

# 論文内容の要旨

## 論文題目

MRI 下手術のための手術デバイス位置・姿勢計測法に関する研究

氏名 小野木 真哉

### 背景・目的

MRI ガイド下手術は低侵襲手術において高い精度と安全性を実現する効果的な手法であり、さまざまな試みがなされている。特に、血管カテーテルを用いて経皮的に診断・治療を行うなどの Intervention の領域では、積極的に MRI による透視画像が利用されている。さらには、外科手術も MRI 下で行おうという試みが報告されている。また、手術支援システム開発を対象とするコンピュータ外科の領域においても、MRI 対応性を有したアクチュエータや制御方法の開発が盛んに行われている。手術支援システムは、手術ナビゲーションシステムおよび術具マニピュレータからなる。手術ナビゲーションシステムは術前や術中における対象患部周辺の 3D モデルや 2D 画像に対して術中のリアルタイムな術具の位置を重ね合わせて提示するものである。これにより、医師は目視できない箇所にある臓器や血管の位置関係をナビゲーションシステムによって確認しながら治療を行うことが可能である。術具マニピュレータは主に低侵襲手術を対象として開発されている。低侵襲手術用の鉗子は自由度が極めて限られているため、メカトロニクスの技術を用いることで先端周辺に屈曲する自由度をもつ鉗子の開発などが行われている。ナビゲーションシステムによる術中の術具位置の提示や術具マニピュレータの誘導などを行うためには、術中の手術デバイスの位置計測が不可欠である。そのために、様々な位置計測装置が臨床応用されているが、それらは MRI 下における利用を前提にしたものではなく、高磁場かつワークスペースが限られているという特殊な環境での利用には課題がある。MRI を用いた位置計測法としてアクティブトラッキングがある。これは、小型受信コイル(トラッキングコイル)の 3D 位置を高速(最短 100 msec 程度)に計測することができる手法である。ただしこの手法は位置のみの計測であり姿勢を計測することはできない。また、アクティブトラッキングを応用したものととして 2 軸周りの姿勢計測が可能な手法が Zhang らによって提案されている。これは、受信コイルのインダクタンス成分を直列分解することで 2 点の同時計測を実現しており、この 2 点を結ぶ線分の姿勢が算出可能な手法である。この手法の場合、実際の術具長軸とアクティブトラッキングによってピークが得られる位置が一致しているとは限らないため、実際の術具との間には誤差が生じる。このような場合、実際の術具の端点と計測値の間の位置関係をキャリブレーションする必要があるが、そのためには、3 軸周りの姿勢計測が必要である。そこで本研究では 3 軸周りの姿勢計測が可能なアクティブトラッキング

法(拡張アクティブトラッキング法)の提案を目的とし、その評価を行った。

### 方法・装置

3 軸周りの姿勢計測を実現するためには、不等辺三角形を成す 3 点の三次元位置がわかればよい。そこで、インダクタンス成分を 3 つに直列分解し不等辺三角形を成すように配置することで、3 点の三次元位置を同時に計測することが可能と考えた(図 1)。実験装置として実験用の 0.2 T オープン型 MRI を用いた。静磁場強度が 0.2 T であることから磁場中心における水素原子核スピンの Larmor 周波数は 8.5MHz となる。評価のために開発したトラッキングコイル(図 2)は 3 つに直列分解されたインダクタンス、コンデンサ、同軸ケーブルから成る。各インダクタンスは直径 4 mm の中空の樹脂(内径 2 mm)に銅線を 20 回巻いたものとし、樹脂の内部には信号源として水を充填した。共振周波数を 8.5MHz となるようにチューニングし、MRI スキャナの受信アンブに接続した。評価用器具として、光学式位置計測装置(Polaris, Northern Digital Inc., Canada)、および樹脂製(塩ビ)ジグを用いた。ジグは平行移動を計測するためのマトリックス状に等間隔に穴を空けたもの、姿勢を計測するための半球状の回転器具、トラッキングコイルを側面に設置しジグに挿入する円筒状の測定子から構成される。

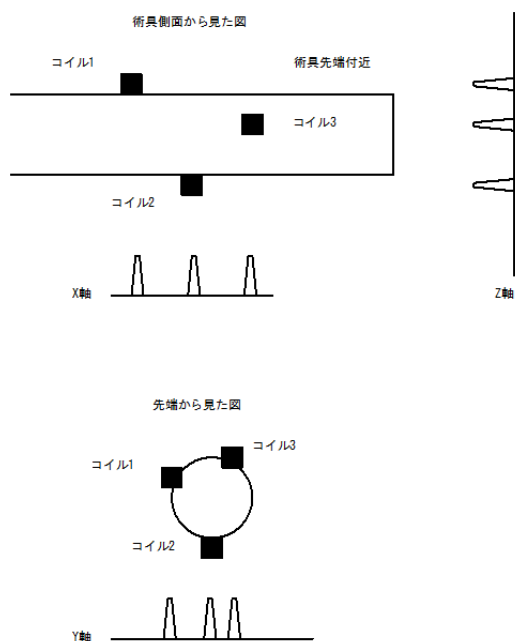


図 1：拡張アクティブトラッキングによる 3 点の同時計測原理

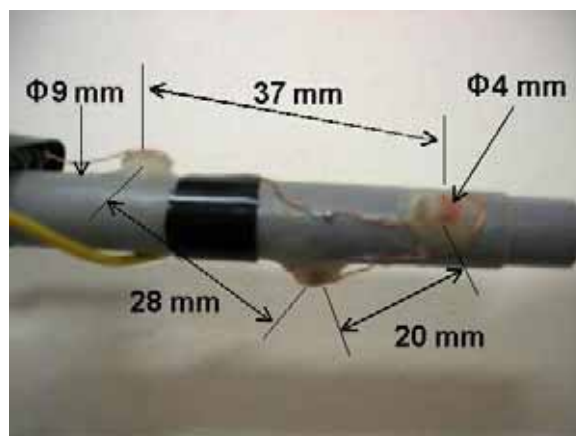


図 2：製作したトラッキングコイルの外観。

### 評価実験

提案手法の評価として 1) 姿勢計測可能性の確認, 2) 位置姿勢計測精度評価, 3) 計測環境に関する評価を行った。

### 姿勢計測可能性の確認

姿勢計測が可能であることを明らかにするためには、トラッキングコイルの位置・姿勢によらず同一形状の三角形が計測されなければならない。そのことを明らかにするために 1) 3 点の三次元位置の同時計測可能性確認、2) 各計測点の位置計測再現性評価、3) 各計測点の位置計測精度評価、4) 各計測点の成す三角形の定常性の確認、を行った。3 点の同時計測が可能であることが示され、位置計測再現性および精度は計測分解能(0.78 mm)以下であり、安定かつ正確に計測できることが明らかとなった。各計測点の成す三角形の定常性確認では、計測点の成す三角形の辺の長さがトラッキングコイルの位置姿勢によらず一定であることの確認を行い、その揺らぎは分解能 0.78 mm 以下であることが明らかとなった。以上より、常に同一形状の三角形を計測可能であることが明らかとなり、三角形の姿勢として、トラッキングコイルの姿勢計測が可能であることが示された。

### トラッキングコイルの位置姿勢計測性能の評価

トラッキングコイルの位置・姿勢を計測し、その再現性および精度を評価した。トラッキングコイルの位置姿勢計測における計測再現性評価では、同一位置における 20 回の計測値の標準偏差は、位置 0.3 mm 以下、姿勢 1 度以下であった。位置計測精度は、10 mm 間隔で 100 mm の平行移動を行ったところ、光学式位置計測装置を基準とした場合の RMS 誤差は 0.37 mm であった。姿勢計測精度は、樹脂製の計測器具を用いて行った結果、30 度の回転に対する RMS 誤差は 2.4 度であった。

### 計測環境に関する評価

トラッキングコイルが MRI 画像に与える影響評価では、トラッキングコイルをファントム表面に設置し、ボディコイルで撮像を行い、画像に歪み等が生じないか確認を行った。トラッキングコイルが存在する断面における撮像の場合、インダクタンスの位置において信号が弱くなっていることが見られたが、歪み等は確認されなかった。一方、トラッキングコイルを含まない断面においては、影響は見られなかった。各インダクタンス周辺に水素原子が十分に存在する環境における計測可能性評価では、体内における計測可能性を確認するために水中における計測を行った。また、水素原子核に与えるエネルギー量に相当するパラメータであるフリップアングルと信号の S/N 比を比較した。フリップ角を 30 度から 3 度刻みで 3 度まで計測を行った。結果は小さなフリップ角の方が S/N 比が向上する傾向が見られ、フリップアングルを 30 度とした場合においては、周辺の水による信号が強く、明確なピークが得られなかった(S/N=0.67)。一方、フリップアングルを 3 度と極端に小さくした場合、周辺の水による信号が相対的に減少し、明確なピークが得られた(S/N=2.07)。コイルと静磁場が成す角度と S/N 比に関する評価では、静磁場に対する角度を 60 度、30 度、0 度として S/N 比の比較を行った。60 度においては S/N 比は 20.49 であったのに対し、0 度においては 2.66 であり、ほぼ静磁場と成す角が 0 度の条件においても計測は不可能ではなかった。

## 拡張アクティブトラッキングの応用

ここでは、術具を想定した棒状の器具にトラッキングコイルを設置し、器具端点のキャリブレーションとその誘導を模擬した実験を行った。

### トラッキングコイルによる術具の位置姿勢計測

術具を模擬した棒状器具の端点のキャリブレーションを行った。端点を中心とする球運動を行い、その球面上の計測を行うことで計測時の MRI 座標系における端点位置を求めた。求められた端点位置とトラッキングコイル座標系の計測値より、トラッキングコイルから測定子端点への変換行列を算出した。この計測を両端に対して行うことで、トラッキングコイルの計測値から測定子の両端の位置および両端を結ぶ線分の姿勢を求めることができる。そこで、キャリブレーションされた測定子の位置計測精度および姿勢計測精度を評価した。位置計測精度は 15 mm の平行移動に対して RMS 誤差 0.97 mm であった。姿勢計測精度は 30 度ずつの回転に対して RMS 誤差は 3.0 度であった。

### 術具ナビゲーションの模擬実験

術具誘導の模擬実験として、ファントムに穴を空け術具を模擬した棒状器具を穴に挿入し、MRI 画像から算出した穴の位置姿勢とトラッキングコイルによる器具の位置姿勢の比較を行った。ファントム表面における位置誤差は 4 mm、姿勢誤差は 9.14 度であった(図 3)。

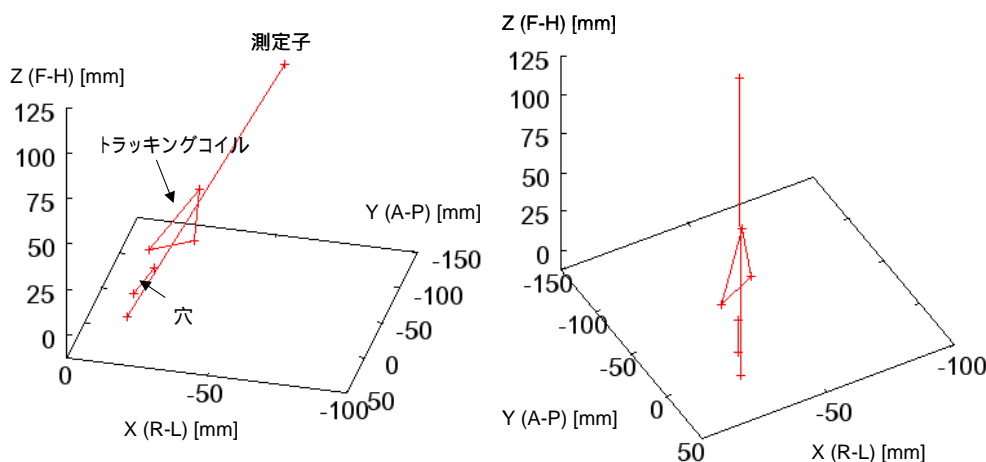


図 1: 術具ナビゲーションの模擬実験結果。

### まとめ

以上より、本手法による位置姿勢計測精度は、使用する MRI スキャナの計測分解能に依存するが、従来の計測装置では計測不可能な体内における計測対象の位置姿勢を直接計測できることが示された。

本手法は、将来的な軟性鉗子による MRI ガイド下手術における、鉗子の位置姿勢計測やその誘導において不可欠な位置姿勢計測を可能とする有用な手法である。