

審査の結果の要旨

氏名 徳田 淳一

論文題目「術中磁気共鳴画像による臓器運動の可視化に関する研究」の学位論文は、磁気共鳴画像（MRI）装置による手術誘導において、従来では不可能であった臓器運動の情報を可視化する手法を提案した論文である。本研究の成果として（1）MRIによる臓器トラッキング/レジストレーションと実時間での臓器の平行移動情報の提示、及び（2）4次元MRI撮像法による複雑な臓器運動情報の提示が実現され、評価実験やボランティア、手術中の患者の撮像実験を通して、患者の呼吸によって臓器運動が生じる部位での、MRIによる手術誘導の可能性・有用性を示した。

本論文は6章からなる。第1章ではMRI誘導手術の現状や問題点について述べており、特に術中の患者の呼吸に伴う臓器運動が手術誘導の誤差の大きな要因になっている問題を取り上げ、MRIによる臓器運動可視化の必要性を明確にしている。第2章では本研究の目的としてリアルタイム臓器トラッキング/レジストレーションおよび4次元撮像法の開発および評価と、これらの結果に基づく術中の臓器運動可視化の可能性・有用性の検証を挙げている。第3章ではリアルタイム臓器トラッキング/レジストレーションの原理、臨床用MRI装置への実装、およびファントムとボランティアの肝臓の撮像による精度評価実験とその結果について述べている。第4章では4次元撮像法「Adaptive 4D Scan法」の原理、臨床用MRI装置への実装について解説し、呼吸モデルファントムの撮像による画質・精度の定量的な評価、ボランティア撮像による撮像条件の評価、さらに手術臨床中の患者の撮像による肝腫瘍の動きの可視化の実験を行っている。第5章では第3、4章の実験結果の検証と、本研究で提案した手法を臨床応用するための技術的課題等について述べ、これに基づいて第6章で結論を述べている。

MRI手術誘導では撮像フレームレートの制約により、呼吸による臓器運動の情報を可視化することができず、高精度な画像を手術誘導に充分活用できていなかった。この問題に関して、従来、超音波やX線透視画像の併用が提案されてきたが、複数の撮像機器の統合や放射線被曝などに問題がある。本研究はMRIのみによる臓器運動の可視化をめざすため、問題を（1）実時間性の向上（2）変形等を含めた情報の高次元化の2点に絞り、それぞれに特化した技術を開発して最終的にこれらを統合することによって、臨床において実用性の高い臓器運動の可視化手法を提案している。

（1）に対してはナビゲータ・エコーと呼ばれる位置検出用の磁気共鳴信号を取得することにより、画像撮像の64～128倍のフレームレートで臓器運動情報を取得し、この情報を手術ナビゲーションソフトウェアに取り込んで術前診断画像の位置あわせ（レジストレーション）を行うことにより臓器運動をリアルタイムに可視化するシステムを開発した。開発したシステムは手術用MRI装置に組み込まれ、最高で27 fpsのフレームレート、遅延137 msで臓器の平行移動トラッキングを可能にし、その際の位置検出誤差は1.4 mmという結果を得ている。従来、MRI装置単体では秒単位での画像取得しかできなかったことを考慮すると、この結果はMRI誘導手術における臓器運動可視化における大きな進歩だといえる。

（2）については、撮像中の呼吸モニタリングに基づくMRIパルスシーケンスの動的制御を行い、取得された磁気共鳴信号を適切な画像フレームに振り分けることによって呼吸1周期分の4次元画像を得る「Adaptive 4D Scan法」を提案し、臨床用MRI装置に実装した。この手法は撮像結果が呼吸パターンに依

存することを考慮し、本研究では呼吸をモデル化したファントムを作成して画像の精度、画質、撮像時間の評価を行っており、ファントムの動きを1.9 mmの精度、4〜10フレームで画像化できることを示した。さらに提案手法を用いてボランティアの肝臓撮像を行い、撮像の際のパラメータ設定やエンコーディング方向等の最適な条件を求めた。これに基づいて手術中の全身麻酔下の患者の撮像を行い、肝腫瘍の動きを画像で観察できることを示した。

考察として、トラッキング情報に基づいて4次元画像を患者の臓器運動に同期させ、リアルタイムに臓器運動情報を提示するシステムを提案している。本研究での実験結果から、4次元画像のフレーム数とスライス厚が精度上の制約になる点を指摘し、今後の課題として4次元画像のフレーム補間、3次元エンコーディングによる4次元撮像法の開発を挙げている。また臓器運動提示によって収束超音波やマイクロ波等の照射による癌治療を行う際の臓器運動補償への応用が期待されることを述べている。

以上のように、本論文では、従来MRIでは不可能とされた臓器運動のリアルタイムの可視化手法を提案している。提案手法は評価実験を通してその実現可能性と有用性が示されており、MRI誘導による低侵襲手術の可能性を広げていくことが期待される。

なお、本研究は滋賀医科大学 森川茂廣助教授、GE横河メディカルシステム株式会社、東京大学 土肥健純教授との共同研究であるが、論文提出者が主体となって開発、評価を行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。