

氏 名	小 野 隆 彦
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成元年11月8日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最 終 学 歴	昭和49年3月 慶應義塾大学商学部商学科卒業
学位論文題目	FFTに基づく信号処理の自動化に関する研究
論文審査委員	東北大学教授 城戸 健一 東北大学教授 中鉢 憲賢 東北大学教授 曾根 敏夫 東北大学教授 加藤 正名 東北大学教授 谷 順二 東北大学助教授 牧野 正三

論 文 内 容 要 旨

機械系の異常診断は、その機械が発生する音や振動などからの情報を、熟達した技能者が経験に照らし合わせて判断することにより、実行されてきた。もちろん、それを自動化したいという試みは、古くから行われている。この熟練者の判断を自動化するためには、音や振動などの物理現象を多面的かつ定量的に捉えることが必要であるが、そのための有力な手段として挙げられるのが周波数分析の手法である。しかしながら、1950年代における、アナログによる信号処理のみでは、分析の方法が基本的なものに限られ、かつ処理結果の表示を、人間が視覚に頼って判断せざるを得なかったため、有用な方法が一般化されたという例は極めて少ない。

ところが、1960年代以後のデジタル信号処理技術の理論と装置両面の発達は、この分野に大きな可能性をもたらした。とくに、1965年のFFT（高速フーリエ変換）の発明により、デジタル信号処理により周波数分析を実行することが一挙に実用化された。

これにより、数百もしくは数千のサンプル値系列に対してフーリエ変換を行い、それを数百回繰り返して周波数スペクトルの推定値を求めることが一般化された。それにともない、パワースペクトル、クロススペクトル、さらには伝達関数、コヒーレンス関数など、高い次元のデジタル信号処理による周波数分析が実現され、対象とする物理現象を多面的かつ短時間で捉えることが可能となった。さらに、1970年代の後半に至り、リアルタイムで周波数分析が可能な小型のFFTアナライザが開発され、多くの用途が開かれた。現在では、VLSIやマイクロコンピュータの発達により、より小型で高性能なFFTアナライザが開発され、工場などの現場でも、異常診断や、品質管理な

どに広く使われるようになってきている。

ところが、本来無限の時間で取り扱うべきフーリエ変換を FFT においては離散的に処理しているため、折り返し歪や窓関数による影響、有限な周波数分解能による偏り誤差など解析システムそのものが持つ誤差要因を持つ。また入力信号が確率的なためによって引き起こされる偶然誤差、外乱雑音の影響など、解析現場の状況によっては考慮しなければならない数多くの誤差要因が挙げられる。これらの誤差要因を軽減するため、前者においては折り返し歪防止フィルタや各種の窓関数が提案され、後者においては平均操作が必要とされているわけである。そして、それらの理論的工夫は、現在の FFT アナライザにおいては機能として網羅されている。ただし、その機能を活かすためには、対象とする信号の特性や解析現場の状況によって、それらを正しく選択することが必要となる。実際には、それらの機能の選択は、FFT アナライザの解析条件を設定するという形で、解析を担当する技術者が行い、解析結果を得るわけであるが、技術者の熟練度に不足があるときは設定条件の誤りによる誤差を生じる場合が考えられる。また、平均操作においても、平均化の方法並びに平均回数を選択は経験によってなされているため、平均操作が適切であるかどうかの定量的な判断はなされていない。

そこで、本研究においては、まず、FFT に基づく信号処理についての理論的・実験的検討を行い、解析システムの条件設定の妥当性を判断する種々の指標を提案し、それらの指標を用いることによって、熟練した技術者が注意深く設定した場合と同様の解析条件を、初心者でも簡単に得ることができるような手法について検討した。次に、それらの手法を組み込むことにより、入力信号の特性に合わせた最適な解析条件を選択可能とする解析装置の試作を行った。

このように、本研究は、FFT を中心とするデジタル信号処理を活用するために、信号処理に対する高度な予備的知識を必要とせずに正当な解析結果を出力することの出来る機能をもつ新しい解析装置の実現に根拠を与えたものであり、その工学的価値は十分高いものであると考えられる。以下、本論文の各章の主な結果を要約する。

第1章では、本研究の背景、その目的について述べた。とくに、ユーザー層が急激に広がりつつある FFT アナライザの歴史的背景を述べ、その結果から今後の FFT アナライザに要求されている機能について言及し、それらの機能の実現のための理論的ならびに実験的検討が本研究の目的であることを述べた。

第2章では、後の議論に備えるため、フーリエ級数展開とフーリエ変換ならびに FFT の基礎的事項を総括して理論的展開を行った。また、FFT の欠点を補う形で提案されている折り返し歪防止フィルタ、窓関数、平均化手法、などの必要性について言及した。さらに FFT で求めうる各関数とその相互の関係を述べ、本論文第3章以降で用いるパワースペクトル、クロススペクトル、伝達関数の相互の関係につき言及した。また、FFT そのものが持つ問題点と現状の平均化手法の問題点に言及し、第3章以降の議論でその問題点の解決をはかることを述べた。

第3章では、第2章で述べた、時間軸同期平均を用いてパワースペクトルを推定するときの平均化の問題点、すなわち、同期信号が必要なこと、および2つ以上の無相関な周期信号があるときに、その一つの周期に同期して平均を行うとそれ以外の周期信号も雑音と同様に成分が減少すること、

を解決する方法として、同期信号を必要とせず雑音に埋もれた周期信号の周期とパワースペクトルをクロススペクトル法によって検出する方法につき述べた。具体的には、この方法は、雑音に埋もれた周期信号から、一定の時間遅れをもって2回信号をサンプリングし、この間のクロススペクトルを計算するものである。第3章の2節では、理論的考察を行い、この方法で得られたクロススペクトルは、対象とする周期信号のパワースペクトルに時間窓間の時間差と周波数の積に比例する位相の推移を与えたものと等しいことを導いた。また、この理論の検証のため、実験を行い、本方法は同期信号が得られないために時間軸同期平均が不可能な場合、および2つ以上の無相関な周期信号を一度に観測したい場合でも、雑音に埋もれた周期信号の周期およびパワースペクトルを精度よく検出できることが確認された。

第4章では、信号処理技術の活用例として広範囲な用途をもつ伝達関数を、FFTにより推定するとき、第2章で述べた平均化手法の問題点を軽減するために、推定した伝達関数に残存する偶然誤差の大きさを定量的に評価し、それにより平均回数を決定する方法について言及した。具体的には、M回の平均操作を行うとき、時間窓のうち奇数番目のみを利用して求めた伝達関数の推定値から、偶数番目のみの時間窓を利用して平均した伝達関数の推定値を引算した値が、M回平均における伝達関数の推定誤差のうち、偶然誤差そのものと統計的性質が同一であることの理論的な展開を行った。また、理論的な考察を実験的に検証した。それにより、伝達関数の推定値に残差として残されている偶然誤差の大きさが伝達関数の推定値に対してどの程度の比率になるかが示され、平均回数が妥当であるか否かの判断を定量的に実行可能とした。さらに、偶然誤差の大きさの周波数積分値と平均回数Mとの関係から、偶然誤差の大きさの許容範囲があらかじめ示されれば、最小の観測時間で所望の伝達関数の推定精度が得られうる可能性が示された。

第5章では、同じく伝達関数の推定によるFFTを利用する際に、FFT固有の問題点として第2章で指摘した偏り誤差のうち、周波数分解能が充分でないときに発生する分解能偏り誤差の直接的かつ定量的な評価の方法につき言及し、それにより、あらかじめ分解能偏り誤差の許容値を与えれば、それを満足する時間窓の長さを自動的に指し示す機能の実現に根拠を与えた。具体的には、(1) 分解能偏り誤差の発生原因であるところの、入力側の時間窓内の信号に対するレスポンスのうち同時刻の出力側時間窓から漏れている信号成分を直接検出する方法として、入出力間の時間窓に時間遅れをもたせたディレイドブロックコヒーレンス関数を提案し、理論的考察を行った。(2) 次に伝達系の共振周波数におけるディレイドブロックコヒーレンスの値を使用して、対象とする信号伝達系のインパルスレスポンスの長さを決定する定数(減衰係数)を推定する方法を提案し、実験的検証も行った。(3) 最後に減衰係数を使用して、分解能偏り誤差の許容値をあらかじめ設定したときの、最適な時間窓長の選択方法につき言及した。この減衰係数の演算に使用するディレイドブロックコヒーレンス関数は、使用する時間窓長が短いため、少ない計算量で演算でき、SN比が悪い条件においても分解能偏り誤差の発生が感知できる。また、分解の偏り誤差の許容値を与えれば、自動的に対象とした伝達系の特性にあわせた時間窓の長さが決定でき、その機能に要する計算量、計算時間も大きくはないことを示した。

第6章では、第3章以降の各章で言及した新しい平均化の方法、平均回数の決定方法、時間窓長

の決定方法, の各機能を有機的に使用可能な形で搭載した新しい FFT アナライザの試作を行った。
また, これらの機能を活用することによるデジタル信号処理の今後の展望に付き言及した。
第 7 章は本論文の結論である。

審査結果の要旨

機械等の音響振動に関する情報をその波形の解析によって知るための装置として、高速フーリエ変換 (FFT) に基づく信号解析装置が発達し、高度かつ多様な処理が可能になってきた。それを有効に利用するためには、処理方法と解析条件の設定が重要であるが、これらの設定には高度の知識と経験が必要である。一方、装置が普及して非熟練者が使用する機会が増加するに伴い、設定が不適当なために誤った結果を得るといった例が増加している。著者は、これに注目して、正しい条件設定の自動化を目標とした研究を行った。本論文はその成果をまとめたもので、全文7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、本研究の基礎となる、FFTを利用する信号解析について述べ、その問題点を指摘している。

第3章では、雑音に埋もれている周期信号の周期とパワースペクトルを、一定時間差の時間窓で切り取った同一信号系列間のクロススペクトルにより推定する方法を提案し、実験によって、その方法が、2種類以上の周期信号があるときにも有効であることを確かめている。

第4章では、クロススペクトル法によって推定した伝達関数に含まれる偶然誤差の大きさを、時間をずらして推定した2推定値の差によって評価できること、ならびに、それを伝達関数推定の際の平均回数決定の指標として利用できることを、理論的に導きだし、その正当性を実験的に明らかにしている。これは実用上有用な成果である。

第5章では、伝達系の入力および出力信号系列からデータを切り取る時間窓の開始時刻をずらして、コヒーレンス関数を計算することにより、時間窓長によって決まる分解能偏り誤差を定量的に評価するとともに、伝達系のインパルスレスポンスの減衰係数を推定する方法を提案し、実験的に検証している。また、それを時間窓長の自動設定に利用できることを明らかにしている。これは、優れた着想に基づく成果として、高く評価できる。

第6章では、以上各章で提案した方法を応用したFFTアナライザの試作と、今後の展望について述べている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、FFTに基づく信号処理の基礎となる問題を詳細に研究し、多くの新しい知見を得るとともに、その応用によって、従来不可能であった条件設定の自動化を可能にしたもので、情報工学ならびに機械工学の進歩に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。