

論文の内容の要旨

論文題目 医用画像に基づいた乳房変形の
粒子法シミュレーションに関する研究

氏 名 志野 亮作

現在日本は先進国の中で唯一乳がんの死亡率と罹患率がともに増加傾向にあり、その対策をしなければならない状況にある。乳がんの検査治療にはX線マンモグラフィー、超音波画像診断、MRIなどのモダリティ機器が単独で用いられているのが現状だが、複数のモダリティの画像を同時に参照し医療行為を行えるような機器を用いることにより、各モダリティ機器単独ではアプローチが難しかった腫瘍や病変に対しても検査や施術が行えるようになると期待されている。このようなマルチモダリティ機器には、異なるモダリティ画像の画素の位置の対応をとり関心領域がそれぞれの画像のどの位置に撮像されているのか特定するのが不可欠となる。しかし、モダリティ機器によって撮像体位は異なる上に、体組織は重力や外力により変形を生じる場合がある。たとえば肝臓などのような硬く変形が生じにくい組織・臓器の場合には異なるモダリティであっても位置の対応を取るの容易であるが、乳房のように柔らかく撮像体位により画像のスライスを横断するような大きく複雑な変形を起こす組織を対象とした場合、撮像体位の異なる複数のモダリティ画像間の位置の対応を取るの困難である。

そこで本研究では、生体のような複雑な形状に対してメッシュを生成せず解析を行うことが可能な粒子法（MPS法）を用いて、体位の変化に伴い生じる乳房形状の変形を解析し、結果を画像に反映することによって、撮像体位の異なる2枚のモダリティ画像の位置の対応を取る技術を提案し、その検証を行うこととする。本手法は乳房変形を考慮した手法であるため、乳房のような撮像体位の変化にともない大きく変形する組織に対しても適用が可能である。また、単純に画像の画素値のみを用いて位置の対応を取る手法と異なり、異なるモダリティの画像の位置合わせに用いることができる。さらに、有限要素法（FEM）を用いて乳房の変形を解析する手法と比較して、解析用データの作成が容易であるという利点がある。

乳房を模した半球形状で行った解析及び検証について述べる。半径50mmの半球に脂肪の物性値であるヤング率1000Paを設定し、ポアソン比は0.49として検証を行った。まず標本解をFEMにより導出し、粒子間距離を5mm、2mm及び1mmと設定したMPS

弾性体解析の結果と比較することによってMPS弾性体解析の空間解像度と精度の関係について検証した。その結果、標本解では頭頂部で6mm程度の変位が生じているのに対し、MPS弾性体解析では0.3mm程度大きい値に収束することが確認された。次に、弾性解析に必要な初期形状（変形を生じていない形状）を得るための検証を行った。医用画像に撮像された乳房は腹臥位であれば背から腹の方向に重力がかかっており、背臥位であればその逆向きに重力がかかっている。無重力状態における初期形状は、両者のどちらとも異なるだけではなく、実際にこれを求めるのには逆問題を解く必要があり、計算時間がかかる。そこで本研究では、初期形状を求める過程を省略し、腹臥位形状を無重力状態における初期形状と仮定し、2倍の重力をかけて変形させることにより背臥位形状を計算することとした。さらに、弾性解析の信頼性を向上させるために、事前情報を用いて解の補正を行う手法について検証を行った。この手法では乳房にマーカーを付して画像を撮像するなどの方法により、表面位置などでは画像間の位置の対応がとれ変形の情報が得られる場合があることを利用する。半球粒子モデルの表面一層に対してFEMで求めた標本解を与えて解析を行い、結果を標本解と比較した。その結果、表面に対して標本解を与えることにより、空間解像度の向上に伴い半球内部においても標本解に収束することが確かめられた。最後に、ヤング率同定手法について検証を行った。乳房の形状や硬さには個人差があるが、先述した部分的に得られている乳房の変形情報をもとにデータ同定手法で硬さを推定することができると考えられる。それを検証するために、半球粒子モデルの表面一層に対してFEMで求めた標本解を観測値として与え、拡張カルマンフィルタを用いてヤング率同定を行う解析を行った。その結果、観測雑音とシステム雑音がともに出来るだけ小さい方が良く、収束値は観測雑音の分散値に依存しないことなどが明らかとなった。

実際の乳房を撮像したMRI画像を用いて行った検証について述べる。対象となる胸部腹臥位MRI画像に対して、皮膚、脂肪、軟組織、筋肉、腫瘍の領域をマニュアルで特定し、各領域に粒子間距離2mmで格子点を生成して乳房粒子モデルを作成した。次に生成した乳房粒子モデルを用いて初期形状の検証を行った。半球形状と同様に、粒子数2個分程度の微小な誤差に収まるので、本研究では2倍の重力をかけて背臥位形状を計算した。次に、妥当な境界条件について考察するために、様々な境界条件を設定して解析を行い、結果を腹臥位MRI画像と位置合わせを行った背臥位MRI画像と比較することによって検証を行った。位置合わせはマニュアルで抽出した肋骨形状同士を剛体位置合わせし、細かな傾き等を両画像を目視で比較しながらマニュアルで補正することで行った。初めに、粒子全てをヤング率1000Pa、ポアソン比0.49と設定し、胸骨側の境界をスライド境界、腹側の境界を自由境界、肩側の境界を固定境界、背中側の境界をスライド境界、腕側の境界を自由境界として解析を行った。この境界条件では、重力方向への潰れは定性的には再現されるが体側方向への組織の流れが底部境界（背中側の境界）により止められてしまうため再現されなかった。次に、体側方向への組織の流れが阻害されないよ

うに境界に粒子を追加して拡張した拡張粒子モデルを用いて解析を行った。物性値及び境界条件は先述した境界条件と同様とした。この境界条件では先述の境界条件と比較して体側方向への組織の流れも再現することができたが、流れが過大となってしまった。これは腕側の境界を固定せず自由境界としてしまったために、本来ならば乳房組織に加わらない腕の重量も乳房組織にかかってしまったためと考えられる。これをふまえ、腕側の境界を固定境界として解析を行った。この境界条件では定性的な挙動がほぼ再現されたが、定量的にはまだ誤差が存在し、物性値に再考が必要であった。そのため、境界条件はそのままヤング率を下げた解析を行った。ヤング率を下げることにより、体表位置及び腫瘍位置で妥当な解を得ることができたが、乳房内部と体表位置の双方で妥当な解を得ることはできなかった。最後に、胸筋のみ1000Paとし、他の組織を全て1000Paとして解析を行った。内部組織である胸筋が潰れないまま体表位置で妥当な結果を得ることができた。このことから、より適切に物性値を各組織に設定することにより、内部と体表双方で妥当な解を得ることが可能であると考えられる。

本研究では、撮像体位の異なる別のモダリティ画像の位置合わせのために、背臥位MRI画像をもとにMPS弾性解析を用いて腹臥位MRI画像を生成する手法を開発した。半球形状モデルを用いてMPS弾性体解析や初期形状同定、データ同化手法の基礎検証を行った。さらに、実際の医用画像を用いて乳房粒子モデルを作成し、境界条件や物性値について検証を行った。計算結果は計測データとよく一致した。今後の課題としては、乳房の各組織毎に物性値を与えて解析を行うこと、物性の個人差に関してデータ同化手法を適用することなどにより扱えるようにすること、複数の患者の医用画像を用いて検証をさらに進めることなどが考えられる。