

学 位 論 文 題 名

相関法を用いた単一超音波ビームによる変位・流速ベクトルの計測

学位論文内容の要旨

本研究は、相関法を用いた単一超音波ビームによる組織変位・血流速度ベクトルの計測について、研究成果をまとめたものである。

超音波を用いた血流速度の計測には、一般にドプラ法が用いられている。しかし、ドプラ法は原理的に超音波ビーム軸に直交する流れを計測できない。これに対し、従来よりビーム軸に直交する流れを計測しようとする研究がなされ、これまでに、超音波エコー信号が散乱体の移動とともに揺らぐことに着目し、ゆらぎの周波数から速度を検出する fluctuation velocimeter, 直交する流れによりドプラスベクトルが拡散することを利用し、そのスペクトルの拡がりから速度を検出する transverse Doppler法が提案されている。これらは、いずれも包絡線検波あるいは直交検波されたエコー信号を対象としているが、本論文では、検波前のRFエコー信号を対象とし、RFエコー信号間の相関を利用して変位あるいは速度を検出する手法を提案した。本手法は、一定時間間隔で取得したエコー信号の相関の低下よりビーム軸直交成分を、相関ピーク値の時間偏移からビーム軸方向成分を検出し、単一超音波ビームで変位・流速ベクトルを計測する手法である。本論文では、本手法の理論式を導出し、シミュレーションでその妥当性を検証するとともに、計測特性の系統的解析を行い、さらに基礎実験と生体計測でその有効性を確認した。本論文は7章で構成されている。

第1章では本研究の背景、目的、論文の構成を述べた。

第2章では、本手法の計測原理に関する理論解析を行い、変位と相関関数の関係を記述する理論式を導出した。理論解析より、散乱体の移動に伴う相関関数の減少には2種の原因があることを見いだした。ひとつは超音波ビームへの不規則散乱体の流入と流出によりビーム内の散乱体が入れ替わることに起因する粒子交代因子であり、他のひとつは波面の進行方向と粒子の移動方向が直交しないことによる非直交因子である。さらに、理論式を実際の実験用非集束ビームと集束ビームへ適用する場合のビーム形状とビーム幅を音場解析により検討した。

第3章では、シミュレーションにより、理論式の妥当性を検討した。非集束ビームと集束ビームの両者について3次元モデルを構成し、不規則散乱体を移動させながらエコー信号の相関値を計算した。ビーム軸直交成分と相関値、ビーム軸方向成分と時間偏移の関係を求め、理論値とシミュレーションの結果がよく一致することを示した。また、種々のビーム入射角でシミュレーションを行い、単一超音波ビームによりビーム入射角を測定する妥当性を検証した。

第4章では、各種パラメータと計測特性の関係を、理論値とシミュレーションの比較により系統的に解析した。非集束ビームと集束ビームの両者について、サンプリング位置、振動子径、超音波中心周波数などが相関値にどのように影響するかを解析した。その結果、十分な遠距離音場では非直交因子が、近距離では粒子交代因子が支配的であること、集束ビームでは非集束ビームに比べ粒子交代因子の影響が大きいこと、超音波ビームがガウシアンで近似できれば導出した理論式を任意の場合に適用できることなどを明らかにした。

第5章では、基礎実験により本手法の計測精度に関する検討を行った。計測精度を検証するために、散乱体の変位と速度、および流速分布に関する実験を行い、いずれも変位・流速測定値の最大計測誤差は10%，ビーム入射角の計測誤差は3°以内であることを確認できた。また、管内の定常流の流速分布を高い精度で計測する可能性を示した。

第6章では、本手法を用いて実際に生体内の組織変位や血流速度を計測する応用計測について検討した。ヒト肝臓実質の微小変位を*in vivo*測定し、1 mm以下の拍動を十分な精度で検出できることから、超音波エラストグラフィの新たな手法としての可能性を見いだした。また、ヒト頸動脈の血流計測を試み、ビームと直交し、かつ拍動流である血流を測定することができた。さらに、血管内超音波法（IVUS）に本手法を応用し、流れの有無による血管内腔像の明瞭な描出に有効であることを示した。

第7章では、結論として本研究の成果を総括した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 本 克 之

副 査 教 授 下 澤 楯 夫

副 査 教 授 栗 城 眞 也

副 査 教 授 河 原 剛 一

学 位 論 文 題 名

相関法を用いた単一超音波ビームによる変位・流速ベクトルの計測

超音波を用いた血流速度の計測には、一般にドプラ法が用いられているが、ドプラ法は原理的に超音波ビーム軸に直交する流れを計測できない。これに対し、ビーム軸に直交する流れを計測しようとする研究がなされており、これまでに、不規則散乱体の移動とともに超音波エコー信号が揺らぐことに着目した fluctuation velocimeter, 直交成分によりドプラスペクトルが拡散することを利用した transverse Doppler 法が提案されている。これらは、いずれも包絡線検波あるいは直交検波されたエコー信号を対象としているが、本論文は、検波前の RF エコー信号を対象とし、RF エコー信号間の相関を利用して、不規則散乱体の変位あるいは速度をビーム軸直交成分と軸方向成分の両者に関して同時計測する手法を提案したもので、本手法の計測特性を理論的、実験的に解析するとともに、生体計測への可能性をいくつかの実測により検証している。本論文の成果は、以下のように要約される。

1. 提案手法の理論解析を行い、変位と相関関数の関係を記述する理論式を導出している。理論解析より、散乱体の移動に伴う相関関数の減少には2種の要因、すなわち超音波ビームへの不規則散乱体の流入と流出によりビーム内の散乱体が入れ替わることによる粒子交代因子、および波面の進行方向と粒子の移動方向が直交しないことによる非直交因子があることを見いだしている。また、理論式を実際の実験用非集束ビームと集束ビームへ適用する場合のビーム形状とビーム幅を音場解析により検討している。

2. 非集束ビームと集束ビームの両者について3次元モデルを構成し、不規則散乱体移動時のエコー信号の相関値を計算し、ビーム軸直交成分と相関値、

ビーム軸方向成分と時間偏移の関係を求め、理論値とシミュレーションの結果がよく一致することを確認している。また、種々のビーム入射角でシミュレーションを行い、単一超音波ビームによりビーム入射角を測定する妥当性を検証している。

3. 非集束ビームと集束ビームの両者について、サンプリング位置、振動子径、超音波中心周波数など各種パラメータが相関値にどのように影響するかを理論とシミュレーションにより系統的に解析している。その結果、十分な遠距離音場では非直交因子が、近距離では粒子交代因子が支配的であること、集束ビームでは非集束ビームに比べ粒子交代因子の影響が大きいこと、超音波ビームがガウシアンで近似できれば導出した理論式を任意の場合に適用できることを見いだしている。

4. 本手法の計測精度を明らかにするため、散乱体の変位と速度、および流速分布に関する基礎実験を行い、変位・流速測定値の最大計測誤差は10%，ビーム入射角の計測誤差は3°以内であることを確認している。

5. 本手法を用いて実際に生体内の組織変位や血流速度を計測し、本手法の実用性を検討している。ヒト肝臓実質の微小変位を*in vivo*測定し、1 mm以下の拍動を検出して、超音波エラストグラフィの新たな手法としての可能性を見いだしている。また、ヒト頸動脈の血流計測を試み、ビームと直交し、かつ拍動流である血流速度を測定している。さらに、血管内超音波法（IVUS）に本手法を応用し、流れの有無による血管内腔像の明瞭な描出を実現している。

これを要するに、本論文は、超音波ビームに直交する変位・流速の計測手法を考案し、その計測特性を理論、シミュレーション、基礎実験で系統的に解析するとともに、生体計測でその有効性を確認したもので、医用超音波工学の分野に寄与するところ大である。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。