

称号及び氏名 博士（工学）中辻 秀人

学位授与の日付 2010年1月31日

論文名 「可変窓を用いた高速再帰的スペクトル  
解析に関する研究」

論文審査委員 主査 大松 繁  
副査 汐崎 陽  
副査 黄瀬 浩一

## 可変窓を用いた高速再帰的スペクトル解析に関する研究

### 論文要旨

時間周波数領域における解析法として、短時間フーリエ変換の窓を重ね合わせながら計算が行われている。しかし、短時間フーリエ変換では、周波数によらず窓の幅が一定であるため、低い周波数から高い周波数までを効果的に解析することは困難である。これを解決するため、ウェーブレットのスケールが周波数に応じて伸縮するウェーブレット変換が考案された。このように、ウェーブレット変換はフーリエ解析の延長線上にあるのではなく、新しい発想から生まれている。

本論文は、複数周期の長さの正弦波および余弦波（この波を「切り出し波」と呼ぶ）を用いて、高速スペクトル解析を行うものである。少しずつ周波数の異なった多くの切り出し波を準備し、これらの切り出し波の長さ（窓の幅）を周波数に応じて変化させる。したがって、本手法では、低い周波数では切り出し波の長さは長く、高い周波数では短くなっており、ウェーブレット変換と同様に、低い周波数から高い周波数までの信号を効果的に解析することができる。その演算は、一つの入力データのみを用いた内積等を逐次的に計算する手法である。さらに、これらの切り出し波と信号との内積を求める演算は、完全に独立しており、並列処理を導入した場合は、少ない演算量で処理を行うことが可能となっている。

切り出し波の複数周期の数を「周期数」、また、その周波数を「設定周波数」と呼ぶ。周期数を一定にすると、前述のように高い周波数では切り出し波が短くなり、低い周波数では長くなる。これは、ウェーブレット変換におけるスケールの伸縮に相当し、また、切

り出し波の長さを一定にすると、フーリエ解析になる。

本論文では、周期数、サンプリング周波数および設定周波数の増加率という三つのパラメータがある。これらのパラメータの設定には、大きな自由度があるため、ウェーブレット変換やフーリエ解析と異なる解析も可能となる。

第1章では、本研究の背景および本論文の概要を示す。

第2章では、低い周波数から高い周波数まで、いろいろな周波数の波を含む非定常信号を、効果的に解析する二つの手法を示す。1番目の手法は、切り出し波の周期数分の長さの中のデータ数だけ内積を求める式があり、これらの式は新しく入力された一つのデータを用いて更新され、切り出し波が正弦波および余弦波である二つの式を用いて内積の自乗の和の平方根で表わされる出力が計算される。この解析法を「基本的解析法」と呼ぶ。基本的解析法は提案手法を考察していく上で、重要な示唆を与えている。2番目の手法は、相対的位相が $\pi/2$ である二つの切り出し波を用いる解析法で、これも一つの入力データを用いて更新される。この解析法は基本的解析法と比較して大幅に演算量を低減しており、高速に処理できることから「高速解析法」と呼ぶ。さらに、それらの式も含めて完全な並列処理が可能であり、並列処理コンピュータを導入すれば、内積の更新に必要な計算回数は乗算1回であり、出力を更新によって得るのに必要な計算回数は乗算2回と二乗和の平方根の演算1回の計3回となる。

数値解析例として、基本的解析法を用いて、日本語音声/ku/の時間周波数領域におけるスペクトル表示および分解波と再構成波を求める。分解波を加えると再構成波が得られるが、この段階では、再構成波が得られる理由は不明である。

第3章では、基本的解析法における信号の分解と再構成について示す。まず、信号と切り出し波の内積が分解波になることを示す。つぎに、分解波を加え合わせて得られる再構成波が、もとの信号を精度良く近似するためには、振幅特性、位相特性が重要な役割を果たしていることを示す。音声信号の母音のように繰り返しのある波では、大きく振動している分解波の部分を取り出して、基本波、高調波および高い周波数の波に分けて表現することができ、それらの波を重ねて表示すると位相を表わすことができる。

第4章では、高速解析法における信号の分解と再構成について示す。第3章では、基本的解析法における信号と切り出し波の内積が分解波になることを示したが、高速解析法では、切り出し波の位相が変化するため、信号と切り出し波の内積は分解波にならない。そこで、この内積に以下のような数学的処理を施して、基本的解析法で得たような分解波が得られることを示す。離散系では解析的に展開することができないため、この数学的処理は連続系に置き換えて考察する。この数学的処理を離散系での処理手順として表現する。ここで得られた分解波は、基本的解析法で得た分解波と同じであることを示す。したがっ

て、高速解析法における信号の分解と再構成は、基本的解析法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す。

数値解析例では、日本語音声/i/を用いて、基本波、高調波および高い周波数の波を作成し、それを再生することにより、この高い周波数の波が音声/i/を決定していることを示す。

第5章では、本解析法の設計におけるパラメータの設定について示す。第3章および第4章の理論的解析は、離散系では解析的な展開ができないため連続系で考察し、実際の演算は離散系で行うが、サンプリング周波数が小さい場合には、離散系で行う解析と連続系での解析とに誤差が生じる。そこで、誤差を減少させるパラメータとして、1番目がサンプリング周波数、2番目は時間周波数領域での解析を行う上で、本解析法の特質を決定する重要な役割を果たす周期数、3番目は設定周波数の増加率を採用し、それらの設定法について考察する。

第6章では、高速解析法を用いた日本語音声の解析について考察する。母音を分解波で表わすと、基本波、高調波および高い周波数の波の部分で大きな分解波が現れる。この大きな分解波の部分を取り出して加え合わせることによって、基本波、高調波および高い周波数の波を得る。母音/i/と/e/では高い周波数の波は必ず存在し、これを再生すると、それぞれの母音に近い音声となり、また、この高い周波数の波が、それぞれの母音を決定していることが分る。母音/a/, /u/, /o/では、高い周波数の波は必ずしも存在するとは限らないが、/a/, /o/では、その波が存在した場合、それを再生すると、それぞれの母音の音声となる。基本波、高調波および高い周波数の波を各種の組み合わせで加え合わせた波を再生する、試聴実験結果について示す。

母音/a/, /i/, /e/, /o/の高い周波数の波は、それ自体で各母音の音声となる。この高い周波数の波に対して再び解析を行うことで、これらの高い周波数の波は、もとの母音の情報を有していることを示す。

最後に、第7章では、これまでの研究の統括を行ない、今後の課題について述べる。

## 審査結果の要旨

本論文は、離散フーリエ変換の窓の幅を任意に設定できる解析法について研究したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 本論文では、窓の幅を周波数に反比例して変化させるとウェーブレットパケット変換と同様の時間周波数領域での解析になり、窓の幅を一定にすると離散フーリエ変換に帰着できる、新たな解析法を提案した。
- (2) 本解析法では、あらかじめ設定された周波数の複数周期分（自然数）の正弦波およ

び余弦波と信号との内積を用いて、信号検出行った。少しずつ異なった設定周波数を有する多くの信号検出ユニットを配置し、信号の周波数に最も近い設定周波数を有する信号検出ユニットに現れる大きな内積から出力（スペクトル）を計算して、信号を検出した。信号検出ユニットの中の内積計算は、新しく入力された1個のデータのみを用いた更新によって求めた。さらに、信号検出ユニット間および信号検出ユニットの計算は、すべて独立しており、完全な並列処理が可能である。また、並列処理を導入した場合、内積の更新では乗算回数は、システムが大規模になっても変わらないことを示した。

- (3) 信号の分解および再構成の手法を明らかにした。提案手法では窓の幅を任意に設定できるため、信号の再構成は保証されないが、再構成の精度を示す振幅特性および位相特性を計算し、提案手法の有効性を定量的に示した。
- (4) 本解析法の精度を決定するサンプリング周波数、信号検出ユニットの設定周波数の増加率および複数周期の波の周期数という三つのパラメータの設定についての指針を与えた。
- (5) 本解析法を用いた日本語音声の解析を行い、母音の基本波、高調波および高い周波数の波への分解および母音の構成について示すとともに、高い周波数の波のフラクタル挙動を解明することで、本解析法の有効性を示した。

以上の成果は、離散フーリエ変換において、窓の幅を任意に設定できる解析法を提案したものであり、ウェーブレットパケット変換と同様に、時間周波数領域における解析を実現し、さらに、高速処理がなされることから、広範囲な分野の学術的、産業的な発展に貢献するところが大きい。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証明したものである。