

( 続紙 1 )

京都大学	博士 (情報学)	氏名	奥村 成皓
論文題目	Array Signal Processing for Accurate Medical Ultrasound Measurements (高精度医用超音波測定に向けたアレイ信号処理)		
(論文内容の要旨)			
<p>医用超音波装置は医療現場で広く用いられている。X線やmagnetic resonance imaging (MRI)によるイメージングと比べ、安価、非侵襲であり、計測が短時間で終了することは大きなメリットである。しかし、散乱や回折の影響を受けやすく、その解像度と精度は限定される。医用超音波プローブは複数の超音波送受信素子から構成され、アレイとして使用されることが多い。アレイプローブを用いた医用超音波アプリケーションとして、2次元画像化 (B-mode imaging)、骨質の評価 (Bone quantitative ultrasound, Bone QUS)があげられる。本論文ではこれらの高精度化を目指し、アレイ信号処理方法について論じられている。</p> <p>第1章では、本論文の基礎となる医用超音波の原理やそのアプリケーションを概観している。まずB-mode imagingの原理やBone QUSの原理について述べられている。次に本研究で対象とした皮質骨の評価で用いられるガイド波の原理について述べている。更に、本論文の測定対象である皮質骨は局所的に横等方性の板とみなすことができ、伝搬するガイド波は多次のモードから構成されることが述べられ、多次のモードの位相速度・波数を推定する意義と、その原理について述べられている。最後にこれら医用超音波のアプリケーションとアレイ処理の関係について説明し、その理論と実際の計測における差異やその問題点について明らかにしている。</p> <p>第2章では適応型アレイ信号処理を用いた低計算量かつ高解像度なB-mode imaging方法について論じられている。まず、B-mode imagingにおいて解像度を向上する際に問題となる計算量を削減できる従来のBeam space (BS) Capon法の原理と、BS Capon法においてさらなる計算量削減が可能であることが示されている。次に計算量が増加する原因が、用いられるアレイ処理は狭帯域信号処理を仮定しているにも関わらず、実際の計測では広帯域信号が使用されていることであることが示されている。そこで、イメージング領域の中で、広帯域・狭帯域信号処理の差が小さくなる箇所があることに着目し、広帯域信号処理の一部を狭帯域信号処理に置き換える、低計算量かつ高精度なイメージング方法を提案している。実験の結果、低計算量かつ高分解能なイメージングに成功している。</p> <p>第3章では皮質骨の評価に向けたBone QUSの精度向上を目指した適応型アレイ処理方法が論じられている。まず、皮質骨の中を伝搬するガイド波の位相速度を推定する方法として、適応型信号処理の中でも高解像度なestimation of signal parameters via rotational invariance techniques (ESPRIT)法が原理的に適しているが、受信信号の中に存在するモード数の推定が必要であることが問題であることが述べられている。そこで測定に用いるアレイ内部に複数の異なる大きさのサブアレイを構成し、その大きさを変更することでモード数を厳密に推定せずに位相速度を推定する方法が提案されている。銅板を用いた実験の結果、高精度な位相速度推定を達成している。</p> <p>前章の方法では、サブアレイサイズを変更する毎に計算量の大きい位相速度・波数推定を行う必要があった。そのため第4章では情報量基準を用いて計算量を削減し、</p>			

モード数を正確に推定する方法が提案されている。情報量基準を使用する場合、安定化が必要であり、これは受信信号から構成される相互相関行列に疑似雑音を加えることで達成されることが述べられている。しかし、疑似雑音の決定方法は知られていないため、疑似雑音と推定される波数の関係に着目し、その決定方法が提案されている。銅板と骨を模擬した樹脂板を用いて高精度に波数を推定できることを示している。

前章までは多数の超音波素子を用いた方法について論じられてきた。第5章では低コストシステムの実現を目指して使用する超音波素子数の最小化に取り組み、1送信素子、2受信素子のみを用いた方法が提案されている。2受信素子を用いた場合、原理的に1モードの位相速度のみ推定可能である。そこで、まずガイド波の特定のモードが低周波数領域で卓越することを利用し、位相速度の候補を推定する方法について論じられている。次に、位相速度の候補を測定対象の物理パラメータの候補に変換する方法が論じられ、最後に、受信信号波形も物理パラメータに依存することを用いてフィッティング処理を適用する物理パラメータを決定する方法が提案されている。銅板を用いた実験の結果、合計3超音波素子を用いて測定対象の物理パラメータである縦波速度・横波速度・厚みを高精度に推定できることを示している。

最後に第6章では、本論文で得られた成果をまとめ、今後の課題を示している。

注) 論文内容の要旨と論文審査の結果の要旨は1頁を38字×36行で作成し、合わせて、3,000字を標準とすること。

論文内容の要旨を英語で記入する場合は、400～1,100 wordsで作成し

審査結果の要旨は日本語500～2,000字程度で作成すること。

(続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

本論文は医用超音波アプリケーションであるB-mode imagingとBone QUSにおける、高精度な測定を目指してアレイ信号処理方法を提案している。得られた主な成果は以下の通りである。

(1) 低計算量かつ高解像度なB-mode imagingの方法として知られるBeam space (BS) Capon法の更なる計算量低減方法を提案した。実験の結果、水中に近接して存在する2つの孤立金属目標の描出に成功し、計算時間を13%に削減した。これにより、これまで計算量の制約上困難であった適応型アレイ処理を用いた高解像度超音波B-mode imagingの実現可能性を示した。

(2) 皮質骨の評価に重要なガイド波の位相速度・波数推定においてESPRIT法が有効である。しかし、推定するガイド波のモード数を推定する必要があるという問題点を解決するため、使用するアレイを様々なサイズを持つ小さなサブアレイに分割して推定を行う方法を提案した。実験において、2mmの銅板の位相速度を推定し、誤差1.3%での位相速度推定に成功し、従来法より測定可能範囲を2倍に拡張した。

(3) 上述の方法ではサブアレイサイズを変更する毎に計算量の大きい位相速度推定を行う必要であった。それを解決するため、情報量基準を用いた波数推定方法を提案した。その結果、4mmの銅板・骨模擬版において、誤差4%未満での測定に成功し、計算時間は0.5秒未満であった。これはESPRIT法を用いた高解像度位相速度・波数推定が実時間で実現できる可能性を示した。

(4) ガイド波が伝搬する媒質の物理パラメータを推定するには比較的大規模なアレイが用いられてきた。低コストシステムの実現を目指して、1送信素子、2受信素子を用いて物理パラメータを推定する方法を提案した。その結果、銅板の物理パラメータを誤差7.5%以下で推定することに成功した。銅板は皮質骨より単純なモデルではあるが、低コストシステムの実現可能性を示した。

以上要するに本論文は、医用超音波のためのアレイ信号処理方法を提案するとともにその有用性並びに優れた特性を明らかにしたものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって本論文は博士(情報学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成30年2月9日に実施した論文内容とそれに関連した口頭試問の結果合格と認めた。

注) 論文審査の結果の要旨の結句には、学位論文の審査についての認定を明記すること。更に、試問の結果の要旨(例えば「平成 年 月 日論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果合格と認めた。」)を付け加えること。

Webでの即日公開を希望しない場合は、以下に公開可能とする日付を記入すること。  
要旨公開可能日： 年 月 日以降