

論文内容の要旨

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

氏名 徳田 淳一

背景

近年、手術室に磁気共鳴診断画像(MRI)装置を導入し、患部の状態をスクリーン上の画像で確認しながら最小限の切開で外科手術を行う「MRI 誘導手術」の臨床研究が行われている。MRI は(1)高コントラストな軟組織の 2 次元または 3 次元の形態画像によって術中の正確な腫瘍位置の特定が可能、(2)放射線を用いないため患者・医療従事者双方にとって被曝の心配がない、(3)解剖学的な情報のみならず、温度変化や生理学的な情報の取得も可能であり、治療経過や効果の確認に極めて有用な情報を提供できる、といった利点がある。最近では、術者の手による腫瘍の切除や穿刺による治療に加え、MRI 対応の穿刺マニピュレータや収束超音波照射デバイスによる治療も実用化され、高精度な画像情報が治療に直接反映される環境が整備されつつある。

しかし MRI は本質的に撮像時間のかかる画像法であり、呼吸や拍動に伴う臓器運動が存在する場合、動きに画像が追従できない上、動きによるアーチファクトが画像の観察を困難にする。そこで本研究では術中 MRI による、新しい臓器運動の可視化法を提案する。手術誘導のための臓器運動の可視化は、(1)リアルタイムな情報の提供と(2)変形等を含めた高度な運動情報の提供の両面からのアプローチが必要となる。(1)については他の高速な画像法との組み合わせる方法があるが、放射線被曝や複数の機器の使用による画像統合の複雑化が問題になる。また(2)については MRI による 4 次元撮像があるが、撮像の効率や撮像の時間分解能で現時点では手術誘導には適していない。そこで本研究では、(1)に対してMRIによるリアルタイム臓器トラッキング/レジストレーション、(2)に対して新しい 4 次元撮像法を提案する。将来的には、これらを統合することによってリアルタイムかつ高度な臓器運動の可視化の実現をめざす(Fig. 1)。これにより治療デバイスを臓器運動に追従させる臓器運動補償が可能となり、MRI 誘導による手術の精度の向上と対象領域の拡大が期待される。

方法

1. MRI によるリアルタイム臓器トラッキング/レジストレーション

本手法では、情報量を 1 次元ないしは 2 次元の並進移動情報のみに限定することによって、取得するデータの実時間性を追求するものである。MRI は画像を得るために数十〜数百 ms

間隔で 100~200 回の信号取得を繰り返す必要があり、撮像に時間がかかっているが、ナビ

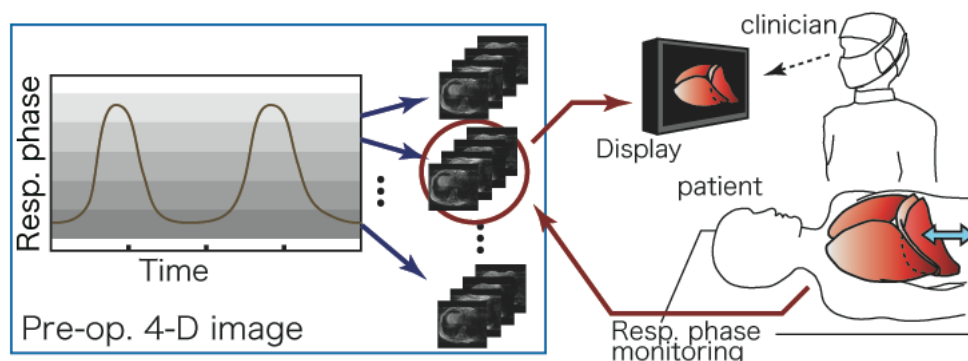


Fig. 1: MRI-guided surgery based on real-time organ tracking using MR and 4D MR imaging. In this approach, 4D image capturing one cycle of organ motion is acquired just before the operation. The organ is tracked in real-time during operation, and pre-operative 4D image is synchronized with the motion of the organ based on the tracking information.

ゲータ・エコーとよばれる位置変化検出用の信号を取得することにより、1回の信号取得で撮像対象の平行移動量を測定することができる。本研究ではナビゲータ・エコーの取得と撮像を同時に行い、リアルタイムで臓器移動の測定を行うと同時に、撮像結果を臓器移動量の情報に基づいて補正し(レジストレーション)、臓器の動きを画像上で忠実に再現するシステムを開発した。開発したシステムを評価するため、ファントムによる精度・リアルタイム性評価と、健常ボランティアを対象とした、臨床条件下での精度検証を行った。

2. 4次元 MRI 撮像法

呼吸に伴う繰り返しの臓器運動を1周期分の 3 次元動画画像(4 次元画像)として画像化する手法として、4次元 MRI 撮像法 Adaptive 4D Scanを開発した。本手法では撮像中に被験者の呼吸を計測し、呼吸の位相に基づいて位相エンコーディングとスライス選択位置のパラメータを動的に変更しながら信号取得を行う。呼吸計測値の変化範囲はあらかじめ N_ϕ 個の領域に分割され、呼吸計測値に応じて信号データを振り分ける。振り分けられた信号にそれぞれ 3次元再構成処理されて N_ϕ 個の 3次元画像が生成され、4次元画像を得る。呼吸計測にはナビゲータ・エコーを用いた。

本研究では臨床用 MRI 装置に本手法を実装し、肝臓を対象領域とした手術誘導への応用を想定して、ファントム・ボランティアの撮像実験および手術臨床中の患者の撮像による臨床適応性の評価を行った。ファントムによる評価実験では、提案手法による撮像の撮像時間や画質が呼吸運動のパターンに大きく依存することから、麻酔器のベンチレータによって駆動される呼吸モデルファントムを作成して実験を行った。画像の評価は定性的・定量的な画質の評

価と、画像上のファントムの位置の精度評価で、(a)撮像方向と動き方向の関係の違いによる比較、(b) 時間解像度 N_ϕ の違いによる比較、(c) 呼吸位相の分割法の違いによる比較、(d) 呼吸運動の周期の違いによる比較を行った。一方ボランティア・臨床撮像実験では、肝臓を撮像し、得られた画像の定性的な評価を行った。

結果

1. MRI によるリアルタイム臓器トラッキング／レジストレーション

ファントム実験では、臨床用 MRI 装置を用いてファントムの 2 次元のトラッキング及び撮像を行った。同時に評価基準としてビデオカメラでのファントムの撮影を行い、各フレームでのファントムの位置から、評価基準としてのファントムの移動量のデータを取得した。トラッキングのフレームレートは一方向あたり 2.5 fps で、トラッキングの誤差の root mean square (RMS) は 35 cm の FOV に対して 2.0 mm であった。またファントムの動きがトラッキング結果に反映されるまでの遅延は 100 ms であった。ボランティアの評価実験では、ランダムな呼吸位相での息止めを行い、通常の 2 次元画像撮像と提案手法による肝臓のシフト量の計測を行った。得られた 2 次元画像から肝臓のシフト量を求めてトラッキングの評価基準とした。その結果誤差の RMS は 1.1 mm という結果を得た。

2. 4次元 MRI 撮像法

(a)の撮像方向の違いによる比較では、周波数エンコーディングの方向とファントムの動き方向の関係が画質へ大きく影響し、両者が同方向になるように設定された際に画像のノイズが最も小さかった。ナビゲータ・エコーの取得断面が異なる場合、ナビゲータ・エコー取得による残存磁化の影響が見られた。(b)の時間解像度の違いによる比較では、時間解像度の向上による画質・画像位置精度の向上は限界があり、 $N_\phi = 6$ より大きな N_ϕ を設定する意味はあまりない。撮像時間は N_ϕ にほぼ比例し、 $N_\phi = 6$ で 22 分であった。(c)の呼吸位相分割方法の比較では、(i)各呼吸信号区間を等分割にした場合と、(ii)各区間での呼吸信号計測値の出現度数が等しくなるように分割した場合の2通りについて比較を行った。両者とも画質についてはそれほど大きな差がなく、位置精度は誤差の RMS が(i)1.8mm, (ii) 1.7mm であった。撮像時間は大きな違いが見られ、(i)の 22分に対して(ii)では 10 分であった。(d)の呼吸周期の比較では、呼吸周期が短くなるほど画質は落ちるが、 $T=3.0$ 秒までは実用的な画質を保持しており、自発呼吸での患者の撮像において呼吸周期にある程度の幅があっても対応可能であることが示された。ボランティアの撮像では5人のボランティアについて撮像を行った。結果を Fig. 2 に示す。また臨床撮像は肝腫瘍のマイクロ波凝固の臨床時に全身麻酔下で行われ、10分30秒で4次元画像を取得し、腫瘍の動きを描出できることを確認した。

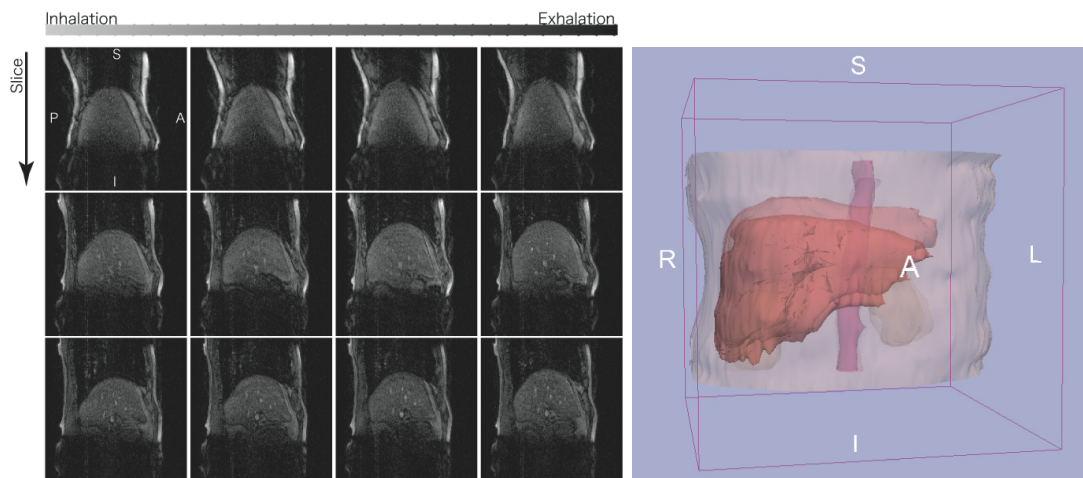


Fig. 2: Part of 4D sagittal liver image of a volunteer (left) and a surface models in different respiratory phase generated from the 4D image (right).

考察

ナビゲータ・エコーを用いたリアルタイム臓器トラッキング／レジストレーションにより、画像よりも高いフレームレートと短い遅延で動きの情報を提供できることが示された。ナビゲータ・エコーはこれまで撮像後の画像補整のための動き情報の取得や、呼吸同期のタイミング決定に用いられていたが、臓器の動きそのものを数値として活用するのは本研究が最初である。画像による術中の臓器運動の追従では、よりフレームレートの高い超音波画像を利用した手法等があるが、MRI 誘導手術の場合本手法は特殊なデバイス等を追加する必要がなく、実用性の高い手法といえる。

4次元撮像法では肝臓の呼吸に伴う臓器運動を 1.9 mm 程度の精度で視覚化できることを示した。4次元画像の時間分解能は原理的には任意に設定可能だが、撮像時間の延長を招く上、現実には画像の質や画像の位置精度はある程度時間分解能で頭打ちになる。実験結果より、一定程度より大きな時間解像度を設定しても撮像時間の延長を招くだけで画質や位置精度向上はみられない。高速イメージングによる2次元撮像と撮像後の後処理による4次元画像撮像が提案されているが、信号取得の効率や低磁場装置への対応を考えると本研究の提案手法のほうが有利だと言える。

将来の展望としては、4次元撮像で得られた患部の4次元画像データを、術中のリアルタイムトラッキングによって実際の患部の動きに同期させ、収束超音波手術などの際の臓器運動補償の制御での活用が考えられる。4次元画像と患部の同期は、臓器運動が再現性のある運動の繰り返しであることを前提としているが、こういった治療は患部に対する力学的な力の作用は小さく、治療対象部位の変形が最小限に抑えられるため、実用化が期待される。

結論

本論文は、MRI 誘導下で動く臓器に対する手術誘導を提供する手法として、「リアルタイム臓器トラッキング」および「4次元撮像法」を開発し、これらと治療デバイス技術の統合による臓器運動補償による手術誘導を提案した。リアルタイム臓器トラッキングでは、肝臓の2次元の運動を十分なリアルタイム性と精度をもって可視化することができ、また4次元撮像法によって十分な画質と精度にて肝臓の詳細な臓器運動を可視化できることを示した。これらの結果を踏まえ、MRI 装置を呼吸に伴って動く臓器を対象とした手術の誘導に用いることの有効性、予想される精度を明らかにした。