

論文題目「Control System for MR-guided Cryotherapy - Short-term Prediction of Therapy Boundary Using Automatic Segmentation & 3D Optical Flow - (和訳：自動セグメンテーションと3Dオプティカルフローを用いたMR誘導下冷凍治療制御システムに関する研究)」の学位論文は、低侵襲治療の一つである冷凍療法について、従来では評価が術後経過からしかできなかったが、術中情報の定量的モニタリング、予測、および評価を行う新手法を構築することで、その問題点を解決し、より効果的で安全な冷凍治療を行う支援システムを提案している。

本学位論文の第1章では、冷凍療法を紹介している。この冷凍治療は、体内で氷球を生成することで細胞組織を破壊し治療を行うが、問題点として生体組織内の熱・温度の伝導・伝達状況が組織の不均一性・血流の影響などにより推測が困難なため治療効果がどのように広がっていくかが予測困難で、治療計画・ナビゲーションを困難にしている。これらの問題解決に向けた、術中情報の定量的モニタリング、予測、および評価を行う手法の必要性、そしてそれらをもとにした臨床支援システムの提案を行っている。

第2章では、本研究の目的を述べている。MR誘導下冷凍治療の新たな制御システムの構築を目的に、構成要素として1)氷球の術中自動同定法、2)近未来の氷球形状の推定法、3)術中リアルタイム治療評価法を提案している。そしてこれらを含めた総合的システムの有用性の評価を行うこととしている。

第3章では、具体的なシステム構築要素の提案・開発手法とそれらを統合したシステムについて解説している。第1の構成要素として、術中の氷球の定量的同定には、術中画像と術前画像の差分画像を基に、新たな自動セグメンテーション法を提案し、ノイズ等の影響を軽減したロバストで高速な治療部位同定を可能にした。第2の構成要素として、将来の氷球推測には、第1の構成要素と3次元オプティカルフローを用い、過去の氷球の形状変化からその成育状況を画像処理により推測し、その速度情報を用いて未来の氷球の形状を推測する手法を考案した。第3の構成要素である術中の定量的治療効果評価には、1)氷球とターゲットの相関度・ターゲット内の氷結領域の量の2つの指標で治療の進捗と正確性を評価する定量評価エンジン、2)将来の氷球情報から危険部位に氷球が実際に到達するよりも先に警告を発するアラミングトリガの2つのモジュールを提案し開発した。そしてこれらの情報を2次元・3次元可視化と術中治療評価の提示を行うソフトウェアモジュール、および総合的な冷凍治療制御システムの構築を行った。最後に、この新システムの臨床における有用性を評価するための実験プロトコルについて解説している。

第4章では、第3章で開発した新手法・新システムの有用性を示す評価の結果を述べている。まず、システムの精度の点からの評価にあたり、医師による氷球のハンドセグメンテーションデータと、本システムで生成される氷球データを比較し、その一致度を調査した結果、高い相関度(DSC>0.9)が確認された。また臨床データを試験的に用いた計算・更新速度を評価した結果、MRIの画像撮像時間(約1分)に対しそのデータを用いての本システムでの治療支援情報のアップデート時間が約2.5秒程度と臨床において全く問題の無い十分な計算・更新速度を有していることが示された。

第5章では、本研究の手法・結果に基づく問題点の抽出と考察を行っている。臨床応用に向けてさらに考察すべき点として、評価に用いる正確な氷球データの推定、血管・胃でのノイズの問題、MR誘導下冷凍治療データにより特化した手法の提案などを行っている。

第6章では、本研究の結論を述べている。本研究ではMR誘導下冷凍治療の制御システムとして、氷球の術中オートセグメンテーション法、3次元オプティカルフローを用いた未来の氷球領域の推定法、そして術中リアルタイム治療評価法を提案・開発しこれらを統合したソフトウェアシステムの開発を行った。そして動物実験を通じて本システムが臨床に十分応用可能なパフォーマンスを有していることを示した。これにより本研究はより効果的で安全なMR誘導下冷凍治療の実現に貢献することを示した。

以上のように、本論文で開発した冷凍療法の臨床支援システムは、従来の問題点を解決するために術中情報の定量的モニタリング、予測、および評価を行うことが可能で、その有用性を示した。今後低侵襲治療の冷凍療法においてその役割が大いに期待される。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格であると認められる。

以上