Osaka University Knowledge Archive

| | |
|---|---|
| Title | 引きつれ効果を考慮した生体粘弾性パラメータのアクティブセンシング |
| Author(s) | 田中, 信行 |
| Citation | 大阪大学, 2011, 博士論文 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://hdl.handle.net/11094/24875 |
| rights | |
| Note | |

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

【81】

| | |
|---|---|
| 氏　　名 | 田　中　信　行（たなか　のぶ　ゆき） |
| 博士の専攻分野の名称 | 博　士（工　学） |
| 学　位　記　番　号 | 第　２４５６６　号 |
| 学 位 授 与 年 月 日 | 平成 23 年 3 月 25 日 |
| 学 位 授 与 の 要 件 | 学位規則第４条第１項該当<br>工学研究科機械工学専攻 |
| 学　位　論　文　名 | 引きつれ効果を考慮した生体粘弾性パラメータのアクティブセンシング |
| 論 文 審 査 委 員 | （主査）<br>教　授　金子　　真<br>（副査）<br>教　授　大須賀公一　　教　授　澁谷　陽二 |

## 論 文 内 容 の 要 旨

生体柔軟組織では力印加部だけでなく，その近傍まで引きつられて変形するため，引きつれ度合いも考慮した弾性評価方法の構築が望まれていた．さらにこの変形特性に起因して，力印加時と力遮断時で変形の応答特性が異なる方向依存型応答特性が現れることが知られていた．本論文では，4つの線形粘弾性パラメータで引きつれ効果と方向依存型応答特性が表現できるシンプルな生体柔軟組織モデルを構築し，力印加と組織の変形情報から4つの粘弾性パラメータを推定する逆問題について考察することを目的として研究を行った．このモデルは位置と粘弾性パラメータが積の形で現れるため，運動方程式は一般に非線形になるものの，表面形状が計測可という条件を付与することによって粘弾性パラメータに関して線形方程式に帰着できることを示した．この逆問題に関して，解の存在性及び一意性はモデルの節点数とサンプリング数から決まり，また解の推定精度は力印加時だけでなく力遮断時のデータもサンプリングすることで向上することを指摘した．また定常状態だけに着目すると，力印加点で大きさが異なる力を複数回印加することで2つの弾性パラメータが近似的に推定できることを示した．提案手法をヒト肌変形に適用するため，応答時定数1[ms]を有する空気噴流を利用した力印加系とフレームレート2000[fps]を有する高速カメラを用いた変位取得系の二つからなる実験システムの構築を行った．ヒト肌表面にスリットレーザを照射し，レーザ光を高速カメラで捉えることでヒト肌の変形形状の非接触計測を行った．提案手法を用いて印加力と表面の変形形状から逆問題を解いてパラメータ推定を行い，さらに推定されたパラメータを用いて順問題を解いた結果，モデルは引きつれ効果だけでなく方向依存型応答特性も明快に表現できることを示した．また実験結果から，3×3の節点数を有するモデルであれば力印加点だけの計測データを用いたパラメータ推定であっても，表面変形全体の計測データを用いた場合と同等のパラメータ推定が可能であることを確認した．今後の展開として，提案モデルの順問題計算の高速性に着目し，ハプティックシステムでの反発力計算やポイント変位計測による小型センサを利用した低侵襲手術下での組織弾性評価への応用可能性についても述べた．

## 論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

本論文では，生体柔軟組織の粘弾性の定量化を目指し，組織に対して空気噴流を用いて力印加した際に生じた変形を非接触計測することにより，印加力と変形データから生体組織粘弾性を推定する逆問題手法について論じている．

第１章では，生体柔軟組織に力印加した場合に発生する特徴的な特性である「引きつれ効果」，「方向依存型応答」を考慮する必要性および生体柔軟組織モデルの簡易表現としてバネ・ダンパモデルを用いる利点について述べている．また，本論文のアプローチ手法と従来研究との比較を行い本研究の位置づけを明確にしている．

第２章では，ヒト肌を対象として変形計測実験を行っている．実験装置として，圧縮空気を高速電磁弁で制御することで 1[ms]オーダの高応答性を有する力印加系と，2000[fps]のフレームレートを有する高速カメラを組み合わせた非接触変形計測装置を構築している．

第３章では，引きつれ効果と方向依存型応答を表現可能なモデルについて考察し，４つの粘弾性パラメータで構成されたシンプルな粘弾性モデルを提案し，運動方程式の定式化，シミュレーションによるモデル特性評価を行っている．

第４章では，力印加時の表面変形形状が既知であるという条件において，モデルの運動方程式は４つの粘弾性パラメータを変数とする線形方程式に帰着するということを明らかにし，この線形方程式を解くことによってパラメータを決定する逆問題を定式化している．また逆問題の適切性について解析的・数値的に考察している．

第５章では，力印加時の力と変位データが２点以上既知であるという条件において，計測データとモデルの力-変位データとの差を最小化する非線形最小二乗問題を定式化し，これを反復計算によってモデルの２種類のバネの値を決定する逆問題解法を提案している．また数値シミュレーションを行い，反復計算時の初期値依存性を回避する手法について考察している．

第６章では，提案手法をヒト肌変形に適用した結果を示している．第４章の表面変形計測に基づく推定法を用いて得た推定パラメータを使うことで実際に引きつれ効果および方向依存型応答を伴う変形応答を表現できることを示している．第５章のポイント変位計測に基づく推定法では力印加点の変位だけでなく，周辺部の未知変位も再現でき，また 3×3 モデルを使うことでポイント変位計測でも表面変位計測と同等の計測ができることを示している．

第７章では，本論文の成果をまとめるとともにハプティックシステムへの応用を視野に入れて今後の展開について述べている．

以上のように、本論文は引きつれ効果と方向依存型応答特性を有する生体柔軟組織の粘弾性パラメータ推定法を提案し，ヒト肌に対する適用結果を示している．よって本論文は博士論文として価値あるものと認める．