人体を透過させた超音波を用いた人間の動作推定および 認識に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、人間-機械系におけるインターフェース、バイオメカニクス分野での運動解析などのニーズから、人間の運動計測への期待が高まっている。近年活発に研究されている人間-機械系に、人間の作業負担を軽減するパワーアシストシステムがあり、その制御入力として筋の情報から関節の運動を推定するセンサが必要となっている。この用途のセンサとして筋電図 (EMG) が広く研究されている。EMG は筋活動により生じる電位変化と筋活動による筋発揮力との関係が明確であるため、運動の推定に利用されてきた。

しかしながら、電気ノイズの発生する環境下ではその影響を受けるという問題があり、これを補償する手法が必要となっている。また、複数の種類のセンサを併用することにより個別のセンサに不全が生じた場合の誤動作を回避する研究が進められており、EMG と併用可能なセンサが求められている。この際、人間-機械系のアプリケーションでは人間に対して優しい設計が求められ、センサには小型であることや、できるだけ柔軟性の高い素材で作成できることが望まれている。

本論文では超音波センサを利用した関節トルク・角度推定および認識手法を提案する。これを透過超音波法と呼ぶ。本手法では皮膚上から筋を含む生体に超音波を照射、生体を透過させ、再度皮膚上で得られた超音波を捉える。この透過超音波の波形は筋や腱の動き、すなわち関節の運動によって変化するため、逆に透過超音波により関節の運動推定と認識を行なうことができる。提案手法は一般的な超音波診断装置と異なり、生体構造の画像化を目的とせず簡便・高速な処理が可能である。本論文では、生体を透過させて得られた超音波波形から特徴量を抽出し、それが人間の関節の運動と関係性があることを示し、この事実に基づいて人間の関節の運動が可能であることを実験的に示す。また、認識器の特徴を活用し、計算量軽減のために特徴量の選択を行なう戦略について述べ、有効性を示す。

第1章では、従来の人間の動作推定・認識手法について述べ、その問題点を示し、本研究の位置付けと目的を明確にする。

第2章では、透過超音波法の詳細について説明する。

ここではまず実験のために構築したシステムについて述べ、関節トルクあるいは関節角度の変化によって、透過超音波の波形が変化する事を示す。この波形の変化に基づいて関節の運動を推定するために、まず波形と関節運動との関係性について明らかにする。超音波の検出の仕方には対向させた受信子で直接透過した波形を検出する方法と生体内で一度反射した波形を検出する方法があるが、ここでその差異について述べる。

第3章では、波形の変化を代表する特徴量について考察し、本論文で採用する特徴量を定義する。

その後、特徴量を入力し、推定・認識結果を出力するための動作推定器および動作認識器について述べる。動作推定では連続値での出力が可能であり、認識器では量子化された動作状態の出力が可能である。認識器を用いることで、後述する認識に有効な特徴量の選択が可能になる。

第4章では、第3章で定義した特徴量を入力として動作推定・認識器を使用し、動的な環境下での関節トルク・角度の推定が可能であることを実験的に示す。推定・認識精度を表す指標として、相関係数および平均誤差、動作認識正答率を算出した結果を示す。

第5章では、認識器の特徴を活用し、特徴量の選択を行なう戦略について述べる。本論文で提案したセンサは個人ごと、および皮膚への取り付けごとに認識器の適応を実施する必要がある。これに要する計算時間は、一般的に特徴量が多くなるほど長くなる。本章では計算時間短縮のために、特徴量の数を削減するための1つの指標を提案する。この際、可能な限り認識精度を維持することを目標とした。

提案した削減手法に基づき、特徴量の削除を実施していった場合の正答率と計算時間の関係を示し、これによって提案した特徴量削除指標の有効性を示す。また、この結果をもとに筋の動作の変遷についての考察を行なう。

第6章は本論文の結論である。

学位論文審査の要旨

主 査 准教授 田 中 孝 之
副 査 教 授 金 子 俊 一
副 査 教 授 金 井 理
副 査 教 授 清 水 孝 一

学 位 論 文 題 名

人体を透過させた超音波を用いた人間の動作推定および 認識に関する研究

近年、人間機械系やバイオメカニクス分野において、人間の運動計測への期待が高まっている。例えば人の作業負担を軽減するアシストシステムが活発に研究されており、制御入力として筋の情報から関節の運動を推定するセンサや推定手法が求められている。関節運動はトルクと角度に分けられる。関節トルク推定用センサとして筋電図 (EMG) が広く研究されている。EMG は筋活動に伴う電位変化と筋発揮力との関係が明確であるため広く利用されてきた。しかしながら、関節トルクからは運動学モデルを用いず関節角度を推定することはできない。また電気ノイズの影響に関する問題がある。関節角度推定には、ゴニオメータ等を人体に取り付ける手法やカメラを用いて関節角度を画像上で求める手法がとられてきた。しかし、同様にモデル無しでの関節トルク推定はできない。

本論文では、人体を透過させた超音波を用いて、関節トルクと角度を同時に推定・認識する手法(透過超音波法)を提案している。本手法では皮膚上から筋を含む生体に超音波を照射、透過させ、再度皮膚上で捉える。透過超音波の波形は筋や腱の動き、すなわち関節運動により変化するから、逆に透過超音波から関節運動を推定・認識できる。提案手法は一般的な超音波診断装置と異なり、生体構造の画像化を目的とせず簡便・高速な処理が可能であるとしている。

本論文では、透過超音波波形から抽出された特徴量が関節運動と関係があることを示し、関節トルクと角度を同時に推定・認識できることを実験的に示している。また、運動認識器の特徴を活用し、計算量軽減のために特徴量選択を行なう戦略について述べ、有効性を示している。

第1章では、従来の運動推定・認識手法について述べ、本研究の位置付けと目的を明確にしている。

第2章は透過超音波法の説明である。実験システムについて述べ、関節トルクあるいは角度の変化により透過超音波波形が変化することを示している。超音波振動子の取り付けの仕方によって検出される波形が異なり、その違いにより直接波検出方式と反射波検出方式とがあることを述べている。

第3章では、波形変化を代表する特徴量について考察し、動作推定器および動作認識器の入力として採用する特徴量を定義している。第4章では、第3章で定義した特徴量を使用しての関節トルク・角度推定実験について述べている。推定精度の指標として相関係数と平均誤差を算出し、提案手

法を用いて関節トルクと角度の同時推定が可能であることを明らかにしている。

第5章では、運動認識に透過超音波法を適用するとともに、認識器の特徴を活用して特徴量選択を行なう戦略について述べている。提案手法では超音波振動子の取り付けごとに推定器・認識器の適応が必要であり、処理時間は特徴量数に依存するため、処理時間短縮を目的とした特徴量削減のための1つの指標を提案している。

第6章は本論文の結論である。

第2章では超音波を使用することで電氣的ノイズへの耐性獲得が可能であることを示している。これに関して、超音波が電気信号に変換された部分では電気ノイズが混入し得るため、説明に留意が必要と指摘したが、提案された透過超音波法は従来に無い独創的な運動推定方法であると評価した。

第3章と第4章で述べられた運動推定では、超音波の周波数や透過時間、減衰量の変化を包含する特徴量として、検出した超音波波形を6区間に分割した上で算出した整流積分値を採用しており、容易な処理での運動推定を可能にしていることを評価した。一方で、特徴量として周波数や透過時間の変化そのものを採用することで精度向上が期待できる旨の提言を行なった。また、波形変化のさらなる解析や超音波発振パタンの工夫も精度・機能性向上に繋がると指摘した。

第5章については、透過超音波法を運動認識に適用できることを示していること、さらに、提案した特徴量の効率化手法に基づいて特徴量を削減した場合の正答率と計算時間の関係を示し、有効性を示していることを評価した。本論文での運動認識は8つの角度クラスと9つのトルククラスを合わせて72クラスの運動認識となる。一方、具体的な運動認識適用事例を考え、クラスの数や分割法に関して検討を行なうことで、さらに有用性が高まるとの意見を述べた。

以上を要するに、著者は、人体を透過させた超音波を用いて人間の関節トルクと関節角度とを同時に推定・認識する手法を実現し、実験的にその有用性を明らかにした。この手法は従来にない新規性の高い手法である。また、運動認識器の特徴を利用した、計算高速化のための特徴量削減手法を提案し有用性を示している。本研究の成果は、運動計測分野や人間機械系分野の発展に寄与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(情報科学)の学位を授与される資格あるものと認める。