

学位論文題名

Optical Information Processing Based
on Wigner Distribution Function

(ウィグナー分布関数に基づく光情報処理)

学位論文内容の要旨

音声などの非定常時間信号の特性を解析する方法として、従来短時間フーリエ変換法がよく使われてきた。この方法では、解析すべき信号に短い時間幅の窓関数を掛け、それをフーリエ変換することにより信号周波数の時間変化が求められる。この場合、窓幅の時間内では信号は定常であるとみなされる。しかし、その時間幅は周波数分解能を決定するため、この方法では信号の時間および周波数分解能を同時に最適化することができない。この問題を解決する方法として、近年デジタル信号処理の分野において、ウィグナー分布関数が導入されている。これは、二つの互いにシフトした信号の積をフーリエ変換することによって得られる関数であり、信号の周波数特性を時間の関数として表すものである。ウィグナー分布関数では、解析すべき信号自身を窓関数とすることにより窓幅が自動的に最適化されている。

一方、光学においても、画像などの空間信号の解析に関して同様な問題が存在する。しかし、この分野ではウィグナー分布関数の応用に関する研究が十分に行われていない。本論文は、ウィグナー分布関数に基づく光情報処理を研究することを目的としている。

第1章では、光情報処理およびウィグナー分布関数の研究の発展に関する概説を行い、さらに本論文の目的と各章の内容について述べている。

第2章では、本論文の背景となるコヒーレント光情報処理および波面再生法の基本的物理概念をまとめ、その数学的背景を示している。

第3章では、ウィグナー分布関数の基礎的な理論がまとめられている。特に、本研究で扱うウィグナー分布関数の諸特性について、その数学的背景を示す。さらに、具体例として基本的な定常および非定常時間信号のウィグナー分布関数を計算機シミュレーションにより確認している。

第4章では、スペckル写真法におけるウィグナー分布関数の応用に関する提案を行っている。物体の変位分布や流体の速度分布を測定する一つの方法としてスペckル写真法がある。スペckル写真法では、スペckルグラムと呼ばれる物体の二重露光写真を用いる。従来の手法では、このスペckルグラムを解析するために光学的フーリエ変換を用い、得られる空間周波数の逆数から変位の大きさを求めている。しかし、この手法では物体全体の平均的な空間周波数しか求められないという欠点があり、また、局所的な変位を求めるためには局所的な光学的フーリエ変換を多数回くり返す必要がある。これに対して、ウィグナー分布関数による解析では、スペckルグラムが空間的に非定常な周波数を含んでいる場合も、物体の各点の局所的な変位を同時に求めることができる。しかし、二次元空間信号のウィグナー分布関数は四次元座標上の関数であり、光学的には実現が不可能である。そこで、二次元スペckルグラムを一次元スペckルグラムの集積とみなし、一次元

空間信号のウィグナー分布関数を光学的に実現することでスペckルグラム解析を行っている。写真フィルムを入力とするシステムを提案し、このシステムの有効性を実験的に確認するとともに、システムの性能向上について詳しく検討している。

第4章で述べたシステムには、写真フィルムの現像処理に時間と手間がかかるという問題が残されている。第5章ではこの問題を解決するため、写真フィルムの代わりに液晶ディスプレイを用いた実時間システムの提案を行っている。スペckルパターンをビデオカメラで検出し、フレームメモリ上に格納する。計算機内に構成した二次元スペckルグラムを数値的に一次元スペckルグラムに変換し、液晶ディスプレイの画面に表示する。このようにして、スペckル写真法におけるウィグナー分布関数の応用を実時間で実現できる。このシステムでは、実時間性に加えて、光学系による画像の歪みを避けることができること、観測する場所を計算機内で自由に選択できること、スペckルパターンの強度を2値化することで局所的な空間周波数の表示性能を向上させることができるなどの利点がある。

光情報処理においては、時間的および空間的に変調した光により情報が伝わる。そのような光情報を実時間で処理するには、上述のように光電検出が有効である。光電検出器の出力は基本的に一次元時間信号であり、例えばビデオカメラの場合はビデオ信号あるいはラスタ信号である。第6章では、このような時間信号をウィグナー分布関数に変換する新しい光学的実時間処理系を提案している。このシステムでは、一つの音響光学素子を用いて電気信号を空間信号に変換することにより時間信号のウィグナー分布関数を光学的に実現している。このシステムは、実時間性およびコンパクトであることに加えて、デジタル演算によるエリアシング誤差を避けることができるという利点をもっている。

第7, 8章では、ウィグナー分布関数に基づく空間的に変動する信号の処理とその光接続等への応用に関する研究を行っている。第7章では、ウィグナー分布関数による光学的座標変換の基本的物理概念および数学的背景を論じている。光学的座標変換を実現するための位相フィルターを求める方法として、従来は定常位相法および近軸近似がよく使われてきた。しかしこの方法では、画像の歪みを避けるためには大きい開口数をもつ光学系が必要であり、光学系の空間・帯域幅積が下がるという問題がある。この欠点を避けるには、光学的座標変換を物体の各点における空間周波数の変換とみなし、ウィグナー分布関数による光学系の解析により位相フィルターを求めることが有効であり、これにより光学系の空間・帯域幅積を向上させることができることが示されている。この方法に基づいて、空間を関数とする光学的置換ネットワークの構成を提案している。このような一対一接続にはデータの再配置が必要であるが、これは座標変換と同じような処理と考えることができる。構成したシステムでは、計算機プログラムを使って位相フィルターを実現している。その結果、従来よりもコンパクトな光学系で光接続を実現できる。さらに、クロストークおよび位相フィルターの空間分解能について詳しく検討している。

第8章では、前章で提案した方法を拡張し、一対多および多対一の光接続を検討している。並列演算処理では、このような接続がよく用いられる。例えば、行列・ベクトルおよび行列・行列積では、各ベクトルデータを行列データに分配したのち掛け算および足し算が行われる。この考えを用いて、この章では光学的行列処理の構成が提案されている。このシステムではアナモルフィック光学系を使わず、二枚の位相フィルターだけで並列光演算処理を実現できることが示され、システムの性能が理論的に論じられている。

第9章では、本研究で得られた結果を総括し、結論が述べられている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	朝倉利光
副査	教授	小川吉彦
副査	教授	栃内香次
副査	教授	北島秀夫
副査	助教授	魚住純

学位論文題名

Optical Information Processing Based on Wigner Distribution Function

(ウィグナー分布関数に基づく光情報処理)

信号処理の分野において解析の対象となる時間および空間信号は、多くの場合非定常であり、その周波数スペクトルは時間あるいは空間とともに変化している。近年、デジタル信号処理の分野では、そのような信号の周波数スペクトルの時間変化を解析する手法として、ウィグナー分布関数が導入されている。一方、光学においても、画像などの空間信号の解析に関して同様な問題が存在する。本論文は、ウィグナー分布関数に基づく時間・空間信号の光情報処理の研究とその計測への応用に関する研究の結果をまとめたものである。

第1章では、光情報処理およびウィグナー分布関数の研究の発展に関する概説を行い、さらに本論文の目的と各章の構成について述べている。

第2章では、本論文の背景となるコヒーレント光情報処理および波面再生法の基本的物理概念をまとめ、その数学的背景を述べている。

第3章では、ウィグナー分布関数の基礎的な理論、特に本研究で扱うウィグナー分布関数の諸特性について、その数学的背景が示されている。

第4章では、スペックル写真法におけるウィグナー分布関数の応用に関する提案を行っている。物体の変位分布や流体の速度分布の測定法であるスペックル写真法では、スペックルグラムと呼ばれる物体の二重露光写真を用いる。従来の手法では、このスペックルグラムに光学的フーリエ変換を適用することにより、平均的な変位の大きさを求める。これに対して、ウィグナー分布関数を用いて解析することにより、物体の各点の局所的な変位を同時に求めることができることを明らかにしている。さらに、写真フィルムを入力とするシステムを提案し、このシステムの有効性を実験的に確認するとともに、システムの性能向上について詳しく検討している。

第4章で述べているシステムには、写真フィルムの現像処理に時間がかかるという問題が残されている。第5章では、この問題を解決するため、写真フィルムの代わりに液晶ディスプレイを用いた実時間システムの提案を行っている。このシステムでは、実時間性に加えて、光学系による画像の歪みを避けることができること、観測する場所を計算機内で自

由に選択できることなどの利点があることを明らかにしている。

第6章では、時間信号をウィグナー分布関数に変換する新しい光学の実時間処理系を提案している。このシステムでは、一つの音響光学素子を用いて電気信号を空間信号に変換することにより、時間信号のウィグナー分布関数を光学的に実現している。このシステムは、実時間性およびコンパクトであることに加えて、デジタル演算によるエリアシング誤差を避けることができるという利点をもっていることを示している。

第7章では、ウィグナー分布関数による光学的座標変換の設計および光学的置換ネットワークの構成を提案している。光学的座標変換を実現するための位相フィルターを求める方法として、従来は定常位相法および近軸近似がよく使われてきた。しかし、この方法では、画像の歪みを避けるためには小さい開口数をもつ光学系が必要であり、光学系の空間・帯域幅積が下がるという問題がある。ここでは、この欠点を避けるにはウィグナー分布関数による光学系の解析により位相フィルターを求めることが有効であり、これにより光学系の空間・帯域幅積を向上させることができることを明らかにしている。この方法に基づいて、空間を関数とする光学的置換ネットワークの構成を提案している。構成したシステムでは、計算機プログラムを使って位相フィルターを実現しており、その結果、従来よりもコンパクトな光学系で光接続を実現している。

第8章では、前章で提案した方法を拡張し、光学的行列処理の構成を提案している。提案したシステムでは、アナモルフィック光学系を使わず、二枚の位相フィルターだけで並列光演算処理を実現できることを示し、システムの性能を理論的に論じている。

第9章では、本研究で得られた結果を総括し、結論を述べている。

これを要するに、著者は、ウィグナー分布関数の概念を光学の領域に応用することにより、非定常信号の光学的処理、及び回折光学系の設計に関する有益な新知見を得たものであり、情報光学及び光計測工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。