が得られ、提案方式の有効性を確認し

□ オーディオ信号の低ビットレート分析 / 合成符号化

た。ただ、本手法では、その背景音や、残響が残るような信号については、単独の楽器からなる信号であっても、各ブロックにおける 2 番目以降の周波数成分について検討する必要がある。以下に今後の課題を挙げる。

• 提案方式の改良

オーディオシーン解析技術の利用による第 2, 第 3 の音源に対処する。

- 入力信号の性質と、伝送帯域幅に応じて、符号化器を選択する符号化器選択型についての検討提案手法と予備解析部を共有し、各スペクトラム成分の周波数とその振幅値をパラメータとする符号化法⁽¹⁵⁾及び高压縮音声符号化法との融合を図る。

• 本格的な符号化技術の導入

ブロック内、及びブロック間のパラメータ間の相関関係について検討する。

謝辞

本研究は、ハノーバー大学において行われたものである。本研究の機会を与えて下さった早稲田大学富永英義教授、ハノーバー大学 Musmann 教授に感謝致します。また、定 Q 変換の高速計算プログラムを提供して下さった MIT media Lab. の J. Brown 教授に感謝致します。

参考文献

- [1] 小野 茂: “音声符号化技術の最近の進展”, 日本音響学会誌, **48**, 1, pp. 52–59 (1992).
- [2] M. D. et al.: “Audio Compression for Network Transmission”, 99th Convention of An Audio Engineering Society Preprint, **95**, pp. D-6 (1995).
- [3] M. B. Karlheinz Brandenburg: “Overview of MPEG-Audio: Current and future standards for low bit-rate audio coding”, 99th Convention of An Audio Engineering Society Preprint, **95**, p. Preprint 4130 (1995).
- [4] B. G. K. Brandenburg: “First Ideas on Scalable Audio Coding”, 97th Convention of An Audio Engineering Society Preprint, p. Preprint 3924 (1995).
- [5] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 MPEG94/443: “Requirement for Low Bitrate Audio Coding / MPEG-4 Audio” (1994).
- [6] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11/N999: “MPEG4-Testing and Evaluation Procedures Document” (1995).
- [7] 小坂 直敏: “コンピュータ音楽と音響技術”, 信学技報, **94**, EA94-28, pp. 23–30 (1994).
- [8] C. Ferekidis: “Entwicklung eines Modells der Verdeckungswirkung des menschlichen Gehörs zur Irrelevanzreduktion von Audiosignalen”, Studienarbeit, Institut für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung, Universität Hannover (1993).
- [9] H. Hesse: “Parametrisierung der Spektren von Einzelinstumentalsignalen für den Einsatz in einem Analyse/Synthese-Coder”, Diplomarbeit, Institut für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung, Universität Hannover (1996).
- [10] 三浦種敏 監修: “聴覚と心理”, 電子情報通信学会 (1980).
- [11] S. Kay: “A fast and accurate single frequency estimator”, IEEE Trans on ASSP, **37**, No.12 (1989).
- [12] J. C. Brown: “Calculation of a constant Q spectral transform”, Journal of Acoustical Society of America, **89**, pp. 425–434 (1991).
- [13] M. P. Judith C. Brown: “An efficient Algorithm for the calculation of a constant Q spectral transform”, Journal of Acoustical Society of America, pp. 2698–2701 (1992).
- [14] J. C. Brown: “Musical fundamental frequency tracking using a pattern recognition method”, Journal of Acoustical Society of America, **92**, (1), pp. 1394–1402 (1992).
- [15] B. Edler: “Technical Description of the MPEG-4 Audio Coding Proposal from University Hannover and Deutsche Bundespost Telekom”, ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 MPEG95/0414 (1995).

□ オーディオ信号の低ビットレート分析 / 合成符号化

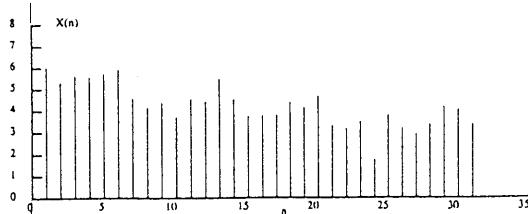


図 10: 次数 K による振幅値の近似 (Original)

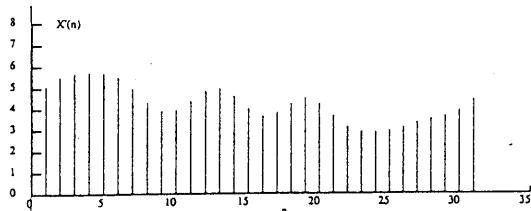


図 11: 次数 K による振幅値の近似 ($K=8$)

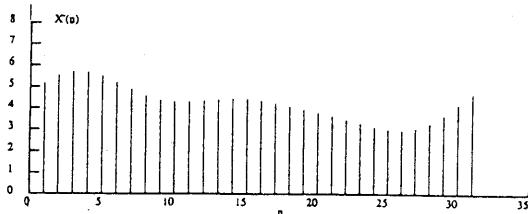


図 12: 次数 K による振幅値の近似 ($K=4$)

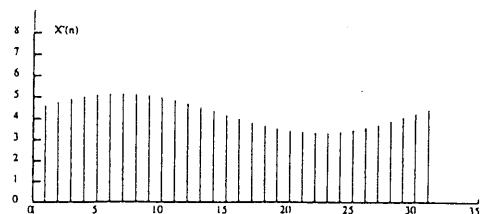


図 13: 次数 K による振幅値の近似 ($K=2$)

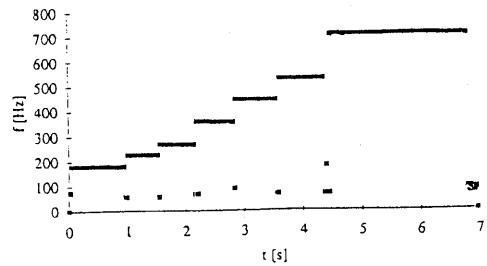


図 14: 基本周波数の推定結果 (clarinet)

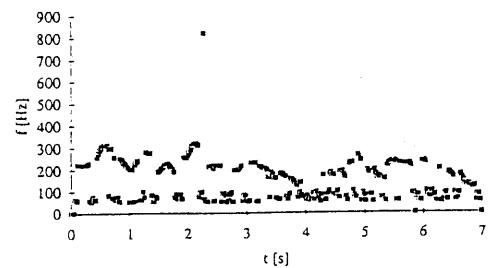


図 15: 基本周波数の推定結果 (speech)

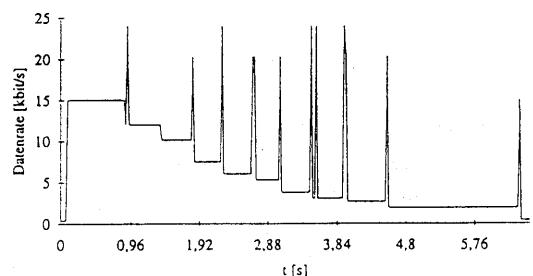


図 16: ブロック当たりの伝送レート (harpsich)

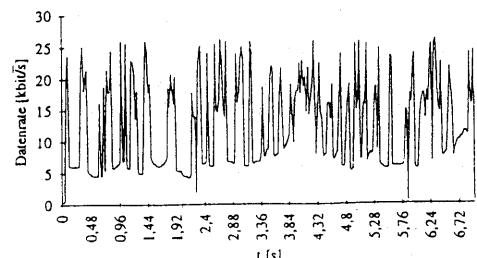


図 17: ブロック当たりの伝送レート (speech)