

## 論文の内容の要旨

論文題目	A Study on Design of Orthogonal DTCWTs with Improved Properties (和訳: 各種の性質を改善した直交DTCWTの設計に関する研究)
学位 申請者	王 戴維

双対木複素ウェーブレット変換(DTCWT: Dual Tree Complex Wavelet Transform)は信号処理や画像処理などの多くの分野で応用されている。DTCWTは、二つの実係数フィルタバンクを用いたウェーブレット変換で実行され、それぞれ複素数の実部と虚部に対応する。二つのウェーブレット基底はヒルベルト変換対となる必要がある。その結果、双対木複素ウェーブレット変換は近似的にシフト不変性であり、高次元信号の場合、より良い方向選択性を持つ。本論文では、改善された性質を持つ二種類の双対木複素ウェーブレット変換を提案する。

第二章では、まずフーリエ変換、短時間フーリエ変換およびウェーブレット変換の基礎について紹介する。次に双対木複素ウェーブレット変換について述べる。ウェーブレット変換は時間と周波数領域において信号を同時に解析できる有効なツールである。スケーリング係数とウェーブレット係数を効率よく得るため、離散ウェーブレット変換が導入され、離散ウェーブレット変換は2チャンネルフィルタバンクを用いて実現できる。次に、2チャンネルフィルタバンクの設計条件、すなわち、完全再構成条件と直交条件を説明し、ウェーブレット関数の直交性、対称性やバニシングモーメント等の性質について述べる。さらに、双対木複素ウェーブレット変換の構造を説明し、二つのウェーブレット基底がヒルベルト変換対となることを必要であることを明らかにする。ヒルベルト変換対になるために、二つのスケーリングローパスフィルタが半サンプル遅延条件を満たすことが要求される。最後に、複素ウェーブレット変換の性能を評価するための評価基準を示す。

第三章では、異なる次数の分子と分母を持つ一般的なIIR フィルタを用いて、改善された解析性と周波数選択性を持つ双対木複素ウェーブレット変換を提案する。Selesnickにより提案された共通因子法では、半サンプル遅延条件を満たすために、最大平坦オールパスフィルタが使用された。しかし、得られた複素ウェーブレット変換の解析性が良くなかった。複素ウェーブレット変換の解析性を改善するために、平坦度を指定して近似帯域で等リプル位相特性を持つオールパ

スフィルタの設計法を提案する。また、スケーリングローパスフィルタの周波数選択性を改善するために、 $z=-1$ における零点の数を指定して阻止域の振幅誤差を最小化する。Remezアルゴリズムを用いて、等リプル特性を近似する。よって、固有値問題を解くことで、簡単にフィルタ係数が得られる。さらに、双対木複素ウェーブレット変換の性能を調査し、近似帯域と阻止域の適切な与え方を示す。Selesnickにより提案されたDTCWTは、本論文で提案されたDTCWTの特殊なケースにすぎないことを明らかにする。

第四章では、任意の対称中心を持つ近似的に対称な双対木複素ウェーブレット変換を提案する。複素ウェーブレット変換の解析性を改善するために、まずスケーリングローパスフィルタの群遅延の平坦度とバニシングモーメントを指定し、二つのスケーリングローパスフィルタの周波数特性の差を最小化する。次に、Remezアルゴリズムを用いて定式化し、わずかに数回の反復計算で、誤差関数の等リプル特性を得る。よって、二つのスケーリングローパスフィルタを同時に設計することができる。得られた複素ウェーブレット変換は、直交であり、対称性と解析性が同時に改善できる。さらに、スケーリングローパスフィルタの群遅延が任意に指定できるため、スケーリング関数は任意の対称中心を持つ。また、いくつかの設計例を通じて、本論文で提案された双対木複素ウェーブレット変換の設計手法の有効性を示す。最後に、ノイズ低減の応用例より、本論文で設計された双対木複素ウェーブレット変換が優れたノイズ除去性能を達成できることを明らかにする。

## 論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 王 戴維

審査委員主査 張 熙

委員 高橋 弘太

委員 野村 英之

委員 長井 隆行

委員 ※三橋 涉

双対木複素ウェーブレット変換(DTCWT: Dual Tree Complex Wavelet Transform)は信号処理や画像処理などの多くの分野で応用されている。DTCWTは、二つの実係数フィルタバンクを用いたウェーブレット変換で実行され、それぞれ複素数の実部と虚部に対応する。二つのウェーブレット基底はヒルベルト変換対となる必要がある。その結果、双対木複素ウェーブレット変換は近似的にシフト不変性であり、高次元信号の場合、より良い方向選択性を持つ。本論文では、改善された性質を持つ二種類の双対木複素ウェーブレット変換を提案した。

第二章では、まずフーリエ変換と短時間フーリエ変換について述べ、ウェーブレット変換の基礎を紹介し、時間と周波数領域におけるそれらの比較を示した。次に、双対木複素ウェーブレット変換について述べた。ウェーブレット変換は時間と周波数領域において信号を同時に解析できる有効なツールである。スケーリング係数とウェーブレット係数を効率よく得るため、離散ウェーブレット変換が導入され、離散ウェーブレット変換は、2チャンネルフィルタバンクを用いて実現できる。次に、2チャンネルフィルタバンクの設計条件、すなわち、完全再構成条件と直交条件を説明し、ウェーブレット関数の直交性、対称性やパニシングモーメント等の性質について述べた。さらに、双対木複素ウェーブレット変換の構造を説明し、二つのウェーブレット基底がヒルベルト変換対となることが必要であることを明らかにした。ヒルベルト変換対になるために、二つのスケーリングローパスフィルタが半サンプル遅延条件を満たすことが要求される。最後に、複素ウェーブレット変換の性能を評価するための評価基準を示した。

第三章では、異なる次数の分子と分母を持つ一般的なIIR フィルタを用いて、改善された解析性と周波数選択性を持つ双対木複素ウェーブレット変換を提案した。Selesnickにより提案された共通因子法では、半サンプル遅延条件を満たすために、最大平坦オールパスフィルタが使用された。しかし、得られた複素ウェーブレット変換の解析性が良くなかった。複素ウェーブレット変換の解析性を改善するため、平坦度を指定して近似帯域で等リプル位相特性を持つオールパスフィルタの設計法を提案した。また、スケーリングローパスフィルタの周波数選択性を改善するために、 $z=-1$ における零点の数を指定し、Remezアルゴリズムを用いて、

等リプル特性が得られるように、阻止域の振幅誤差を最小化した。よって、固有値問題を解くことで、容易にフィルタ係数が得られる。さらに、双対木複素ウェーブレット変換の性能を調査し、近似帯域と阻止域の適切な与え方を示した。Selesnickにより提案されたDTCWTは、本論文で提案されたDTCWTの特殊なケースにすぎないことを明らかにした。

第四章では、任意の対称中心を持つ近似的に対称な双対木複素ウェーブレット変換を提案した。複素ウェーブレット変換の解析性を改善するために、まずスケールリングローパスフィルタの群遅延の平坦度とバニシングモーメントを指定し、次に、Remezアルゴリズムを用いて定式化し、わずかに数回の反復計算で、誤差関数が等リプル特性になるように、二つのスケールリングローパスフィルタの周波数特性の差を最小化した。よって、二つのスケールリングローパスフィルタを同時に設計することができる。得られた複素ウェーブレット変換は、直交であり、対称性と解析性が同時に改善できる。さらに、スケールリングローパスフィルタの群遅延が任意に指定できるため、スケールリング関数は任意の対称中心を持つ。また、いくつかの設計例を通じて、本論文で提案された双対木複素ウェーブレット変換の設計手法の有効性を示した。最後に、ノイズ低減の応用例より、本論文で設計された双対木複素ウェーブレット変換が優れたノイズ除去性能を達成できることを明らかにした。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。