

審査の結果の要旨

氏名 伊藤 広貴

本研究は粒子法を用いた肺の呼吸性移動のシミュレーションに関する研究で、8章より構成されている。

第1章は序論であり研究の背景、関連研究、本研究の目的および本論文の構成が示されている。肺がんは日本人のがんによる死因の第一位を占め、肺がんの放射線治療に対する期待度は大きい。しかし、呼吸性移動を伴う肺などの臓器を放射線治療の対象とする場合、腫瘍付近の広範囲の正常組織に放射線が照射されてしまう。そこで本研究では、肺の呼吸による変形を粒子法によりシミュレーションする技術を開発するとしている。

第2章では肺の解剖学的知見と呼吸のメカニズムをまとめるとともに、これらを基礎として本研究の全体像を提示している。

第3章ではCT画像から肺形状を作成する手法について述べられている。呼気時および吸気時のCT画像を取得し、粒子法シミュレーションに用いる粒子配置を呼気時のCT画像をもとに作成する。まず、関心領域を解析対象の肺野領域に設定したうえで適切な閾値を用いてCT値の低いクラス（肺、空気等）のみを抽出する。閾値で2値化処理を行い大まかな胸郭領域を抽出し、各肋骨・胸椎・胸骨領域に対して別々にラベリングを施す。等方性ボクセルとなるようにボリュームデータを変更する。次に、モルフォロジー演算を施し、領域拡張法により肺野領域を抽出し空気領域を除去する。最後に、初期粒子配置のファイルに変換する。

第4章では肺変形のシミュレーションが述べられている。肺変形の過程はハミルトン力学に基づいた弾性解析手法によって表現されている。この手法は重み付き最小自乗近似によって粒子位置で変形勾配テンソルを近似し、これらを足し合わせることで離散的なハミルトニアンを定式化している。シンプレクティックスキームを適用することでエネルギー保存に優れたものになっている。弾性体の構成則としてSaint Venant-Kirchhoffモデルを用いて表現する。物性値は患者個人のものでなく、文献から一般的な値を採用している。

第5章では解剖学的知見に基づいた胸郭の運動モデルが提案されている。呼吸運動の主な要因は、胸骨と胸椎によって支持される12対の肋骨により構成される胸郭の運動と横隔膜の運動である。肺変形シミュレーションの境界条件としてこれらの運動の影響を反映させる。胸郭粒子及び横隔膜粒子の移動量と移動方向は、呼気時と吸気時のCT画像からテンプレートマッチングによって導出されている。横隔膜の運動はテンプレートマッチング結果を利用し横隔膜粒子の強制変位によってその運動を模擬し、胸郭の変位量はテンプレートマッチング結果から算出し、肺野輪郭の運動は胸郭の運動の影響を与える。さらに、他の体幹部領域は他の粒子の変位量から外挿するとしている。

第6章では、粒子法シミュレーション結果の粒子の変位情報を用いて、時系列3DCT画像を構成する手法が提案されている。まず、粒子法シミュレーションの結果から各時刻における全ボクセルの変位ベクトルを導出する。この変位ボクセルからForward Warming またはBackward Warmingを用いて呼気時のCT画像から時系列3DCT画像を構成する。Forward WarmingとBackward Warming画像を比較し、Backward Warmingの有用性を確かめている。

第7章では、これまで述べてきた提案手法の有効性を、合計3人の患者の呼気と吸気時CT画像を用いて検証している。肺内部の評価点の呼気と吸気間における変位量をシミュレーションの変位量と比較し、肺変形の運動に大きく寄与する横隔膜と胸郭の運動はよくシミュレーションに反映できていることが示された。ただし、心臓に近い領域、背側の領域、気管支上の評価点のシミュレーションの動きと実際の動きはあまり合っていない。体表面や胸郭の輪郭、横隔膜の位置は概ね一致していた。さらに、気管支も呼吸と共に移動することを合計7症例のCT画像を用いて示した。これから、今後は気管支や心臓を含む縦隔のモデリングも考慮に入れたシミュレーション体系を構築することが望まれる。

第8章は結論であり、医用画像に基づいて患者個人の肺の呼吸性移動を粒子法によってシミュレーションする技術を開発したこと、患者データを用いて検証し全体的には良い一致が得られたものの部分的にはまだ問題がありさらなる研究が必要であるとまとめられている。さらに今後は本技術を放射線治療計画に導入していきたいと述べられている。

以上を要するに、本研究は粒子法によって肺の呼吸性移動をシミュレーションする技術を開発し、患者データを用いた検証によって手法の有効性を示すとともに問題点も明らかにしている。さらに、本技術は肺がんの放射線治療への応用が期待できる。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。