Decomposition and Reconstruction of Signal in High-Speed Processing Method of Real-Time Spectral Analysis

Hideto Nakatsuji Member (Osaka Prefecture University, nakatsuji@sig.cs.osakafu-u.ac.jp)

Sigeru Omatu Member (Osaka Prefecture University, omatu@cs.osakafu-u.ac.jp)

Keywords: decomposition and reconstruction, time-frequency domain, integral wavelet transform

In recent years, the wavelet transform on the basis of multiresolution analysis has been considered as a concrete algorithm of an integral wavelet transform which performs a spectral analysis in time-frequency domain. On the other hand, authors proposed a new analyzing method to obtain the spectrums by using the inner products of a signal and the cutting out waves which consist of sin and cosine wave. In the proposed method, the inner products are updated by using a new input data only and the spectrums are obtained. The new method proposes analysis approach 1(AA1) which is a fundamental analysis method, and analysis approach 2(AA2) which is an analysis method that achieves high-speed processing. Decomposition and reconstruction of a signal based on AA1 was already proposed by the authors. This paper shows decomposition and reconstruction of a signal based on AA2.

Although the inner products become the decomposition waves in AA1, these do not become the decomposition waves in AA2. So in order to obtain the decomposition waves in AA2, a certain mathematical processing is needed. Here, sampling interval is T_s , and angular frequency of a cutting out wave is λ , and number of data in the cutting out wave is N . The cutting out wave is expressed as follow.

$$\begin{aligned} s(l) &= \sin(\lambda l T_s) & c(l) &= \cos(\lambda l T_s) \\ s(-l) &= -s(l) & c(-l) &= c(l) \\ l &= 1, \dots, N \end{aligned}$$

We express the inner product at time k as Y_s^k and Y_c^k . Y_s^k is the inner product of which the cutting out wave is sine wave and Y_c^k is the inner product of which the cutting out wave is cosine wave. The mathematical processing to obtain the decomposition wave in AA2 is shown as follow.

Step1. Calculate inner the products Y_s^k and Y_c^k at time k .

Step2. Perform the following calculation by using the inner products Y_s^k , Y_c^k and the cutting out wave $s(k)$, $c(k)$.

$$\begin{aligned} Y_{ss}^k &= Y_s^k s_l(k) & Y_{sc}^k &= Y_s^k c_l(k) \\ Y_{cc}^k &= Y_c^k c_l(k) & Y_{cs}^k &= Y_c^k s_l(k) \end{aligned}$$

Fig. 1. The waveform of Japanese vocal sound /i/ and the waves which constitute vocal sound /i/ and the reconstruction waves

Step3. Calculate next summation and difference.

$$\begin{aligned} Y_{cout}^k &= Y_{ss}^k + Y_{cc}^k \\ Y_{sout}^k &= Y_{sc}^k - Y_{cs}^k \end{aligned}$$

Y_{sout}^k is the inner product of which the cutting out wave is sine wave and Y_{cout}^k is the inner product of which the cutting out wave is cosine wave.

Step4. Replace k with $k + 1$ and repeat step1-step4.

By the Processing, the Y_{cout}^k and Y_{sout}^k obtained in step3 is identical to the decomposition wave in AA1. Therefore, the decomposition and reconstruction of the signal in AA2 result in the decomposition and reconstruction of the signal in AA1. As an example of a numerical analysis, we show decomposition and reconstruction of Japanese vocal sound /i/. In Fig.1, No1 reconstruction wave is a wave pattern of the vocal sound /i/, but No2 reconstruction wave is not the wave pattern of it.

リアルタイムスペクトル解析の高速処理法における 信号の分解と再構成

正員 中辻 秀人* 正員 大松 繁**

Decomposition and Reconstruction of Signal in High-Speed Processing Method of Real-Time Spectral Analysis

Hidetoshi Nakatsuji*, Member, Sigeru Omatu**, Member

In recent years, the wavelet transform on the basis of multiresolution analysis has been considered as a concrete algorithm of an integral wavelet transform which performs a spectral analysis in time-frequency domain. On the other hand, authors have proposed a new analyzing method which updates the spectrum by using an input data only. The new method proposes analysis approach 1(AA1) which is a fundamental analysis method, and analysis approach 2(AA2) which is an analysis method that achieves high-speed processing. Decomposition and reconstruction of a signal based on AA1 was already proposed by the authors. This paper shows decomposition and reconstruction of a signal based on AA2. The decomposition wave in AA2 can not be obtained by the same method as in the case of AA1 but by a mathematical processing. By the processing, the decomposition wave in AA2 is identical to the decomposition wave in AA1. Therefore, the decomposition and the reconstruction of the signal in AA2 result in the decomposition and the reconstruction of the signal in AA1. As an example of a numerical analysis, we show decomposition and reconstruction of Japanese vocal sound /i/.

キーワード：分解と再構成，時間周波数領域，積分ウェーブレット変換

Keywords: decomposition and reconstruction, time-frequency domain, integral wavelet transform

1. はじめに

近年，信号の時間周波数領域での解析法としてウェーブレット変換が注目されている。これに対して，著者らは T （自然数）周期分の正弦波および余弦波（以下，切り出し波と呼ぶ）と信号との内積を用いた時間周波数領域の解析法を提案した⁽⁴⁾。以下では T を周期数と呼ぶ。切り出し波の長さは矩形窓を有する窓フーリエ変換の窓の幅であり，これが一定になるように周期数 T を変化させるとフーリエ解析となる。周期数 T を一定にすると切り出し波の長さ（窓の幅）は周波数に反比例して変化する。すなわち，周波数が高くなると切り出し波の長さは短くなり，低くなると長くなる。これはウェーブレットのスケールが周波数に応じて

変化する機能と同じである。このように提案解析法はフーリエ解析として，また積分ウェーブレット変換として用いることができる。提案解析法は音声信号のように短い時間隔でデータが次々に入ってくるような信号をリアルタイムに処理することを考慮して考案されたものであり，よって新しく入力されたデータのみを用いてスペクトル等を更新する手法となっている。更新の手法として解析1と演算量を大幅に低減して高速処理を実現する解析2の二つの解析法がある。時間周波数領域での解析において，ウェーブレット変換では信号の分解，再構成が示されており，短時間フーリエ変換では窓が重なっているため，再構成は一意的に決まらないが，幾つか考察されている⁽¹⁾。短時間フーリエ変換による解析と提案解析法による解析の違いは窓の幅が周波数に応じて変化することであり，短時間フーリエ変換の場合と同様に，提案解析法においても信号の分解と再構成の手法がある。解析1にもとづいた信号の分解と再構成は，すでに著者らによって示された⁽⁵⁾。解析1では切り出し波と信号との内積が分解波になることを示したが，解析2においては，この内積は分解波にならない。そこで，本論文では，この内積に数学的処理を施すことにより得ら

* 大阪府立大学工学部
599-8531 堺市中区学園町 1-1
Department of Engineering, Osaka Prefecture University
1-1 Gakuen, Nakaku, Sakai City, Osaka 599-8531

** 大阪府立大学大学院工学研究科
599-8531 堺市中区学園町 1-1
Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University
1-1 Gakuen, Nakaku, Sakai City, Osaka 599-8531

れる波が解析 1 における分解波と同じになることを示し、もって解析 2 の信号の分解と再構成は解析 1 の信号の分解と再構成の問題に帰着することを示す。解析 2 を用いた数値解析例として、日本語音声/i/が基本波、高調波および高周波数の波で表されることを示す。また、これらの波を加えた再構成波で wave ファイルを作成し、これを再生して聞くことにより、音声/i/を特徴付けているパターンを明らかにすることで、提案解析法による信号の分解と再構成の有用性を示す。

2. 解析 2 の概要

サンプリング間隔を T_s 、切り出し波の設定周波数を f_j (角周波数 $\lambda_j = 2\pi f_j$) とする。ここで、 $j(=1, 2, \dots, n)$ は切り出し波の番号で、 n は切り出し波の数である。切り出し波の長さ $q_j (= T/f_j)$ の中に含まれるデータ数を N_j とすると、切り出し波は、つぎのように表されるとともに、以下に示す関係が成立する。

$$\begin{aligned} s_j(l) &= \sin(\lambda_j l T_s) & c_j(l) &= \cos(\lambda_j l T_s) \\ s_j(-l) &= -s_j(l) & c_j(-l) &= c_j(l) \\ s_j(k + N_j) &= s_j(k) & c_j(k + N_j) &= c_j(k) \dots (1) \\ k; \text{natural number} \quad l &= 1, \dots, N_j \end{aligned}$$

提案解析法は切り出し波と信号との内積を計算して設定周波数 f_j に近い信号成分を検出するものである。解析 2 は、切り出し波として正弦波と余弦波を同時に用いて、時間の推移とともに切り出し波の位相も変化させつつ、内積の計算を新しく入力された 1 個のデータのみを用いた更新により実施することで、演算量の低減を図るものである。切り出し波が余弦波の場合も同様に展開できるので、ここでは正弦波の場合について示す。時刻 kT_s における信号を $x(k)$ とし、過去に遡った信号を用いて、内積をつぎのように表す。

$$Y_s^k(j) = \frac{2}{N_j} \sum_{l=1}^{N_j} x(k-l) s_j(l-k) \dots (2)$$

時刻 $(k+1)T_s$ の時の内積は、つぎのように表される。

$$\begin{aligned} Y_s^{k+1}(j) &= \frac{2}{N_j} \sum_{l=1}^{N_j} x(k+1-l) s_j(l-k-1) \\ &= \frac{2}{N_j} x(k) s_j(-k) + Y_s^k(j) \\ &\quad - \frac{2}{N_j} x(k-N_j) s_j(N_j-k) \dots (3) \end{aligned}$$

(3) 式の右辺第 2 項と第 3 項は既に計算されたものであり、(3) 式の計算に必要な計算は第 1 項の掛け算 1 回だけとなる。すなわち、時刻 $(k+1)T_s$ での内積は時刻 kT_s での内積から (3) 式の右辺第 3 項を引いて第 1 項を加えるという更新演算によって行うことができる。(3) 式において $N_j - k = 0$ の場合、(3) 式の右辺第 3 項の $s_j(N_j - k)$ は $s_j(0)$ となるが、(1) 式より、これは $s_j(N_j)$ となる。切り出し波が余弦

波の場合も、同様に更新によって内積 $Y_c^k(j)$ を計算する。このようにして求めた $Y_s^k(j)$ と $Y_c^k(j)$ を用いて

$$Y_{out}^k(j) = \sqrt{Y_s^k(j)^2 + Y_c^k(j)^2} \dots (4)$$

を計算する。 $Y_{out}^k(j)$ は、特定の周波数 f_j に近い周波数を有する信号を検出するユニットであり、以下では、このユニットを聴覚細胞と呼ぶこととする。上述より解析 2 では内積 $Y_s^k(j)$ 、 $Y_c^k(j)$ の式の数はいずれも各 1 個であるが、解析 1 では切り出し波が繰り返す周期数の中のデータ数だけ式の数がある。低い設定周波数の聴覚細胞では 1 周期の中のデータ数が多いため、1 周期で繰り返すようにしながら設定周波数を概ね一定の比率で増加させることができる。たとえばサンプリング周波数が 44.1kHz、周期数 $T(=2^4)$ で設定周波数を約 1.5 % で増加させる場合、設定周波数が 10Hz の聴覚細胞では 1 周期 (0.1 秒) の中のデータ数は 4,410 個であり、つぎの聴覚細胞の設定周波数を約 1.5 % 増加させるため、1 周期の中のデータ数を 4,345 個とすると、10.1496Hz となり、増加率は 1.496 % となって、約 1.5 % の増加と見做せる。解析 2 では式の数はいずれも 1 個であるから、この場合、演算量はそれぞれ 1/4,410 倍、1/4,345 倍となる。設定周波数が高くなると 1 周期の中のデータ数が小さくなって、約 1.5 % の増加率と見做せなくなる。たとえば、設定周波数が 900Hz では 1 周期の中のデータ数は 49 個であり、1 個減らして 48 個にすると設定周波数は 918.75Hz となって、増加率は 2.08 % になる。これでは約 1.5 % とは見做せない。よって 1 周期で繰り返すのではなく複数周期で繰り返すようにする必要がある。周期数 $T(=2^4)$ であるので、1 周期の中のデータ数が小さくなって約 1.5 % の増加が困難になったら 2 周期で繰り返すようにし、それでも困難になったら 4 周期で、さらに 8 周期、最大で T 周期で繰り返すようにする。解析 1 ではこの繰り返す周期数の中のデータ数だけ式の数があるから、解析 2 は解析 1 に比べて各聴覚細胞での演算量が 1/(式の数) となる。

切り出し波の数 n は聴覚細胞の数であり、解析 2 では内積の更新に必要な掛け算回数は $2n$ 回である。また各聴覚細胞および内積 $Y_s^k(j)$ 、 $Y_c^k(j)$ の計算は独立していることから並列処理が可能であり、並列処理を導入した場合、更新に必要な掛け算回数は 1 回になる。

3. 聴覚細胞の信号検出範囲

切り出し波の長さ $q_j (= T/f_j)$ の中には周波数 f_j の波が T 周期分存在する。 q_j の中で $T+1$ 周期分となる信号の周波数は $f_j + f_j/T$ であり、この聴覚細胞はこの信号を検出できない。同様に周波数 $f_j - f_j/T$ の信号も検出できない。この聴覚細胞の信号検出幅を B とすると、 $B = 2f_j/T$ となる。これは周波数幅 B と切り出し波の長さ T/f_j で作られる面積が一定の $2 (= BT/f_j)$ であることを示している。 T を一定にすると B/f_j も一定になる。すなわち設定周波数が高くなると B も大きくなるのである。

4. 信号の分解

〈4・1〉 解析 2 における内積と連続系での表現 信号の角周波数を ω_i , 振幅を A_i , 位相を ϕ_i とする。ここで, $i(=1, 2, \dots, m)$ は信号成分の番号で, m は信号成分の数である。時刻 kT_s から遡った過去の信号を, つぎのように表す。

$$x_i(k-l) = A_i \sin(\omega_i(k-l)T_s + \phi_i) \dots \dots \dots (5)$$

(1) 式の 2 番目の関係を用いて, 時刻 kT_s での内積を再度書き表す。

$$Y_s^k(i, j) = -\frac{2}{N_j} \sum_{l=1}^{N_j} x_i(k-l)s_j(k-l)$$

$$Y_c^k(i, j) = \frac{2}{N_j} \sum_{l=1}^{N_j} x_i(k-l)c_j(k-l) \dots \dots \dots (6)$$

はじめに, (6) 式の第 1 式について展開する。(1) 式の $s_j(l)$ と (5) 式を用いると, つぎのように表される。

$$Y_s^k(i, j) = -\frac{2}{N_j} A_i \sum_{l=1}^{N_j} \sin(\omega_i(k-l)T_s + \phi_i) \sin(\lambda_j(k-l)T_s)$$

$$= -\frac{2}{N_j} A_i \left\{ \cos(\phi_i) \sum_{j=1}^{N_j} \sin(\omega_i(k-l)T_s) \sin(\lambda_j(k-l)T_s) \right.$$

$$\left. + \sin(\phi_i) \sum_{l=1}^{N_j} \cos(\omega_i(k-l)T_s) \sin(\lambda_j(k-l)T_s) \right\}$$

$$\dots \dots \dots (7)$$

ここで, $t = kT_s$, $\tau = lT_s$ とおき, $N_j = q_j/T_s$, $q_j = T/f_j$ の関係を用いると, つぎのように表される。

$$Y_s^k(i, j) = -\frac{2f_j}{T} A_i \cos(\phi_i) \sum_{l=1}^{N_j} \sin(\omega_i(t-\tau)) \sin(\lambda_j(t-\tau)) T_s$$

$$- \frac{2f_j}{T} A_i \sin(\phi_i) \sum_{l=1}^{N_j} \cos(\omega_i(t-\tau)) \sin(\lambda_j(t-\tau)) T_s$$

$$\dots \dots \dots (8)$$

ここで, T_s を無限小にすると

$$\hat{Y}_s(i, j, t) = -\frac{2f_j}{T} A_i \cos(\phi_i) \int_0^{q_j} \sin(\omega_i(t-\tau)) \sin(\lambda_j(t-\tau)) d\tau$$

$$- \frac{2f_j}{T} A_i \sin(\phi_i) \int_0^{q_j} \cos(\omega_i(t-\tau)) \sin(\lambda_j(t-\tau)) d\tau$$

$$\dots \dots \dots (9)$$

と表される。同様に (6) 式の第 2 式は, つぎのように表される。

$$\hat{Y}_c(i, j, t) = \frac{2f_j}{T} A_i \cos(\phi_i) \int_0^{q_j} \sin(\omega_i(t-\tau)) \cos(\lambda_j(t-\tau)) d\tau$$

$$+ \frac{2f_j}{T} A_i \sin(\phi_i) \int_0^{q_j} \cos(\omega_i(t-\tau)) \cos(\lambda_j(t-\tau)) d\tau$$

$$\dots \dots \dots (10)$$

内積を表す (6) 式と積分で表された (9) 式, (10) 式は本質的に同じである。

〈4・2〉 低周波数と高周波数の波への分離 (9) 式は, つぎのように表される。

$$\hat{Y}_s(i, j, t) = -\frac{2f_j}{T} A_i \cos(\phi_i) \int_0^{q_j} \left(\frac{1}{2} \cos((\omega_i - \lambda_j)(t-\tau)) \right.$$

$$\left. - \frac{1}{2} \cos((\omega_i + \lambda_j)(t-\tau)) \right) d\tau$$

$$- \frac{2f_j}{T} A_i \sin(\phi_i) \int_0^{q_j} \left(-\frac{1}{2} \sin((\omega_i - \lambda_j)(t-\tau)) \right.$$

$$\left. + \frac{1}{2} \sin((\omega_i + \lambda_j)(t-\tau)) \right) d\tau$$

$$= -\frac{f_j}{T} A_i \int_0^{q_j} \left(\cos(\phi_i) \cos((\omega_i - \lambda_j)(t-\tau)) \right.$$

$$\left. - \sin(\phi_i) \sin((\omega_i - \lambda_j)(t-\tau)) \right) d\tau$$

$$+ \frac{f_j}{T} A_i \int_0^{q_j} \left(\cos(\phi_i) \cos((\omega_i + \lambda_j)(t-\tau)) \right.$$

$$\left. - \sin(\phi_i) \sin((\omega_i + \lambda_j)(t-\tau)) \right) d\tau$$

$$= -\frac{f_j}{T} A_i \int_0^{q_j} \cos((\omega_i - \lambda_j)(t-\tau) + \phi_i) d\tau$$

$$+ \frac{f_j}{T} A_i \int_0^{q_j} \cos((\omega_i + \lambda_j)(t-\tau) + \phi_i) d\tau \dots (11)$$

ここで, $\mu = t - \tau$, $\omega_{ij}^- = \omega_i - \lambda_j$, $\omega_{ij}^+ = \omega_i + \lambda_j$, とおくと (11) 式は, つぎのように表される。

$$\hat{Y}_s(i, j, t) = \frac{f_j}{T} A_i \int_t^{t-q_j} \cos(\omega_{ij}^- \mu + \phi_i) d\mu$$

$$- \frac{f_j}{T} A_i \int_t^{t-q_j} \cos(\omega_{ij}^+ \mu + \phi_i) d\mu$$

$$= \frac{f_j}{T} A_i \frac{1}{\omega_{ij}^-} \sin(\omega_{ij}^- \mu + \phi_i) \Big|_t^{t-q_j}$$

$$- \frac{f_j}{T} A_i \frac{1}{\omega_{ij}^+} \sin(\omega_{ij}^+ \mu + \phi_i) \Big|_t^{t-q_j}$$

$$= \frac{f_j}{T} A_i \frac{1}{\omega_{ij}^-} (\sin(\omega_{ij}^- t + \phi_i - \omega_{ij}^- q_j) - \sin(\omega_{ij}^- t + \phi_i))$$

$$- \frac{f_j}{T} A_i \frac{1}{\omega_{ij}^+} (\sin(\omega_{ij}^+ t + \phi_i - \omega_{ij}^+ q_j) - \sin(\omega_{ij}^+ t + \phi_i))$$

$$= -\frac{2f_j}{T} A_i \frac{1}{\omega_{ij}^-} \cos(\omega_{ij}^- t + \phi_i - \frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j) \sin(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j)$$

$$+ \frac{2f_j}{T} A_i \frac{1}{\omega_{ij}^+} \cos(\omega_{ij}^+ t + \phi_i - \frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j) \sin(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j)$$

$$\dots \dots \dots (12)$$

Fig. 1. Decomposition waves by AA1

Fig. 2. The waves expressed with the inner product of AA2

(10) 式も同様の展開で、つぎのように表される。

$$\begin{aligned} \hat{Y}_c(i, j, t) = & \frac{2f_j}{T} A_i \frac{1}{\omega_{ij}^-} \sin(\omega_{ij}^- t + \phi_i - \frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j) \sin(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j) \\ & + \frac{2f_j}{T} A_i \frac{1}{\omega_{ij}^+} \sin(\omega_{ij}^+ t + \phi_i - \frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j) \sin(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j) \\ & \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

(12) 式と (13) 式の右辺の第 1 項は信号の周波数と聴覚細胞の設定周波数の周波数差 ω_{ij}^- の低周波数の波であり、第 2 項はこれらの周波数が加え合わされた高周波数 ω_{ij}^+ の波を表している。解析 2 で計算される内積は、このように高周波数の波と低周波数の波が加え合わされた波となる。文献 (5) より、解析 1 では内積が分解波となった。信号の周波数を 312Hz とし、サンプリング周波数 44.1kHz で、聴覚細胞の設定周波数が 288Hz から約 1.5 % ずつ増加させて約 345Hz までの 13 個の聴覚細胞を用いたときの、解析 1 における分解波を Fig.1 に示す。Fig.1 において、312Hz に最も近い 310.3Hz の設定周波数の聴覚細胞で最も大きな分解波が現れている。また、どの聴覚細胞の分解波も 312Hz の波になっている。解析 2 で計算した内積の波を Fig.2 に示す。Fig.2 の波は、各聴覚細胞ごとに異なった周波数の波になっており、分解波になっていない。

〈4・3〉 解析 2 における分解波の生成処理 〈4・2〉節において、Fig.2 は解析 2 における内積であり、これは (12)

式、(13) 式で示されたように信号の周波数と聴覚細胞の設定周波数との周波数差である低周波数の波と和である高周波数の波で構成されていることを示した。ここでは、この内積から分解波を得ることを示す。(12) 式、(13) 式に切り出し波 $-s_j(t)$ と $c_j(t)$ を掛け合わせた $\tilde{Y}_{ss}(i, j, t)$, $\tilde{Y}_{cc}(i, j, t)$, $\tilde{Y}_{sc}(i, j, t)$ および $\tilde{Y}_{cs}(i, j, t)$ を考える。

$$\begin{aligned} \tilde{Y}_{ss}(i, j, t) &= -\hat{Y}_s(i, j, t)s_j(t) & \tilde{Y}_{sc}(i, j, t) &= \hat{Y}_s(i, j, t)c_j(t) \\ \tilde{Y}_{cs}(i, j, t) &= -\hat{Y}_c(i, j, t)s_j(t) & \tilde{Y}_{cc}(i, j, t) &= \hat{Y}_c(i, j, t)c_j(t) \\ &\dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

ここで、 $s_j(t) = \sin(\lambda_j t)$ および $c_j(t) = \cos(\lambda_j t)$ である。つぎに $\tilde{Y}_{ss}(i, j, t)$ と $\tilde{Y}_{cc}(i, j, t)$ の和 $Y_{out}^+(i, j, t)$ および $\tilde{Y}_{sc}(i, j, t)$ と $\tilde{Y}_{cs}(i, j, t)$ の差 $Y_{out}^-(i, j, t)$ について考える。

$$\begin{aligned} Y_{out}^+(i, j, t) &= \tilde{Y}_{ss}(i, j, t) + \tilde{Y}_{cc}(i, j, t) \\ &= \frac{2f_j}{T} A_i \frac{1}{\omega_{ij}^-} \sin(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j) \left(\cos(\omega_{ij}^- t + \phi_i - \frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j) \sin(\lambda_j t) \right. \\ &\quad \left. + \sin(\omega_{ij}^- t + \phi_i - \frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j) \cos(\lambda_j t) \right) \\ &\quad + \frac{2f_j}{T} A_i \frac{1}{\omega_{ij}^+} \sin(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j) \left(-\cos(\omega_{ij}^+ t + \phi_i - \frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j) \sin(\lambda_j t) \right. \\ &\quad \left. + \sin(\omega_{ij}^+ t + \phi_i - \frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j) \cos(\lambda_j t) \right) \\ Y_{out}^-(i, j, t) &= \tilde{Y}_{sc}(i, j, t) - \tilde{Y}_{cs}(i, j, t) \\ &= -\frac{2f_j}{T} A_i \frac{1}{\omega_{ij}^-} \sin(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j) \left(\cos(\omega_{ij}^- t + \phi_i - \frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j) \cos(\lambda_j t) \right. \\ &\quad \left. - \sin(\omega_{ij}^- t + \phi_i - \frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j) \sin(\lambda_j t) \right) \\ &\quad + \frac{2f_j}{T} A_i \frac{1}{\omega_{ij}^+} \sin(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j) \left(\cos(\omega_{ij}^+ t + \phi_i - \frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j) \cos(\lambda_j t) \right. \\ &\quad \left. + \sin(\omega_{ij}^+ t + \phi_i - \frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j) \sin(\lambda_j t) \right) \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

ここで、 $\omega_{ij}^- = \omega_i - \lambda_j$, $\omega_{ij}^+ = \omega_i + \lambda_j$ であることを考慮すると $Y_{out}^+(i, j, t)$ は、つぎのように表される。

$$\begin{aligned} Y_{out}^+(i, j, t) &= \frac{2f_j}{T} A_i \frac{1}{\omega_{ij}^-} \sin(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j) \sin((\omega_{ij}^- + \lambda_j)t + \phi_i - \frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j) \\ &\quad + \frac{2f_j}{T} A_i \frac{1}{\omega_{ij}^+} \sin(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j) \sin((\omega_{ij}^+ - \lambda_j)t + \phi_i - \frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j) \\ &= \frac{2f_j}{T} A_i \frac{1}{\omega_{ij}^-} \sin(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j) \sin(\omega_i t + \phi_i - \frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j) \\ &\quad + \frac{2f_j}{T} A_i \frac{1}{\omega_{ij}^+} \sin(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j) \sin(\omega_i t + \phi_i - \frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j) \\ &= \frac{2f_j}{T} A_i \left\{ \frac{1}{\omega_{ij}^-} \sin(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j) \left(\cos(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j) \sin(\omega_i t + \phi_i) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \sin(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j) \cos(\omega_i t + \phi_i) \right) \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{\omega_{ij}^+} \sin\left(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j\right) \left(\cos\left(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j\right) \sin(\omega_i t + \phi_i) \right. \\
& \quad \left. - \sin\left(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j\right) \cos(\omega_i t + \phi_i) \right) \Big\} \\
& = \frac{2f_j}{T} A_i \left\{ \left(\frac{1}{\omega_{ij}^-} \sin\left(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j\right) \cos\left(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j\right) \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \frac{1}{\omega_{ij}^+} \sin\left(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j\right) \cos\left(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j\right) \right) \sin(\omega_i t + \phi_i) \right. \\
& \quad \left. - \left(\frac{1}{\omega_{ij}^+} \sin^2\left(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j\right) + \frac{1}{\omega_{ij}^-} \sin^2\left(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j\right) \right) \cos(\omega_i t + \phi_i) \right\} \\
& \quad \dots\dots\dots (16)
\end{aligned}$$

同様に, $Y_{out}^-(i, j, t)$ は, つぎのように表される。

$$\begin{aligned}
& Y_{out}^-(i, j, t) \\
& = \frac{2f_j}{T} A_i \left\{ - \left(\frac{1}{\omega_{ij}^-} \sin\left(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j\right) \cos\left(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j\right) \right. \right. \\
& \quad \left. \left. - \frac{1}{\omega_{ij}^+} \sin\left(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j\right) \cos\left(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j\right) \right) \cos(\omega_i t + \phi_i) \right. \\
& \quad \left. - \left(\frac{1}{\omega_{ij}^-} \sin^2\left(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j\right) - \frac{1}{\omega_{ij}^+} \sin^2\left(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j\right) \right) \sin(\omega_i t + \phi_i) \right\} \\
& \quad \dots\dots\dots (17)
\end{aligned}$$

ここで

$$\begin{aligned}
G_+(i, j) &= \frac{2f_j}{T} \left\{ \frac{1}{\omega_{ij}^-} \sin\left(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j\right) \cos\left(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j\right) \right. \\
& \quad \left. + \frac{1}{\omega_{ij}^+} \sin\left(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j\right) \cos\left(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j\right) \right\} \\
H_+(i, j) &= \frac{2f_j}{T} \left(\frac{1}{\omega_{ij}^+} \sin^2\left(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j\right) + \frac{1}{\omega_{ij}^-} \sin^2\left(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j\right) \right) \\
G_-(i, j) &= \frac{2f_j}{T} \left\{ \frac{1}{\omega_{ij}^-} \sin\left(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j\right) \cos\left(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j\right) \right. \\
& \quad \left. - \frac{1}{\omega_{ij}^+} \sin\left(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j\right) \cos\left(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j\right) \right\} \\
H_-(i, j) &= \frac{2f_j}{T} \left(\frac{1}{\omega_{ij}^+} \sin^2\left(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j\right) - \frac{1}{\omega_{ij}^-} \sin^2\left(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j\right) \right) \\
& \quad \dots\dots\dots (18)
\end{aligned}$$

とおくと (16) 式, (17) 式は, つぎのように表される。

$$\begin{aligned}
& Y_{out}^+(i, j, t) = \\
& A_i \left(G_+(i, j) \sin(\omega_i t + \phi_i) - H_+(i, j) \cos(\omega_i t + \phi_i) \right) \\
& Y_{out}^-(i, j, t) = \\
& A_i \left(-G_-(i, j) \cos(\omega_i t + \phi_i) + H_-(i, j) \sin(\omega_i t + \phi_i) \right) \\
& \quad \dots\dots\dots (19)
\end{aligned}$$

さらに

$$\begin{aligned}
\Gamma_+(i, j) &= \sqrt{G_+^2(i, j) + H_+^2(i, j)} \\
\Psi_+(i, j) &= \tan^{-1}(-H_+(i, j)/G_+(i, j))
\end{aligned}$$

Fig. 3. Decomposition waves by AA2

$$\begin{aligned}
\Gamma_-(i, j) &= \sqrt{G_-^2(i, j) + H_-^2(i, j)} \\
\Psi_-(i, j) &= \tan^{-1}(G_-(i, j)/H_-(i, j)) \dots\dots\dots (20)
\end{aligned}$$

とおくと (19) 式は, つぎのように表される。

$$\begin{aligned}
Y_{out}^+(i, j, t) &= A_i \Gamma_+(i, j) (\sin(\omega_i t + \phi_i + \Psi_+(i, j))) \\
Y_{out}^-(i, j, t) &= A_i \Gamma_-(i, j) (\sin(\omega_i t + \phi_i + \Psi_-(i, j))) \\
& \quad \dots\dots\dots (21)
\end{aligned}$$

(21) 式は周波数が信号の周波数 ω_i で, 元の信号に対して, 振幅がそれぞれ $\Gamma_+(i, j)$ 倍および $\Gamma_-(i, j)$ 倍で, 新たに位相 $\Psi_+(i, j)$ および $\Psi_-(i, j)$ が生じている。(21) 式の $Y_{out}^+(i, j, t)$ を Fig.3 に示す。Fig.3 は連続系において解析的に得られたが, 解析 2 の内積である (6) 式から同様の処理によって, Fig.3 と本質的に同じものが得られる。この手順は, つぎのように表される。

step1 2 章で示した解析 2 の手法を用いて (6) 式で示した

時刻 kT_s のときの内積 $Y_s^k(i, j)$, $Y_c^k(i, j)$ を計算する。

step2 内積 $Y_s^k(i, j)$, $Y_c^k(i, j)$ に, (1) 式で表される切り出し波 $-s_j(k)$, $c_j(k)$ を掛けて

$$\begin{aligned}
Y_{ss}^k(i, j) &= -Y_s^k(i, j)s_j(k) & Y_{sc}^k(i, j) &= Y_s^k(i, j)c_j(k) \\
Y_{cc}^k(i, j) &= Y_c^k(i, j)c_j(k) & Y_{cs}^k(i, j) &= -Y_c^k(i, j)s_j(k)
\end{aligned}$$

を求める。

step3 $Y_{ss}^k(i, j)$, $Y_{sc}^k(i, j)$, $Y_{cc}^k(i, j)$ および $Y_{cs}^k(i, j)$ を用いて, つぎの和と差を計算する。

$$\begin{aligned}
Y_{cout}^k(i, j) &= Y_{ss}^k(i, j) + Y_{cc}^k(i, j) \\
Y_{sout}^k(i, j) &= Y_{sc}^k(i, j) - Y_{cs}^k(i, j)
\end{aligned}$$

ここで, $Y_{cout}^k(i, j)$ は $Y_{out}^+(i, j, t)$ に, $Y_{sout}^k(i, j)$ は $Y_{out}^-(i, j, t)$ に, それぞれ対応している。

step4 k を $k+1$ として step1 にもどり, 以下繰り返す。

step3 で得られた $Y_{cout}^k(i, j)$ は, Fig.3 と同じ波になる。つぎに (16) 式, (17) 式は解析 1 における信号の分解と再構成を示した文献 (5) での分解波と一致することを示す。

〈4・4〉 解析 1 における信号の分解と再構成の問題への帰着 (18) 式の $G_+(i, j)$, $G_-(i, j)$, $H_+(i, j)$ および

$H_-(i, j)$ は一見すると複雑に見えるが, $\omega_{ij}^- = \omega_i - \lambda_j$, $\omega_{ij}^+ = \omega_i + \lambda_j$ および q_j は周波数 λ_j の T 周期分の長さであるから $\lambda_j q_j / 2 = T\pi$ となり, $\sin(\lambda_j q_j / 2) = 0$, $\cos(\lambda_j q_j / 2) = \pm 1$ の関係が成り立つことから, これらの関係を用いて簡潔に表すことができる。はじめに $G_+(i, j)$ の展開を示す。

$$\begin{aligned} G_+(i, j) &= \frac{2f_j}{T} \left\{ \frac{1}{\omega_{ij}^-} \sin\left(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j\right) \cos\left(\frac{\omega_{ij}^-}{2} q_j\right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\omega_{ij}^+} \sin\left(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j\right) \cos\left(\frac{\omega_{ij}^+}{2} q_j\right) \right\} \\ &= \frac{2f_j}{T} \frac{1}{\omega_i - \lambda_j} \left\{ \left(\sin\left(\frac{\omega_i}{2} q_j\right) \cos\left(\frac{\lambda_j}{2} q_j\right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \cos\left(\frac{\omega_i}{2} q_j\right) \sin\left(\frac{\lambda_j}{2} q_j\right) \right) \right\} \\ &\quad \times \left(\cos\left(\frac{\omega_i}{2} q_j\right) \cos\left(\frac{\lambda_j}{2} q_j\right) + \sin\left(\frac{\omega_i}{2} q_j\right) \sin\left(\frac{\lambda_j}{2} q_j\right) \right) \\ &\quad + \frac{2f_j}{T} \frac{1}{\omega_i + \lambda_j} \left\{ \left(\sin\left(\frac{\omega_i}{2} q_j\right) \cos\left(\frac{\lambda_j}{2} q_j\right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \cos\left(\frac{\omega_i}{2} q_j\right) \sin\left(\frac{\lambda_j}{2} q_j\right) \right) \right\} \\ &\quad \times \left(\cos\left(\frac{\omega_i}{2} q_j\right) \cos\left(\frac{\lambda_j}{2} q_j\right) - \sin\left(\frac{\omega_i}{2} q_j\right) \sin\left(\frac{\lambda_j}{2} q_j\right) \right) \\ &= \frac{2f_j}{T} \frac{\omega_i}{\omega_i^2 - \lambda_j^2} \sin(\omega_i q_j) \cdots \cdots \cdots (22) \end{aligned}$$

同様に, $G_-(i, j)$, $H_+(i, j)$ および $H_-(i, j)$ は, つぎのように表される。

$$\begin{aligned} G_-(i, j) &= \frac{2f_j}{T} \frac{\lambda_j}{\omega_i^2 - \lambda_j^2} \sin(\omega_i q_j) \\ H_+(i, j) &= \frac{2f_j}{T} \frac{\omega_i}{\omega_i^2 - \lambda_j^2} (1 - \cos(\omega_i q_j)) \\ H_-(i, j) &= \frac{2f_j}{T} \frac{-\lambda_j}{\omega_i^2 - \lambda_j^2} (1 - \cos(\omega_i q_j)) \cdots \cdots (23) \end{aligned}$$

文献(5)において, 解析1に基づいた分解波は, つぎのように表された。

$$\begin{aligned} \tilde{Y}_c(i, j, t) &= A_i \left(I_{cc}(i, j) \sin(\omega_i t + \phi_i) \right. \\ &\quad \left. - I_{sc}(i, j) \cos(\omega_i t + \phi_i) \right) \\ \tilde{Y}_s(i, j, t) &= A_i \left(-I_{ss}(i, j) \cos(\omega_i t + \phi_i) + \right. \\ &\quad \left. + I_{cs}(i, j) \sin(\omega_i t + \phi_i) \right) \cdots \cdots (24) \end{aligned}$$

ここで, $I_{cc}(i, j)$, $I_{ss}(i, j)$, $I_{sc}(i, j)$ および $I_{cs}(i, j)$ は

$$\begin{aligned} I_{cc}(i, j) &= \frac{2f_j}{T} \frac{\omega_i}{\omega_i^2 - \lambda_j^2} \sin(\omega_i q_j) \\ I_{ss}(i, j) &= \frac{2f_j}{T} \frac{\lambda_j}{\omega_i^2 - \lambda_j^2} \sin(\omega_i q_j) \\ I_{sc}(i, j) &= \frac{2f_j}{T} \frac{\omega_i}{\omega_i^2 - \lambda_j^2} (1 - \cos(\omega_i q_j)) \\ I_{cs}(i, j) &= \frac{2f_j}{T} \frac{-\lambda_j}{\omega_i^2 - \lambda_j^2} (1 - \cos(\omega_i q_j)) \cdots \cdots (25) \end{aligned}$$

である。(22)式, (23)式と(25)式は同じである。したがって, $Y_{out}^+(i, j, t) = \tilde{Y}_c(i, j, t)$, $Y_{out}^-(i, j, t) = \tilde{Y}_s(i, j, t)$ であり, $Y_{out}^+(i, j, t)$, $Y_{out}^-(i, j, t)$ は解析1における分解波と同じになる。したがって, 解析2における信号の分解と再構成は解析1における信号の分解と再構成の問題に帰着する。つぎに解析2を用いたときの信号の再構成について示す。

5. 信号の再構成

3章で信号の検出範囲 B と切出し波の長さ T/f_j で作られる面積は一定の $2 (= BT/f_j)$ であることを示した。 T を一定にすると B/f_j も一定になる。いま, 聴覚細胞の設定周波数を等比数列的に増加させていくと, f_j によらず B 内には同じ数の聴覚細胞が存在することになる。基本波, 高調波などで構成されている母音のような場合は, 基本波や高調波に応じた所で大きな分解波が現れ, それらの大きく表われている部分で, それぞれ分解波の数が同じになるようにしてとり出すと, f_j によらず B 内には同じ数の聴覚細胞が存在するのであるから, 基本波に対応した部分で取り出した分解波も高調波に対応した部分で取り出した分解波も同じ程度に取り出したことになる。それぞれの部分で取り出した分解波を加えると信号を構成している波が近似的に得られ, これにより信号波形の詳細な分析ができる。つぎに分解波を全て加えて再構成波を得ることについて示す。(19)式の分解波は各聴覚細胞の出力であり, (19)式を各聴覚細胞について加えたのが再構成波である。ここでは $Y_{out}^+(i, j, t)$ を各聴覚細胞について加えた再構成波 $\bar{Y}_{out}(i, t)$ について示す。

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{out}(i, t) &= \sum_{j=1}^n Y_{out}^+(i, j, t) \\ &= A_i \sum_{j=1}^n \left\{ G_+(i, j) \right\} \sin(\omega_i t + \phi_i) \\ &\quad - A_i \sum_{j=1}^n \left\{ H_+(i, j) \right\} \cos(\omega_i t + \phi_i) \\ &\quad \cdots \cdots \cdots (26) \end{aligned}$$

ここで

$$\begin{aligned} Z_G(i) &= \sum_{j=1}^n G_+(i, j) \quad Z_H(i) = - \sum_{j=1}^n H_+(i, j) \\ \bar{r}(i) &= \sqrt{Z_G^2(i) + Z_H^2(i)} \\ \bar{g}(i) &= \tan^{-1}(Z_H(i)/Z_G(i)) \cdots \cdots \cdots (27) \end{aligned}$$

とおくと, (26)式は

$$\bar{Y}_{out}(i, t) = A_i \bar{r}(i) \sin(\omega_i t + \phi_i + \bar{g}(i)) \cdots \cdots (28)$$

となる。(28)式は周波数が信号の周波数 ω_i で, 振幅が $\bar{r}(i)$ 倍となり, さらに新しく位相 $\bar{g}(i)$ が生じることを表している。 $\bar{r}(i)$ が振幅特性であり, $\bar{g}(i)$ が位相特性である。分解波を加え合わせると元の信号波形が再構成されるが, この

Fig. 4. The waveform of Japanese vocal sound /i/ and the decomposition waves

再構成は保証されたものではない。元の信号を再構成するためには、つぎの条件

- (1) 周波数によらず振幅特性（ゲイン）が一定
- (2) 位相特性が直線位相特性

を満たすことである。条件 (2) はデジタルフィルタの設計において歪のない波形を得るための条件として知られている。

6. 実信号の解析例

ここでは、日本語の音声/i/を用いた実際の解析例を示す。音声データはサンプリング周波数 44.1kHz、16 ビットモノラルで取得した。聴覚細胞については周期数 T を 16 とし、設定周波数を 10Hz から約 1.5 % ずつ増加させて約 23kHz までの 520 個の聴覚細胞を設定した。2 章で示したように設定周波数が高くなると T 周期内に存在するデータ数が少なくなるため、設定周波数を約 1.5 % ずつ増加させることが困難になる。そこで、自然スプライン補間を行ってサンプリング周波数を 10 倍の 441kHz とし、聴覚細胞の設定周波数が 500Hz まではサンプリング周波数を 44.1kHz とし、500Hz 以上ではサンプリング補間した 441kHz のデータを用いて聴覚細胞を設定した。音声/i/の波形と、<4.3>節で示した分解波を得るための処理手順 (step1 から step4) で得られた $Y_{out}^k(i, j)$ を Fig.4 に示す。Fig.4(a) は音声/i/の波形である。Fig.4(b) は分解波で、横軸は時間、左の縦軸は周波数である。分解波は 10Hz から約 23kHz までであるが、ここでは約 100Hz から 5kHz までを示した。右側の A から E は大きく分解波が現れている部分である。この A から E を取り出した分解波を Fig.5 に示す。Fig.5 の A から E で、それぞれ分解波を加えた波等を Fig.6 に示す。Fig.6(a) は音声/i/の波形である。Fig.6(h) は基本波であり、その周波数は 113Hz である。Fig.6(g) は第 2 高調波で、周波数は基本周波数の 2 倍で 227Hz である。Fig.6(f) は第 3 高調波で、周波数は 3 倍の 340Hz である。Fig.6(e) と Fig.6(d) はそれぞれ 2kHz 強と約 4kHz に現れているノイズのような高い周波数の波である。Fig.6(b) は基本波から、この高い周波数の波までを加えた波であり、Fig.6(a) の音声波形を高い精度で近似している。この波形で wave ファイルを

Fig. 5. The decomposition waves at A, B, C, D and E

Fig. 6. The waveform of Japanese vocal sound /i/ and the waves which constitute vocal sound /i/ and the reconstruction waves

作成し、再生して聞いてみると、Fig.6(a) の場合と同じ声色で「イ」と聞こえる。Fig.6(c) は基本波と高調波を加えた波であり、Fig.6(b) の波形と殆ど同じである。ただノイズのような高い周波数の波が無いことだけが異なっている。Fig.6(c) の波形を同様に再生して聞いてみると「ウ」と聞こえる。「イ」と「ウ」の 패턴の違いはノイズのような高周波の波の存在であることが分かる。このように信号の詳細な分析ができる。

つぎに、全ての分解波を加えて信号波形を再構成することを示す。信号波形を再構成するための条件は、5 章で示した条件 (1), (2) が成立することであり、この特性を Fig.7 に示す。Fig.7(a) は振幅特性で、ゲインは周波数によらず、ほぼ一定であって条件 (1) を満たしていることが分かる。Fig.7(b) は位相特性で、ほぼ直線位相特性になっていて、条件 (2) を満たしていることが分かる。全ての分解波を加えた再構成波を Fig.8 に示す。Fig.8(a) は音声波形で Fig.8(b) は再構成波である。Fig.8(b) は Fig.7 の特性を反映して、高い精度で元の波形を再構成していることが分かる。

Fig. 7. Magnitude characteristic and phase characteristic

Fig. 8. The waveform of Japanese vocal sound /i/ and the reconstruction wave

7. おわりに

本論文で扱っている解析 2 では、(6) 式の内積は分解波にはならない。そこで、4.3 節で示した step1 から step4 の処理を施すことによって得られた波が、解析 1 における分解波と一致することを示した。解析 2 における分解波が解析 1 における分解波と同じになることから、再構成についても解析 1 の場合と同じになる。よって、解析 2 における信号の分解と再構成は、解析 1 における信号の分解と再構成の問題に帰着することを示した。数値解析例では日本語の音声/i/を用いて、基本波、高調波および高周波数の波に分解して表し、これらの全ての波を加えた波および基本波と高調波だけを加えた波で wave ファイルを作成し、再生して聞いてみることで、音声/i/と/u/のパターンの違いを

明確にした。このような詳細な分析は、広い分野で適用できるものと思われる。全ての分解波を加えた再構成波では、振幅特性および位相特性が元の信号を再構成するための条件をほぼ満たしており、これを反映して、音声波形を高い精度で近似した再構成波が得られることを示した。

(平成 19 年 10 月 23 日受付, 平成 20 年 3 月 26 日再受付)

文 献

- (1) N. Murata: "Independent Component Analysis", p.190, Tokyo Denki University Press (2005) (in Japanese)
村田 昇:「独立成分分析」, p.190, 東京電機大学出版局 (2005)
- (2) C. M. Harris and W. M. Waite: "Response of spectrum analyzers of the bank-of-filters type to signal generated by vowel sound", J.A.S.A., 18, 1, pp.1972-1977 (1963)
- (3) A. Grossmann and J. Morlet: "Decomposition of Hardy function into square integrable wavelets of constant shape", SIAM J. Math. Anal. 15, pp.723-736 (1984)
- (4) H. Nakatsuji and S. Omatu: "Real Time Spectral Analysis", IEEJ Trans. EIS, Vol.126, No.3, pp.383-388 (2006) (in Japanese)
中辻秀人・大松 繁:「リアルタイムスペクトル解析」, 電学論 C, 126, 3, pp.383-388 (2006)
- (5) H. Nakatsuji and S. Omatu: "Decomposition and Reconstruction of Signal in Real-Time Spectral Analysis", IEEJ Trans. EIS, Vol.127, No.7, pp.1123-1130 (2007) (in Japanese)
中辻秀人・大松 繁:「リアルタイムスペクトル解析における信号の分解と再構成」, 電学論 C, 127, 7, pp.1123-1130 (2007)

中 辻 秀 人 (正員) 1947 年生。1970 年 3 月大阪府立大学工学部機械工学科卒業。同年, 航空自衛隊入隊。1978 年 3 月防衛大学校理工学研究科修了。戦闘機パイロット, テストパイロット, 技術幹部等として勤務。この間, 国産機の開発, 試験等に從事。2002 年 10 月定年退官。2004 年 4 月より, 大阪府立大学工学部研究生。計測自動制御学会, システム制御情報学会会員。

大 松 繁 (正員) 1974 年大阪府立大学大学院博士課程修了。同年, 徳島大学工学部情報工学科助手。1988 年同知能情報工学科教授。1995 年大阪府立大学工学部情報工学科教授となり, 現在に至る。工学博士。ニューラルネットワークの研究に從事。1991 年電気学会学術振興賞・論文賞, 1995 年計測自動制御学会論文賞, 1996 年市村賞, 2005 年電気学会業績賞受賞, IEEE Trans. on Neural Network の Associate Editor。システム制御情報学会, 計測自動制御学会, SIAM, IEEE 会員。