

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 29 日現在

機関番号：33934

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350579

研究課題名(和文) 脳動脈瘤コイル塞栓術の治療シミュレータの開発

研究課題名(英文) Development of surgical simulator for cerebral aneurysm coil embolization

研究代表者

永野 佳孝 (NAGANO, YOSHITAKA)

愛知工科大学・工学部・教授

研究者番号：40610142

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：脳動脈瘤コイル塞栓術における術前計画を支援するために、リアルタイム手術シミュレータを開発した。本シミュレータでは、形状記憶合金であるコイルの変形を実現するために粒子計算モデルを採用した。螺旋形と籠形のコイル形状がシミュレーションできる。本シミュレータ上で、動脈瘤の中に最初のコイルをリアルタイムに挿入できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a real time surgical simulator for preoperative planning of cerebral aneurysm coil embolization. The simulator is using particle calculation model for implementation of deformation of shape memory alloy coil. Coil shape of the helical type and cage type can be simulated. The simulator has implemented the real time insertion of first coil into an aneurysm.

研究分野：医療システム

キーワード：脳神経外科 バーチャルリアリティ GPGPU 術前計画 コイル塞栓術 粒子法

1. 研究開始当初の背景

脳動脈瘤は血管の一部がこぶ状に薄く膨らんだもので、瘤の破裂が致死率の高いクモ膜下出血の主な原因となっている。瘤の破裂を防止する手術として身体への負担の少ないカテーテルを用いたコイル塞栓術がある。本術は瘤を内部から血栓化して固める方法で、瘤の中に白金製コイルを充填する。本術を選択する国内の患者の割合は約 20%であるが、先行する欧米では約 50%に達している。高齢者人口の増加と脳ドック検診率の向上も相まって、国内の専門医の不足が懸念されている。

医師手元のコイル挿入力は研究代表者の開発したセンサで測定可能となったが、クモ膜の中にある瘤がコイルから受けている圧力を直接測定する手段がなく、また、コイルの隙間についても、X線透視で確認できるのはコイル外側の状態のみであり、直接に隙間を知る手段が存在しない。

一方、治療費について注目すると、1本10万円以上と高価なコイルを無駄なく使用することが、その削減に繋がる。現状では、コイル間の隙間不足で術前に計画したコイルが挿入できない場合は、そのコイルを破棄し、小径または展開長さの短いコイルに取り替える。その反対に、長さの短いコイルを多数使うのも、コイルの使用本数を増やすことになっている。

術後においては、コイルコンパクションと呼ばれるコイルの収縮現象により、瘤の血流が復活してしまう現象がある。どのようなプロセスで発生しているのかが明確となっていない。

2. 研究の目的

本研究では、上述した問題の解決法として、研究代表者が開発に取り組んできた脳動脈瘤コイル塞栓術用のトレーニングシステムのステップアップを図り、コンピュータ計算モデルを用いて術前計画を支援する治療シミュレータを開発する。

そのコンセプトは、従来できなかった手術訓練の実現と、瘤およびコイルの力学的状態の可視化による術前計画の高精度化である。シミュレータにより訓練のバリエーションが広がることは明らかであるが、具体的には次のメリットがある。

(1) 1本目のコイル挿入の訓練

1本目のコイルは、2本目以降のコイルの挿入形態への影響が大きいため、動脈瘤内壁に直接接触するために、過度な力を加えないように挿入させることがより強く求められている。

(2) 塞栓完了までのコイルの充填訓練

高価なコイルを瘤に留置してしまうと再利用ができないため、従来このような訓練の実施が難しかった。

(3) 術後のコイルコンパクションの原因究明

コイルコンパクションの再現をシミュレ

ータで行い、原因分析を行えるようにする。

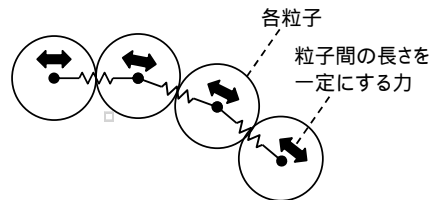
3. 研究の方法

以下の5つのサブテーマを設定して研究を進めた

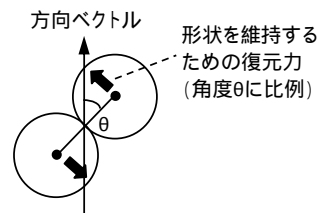
(1) コイルの計算モデルの確立

コイル、カテーテル、動脈瘤の挙動を術者のコイル挿入操作とカテーテル操作に合わせてリアルタイムに計算できるモデルを開発する。CPUとGPUの並列計算を利用することと、計算モデルの簡易化で、リアルタイム性の実現を目指した。

コイルは、直径0.25mmで長さが2cmから30cm、螺旋形や籠形の形状記憶合金、超弾性素材のためにカテーテルの中では細長く変形している。このコイルをモデル化するために、コイルを粒子で表現した。最初のモデルでは、粒子間の弾性バネと、粒子1つおきに弾性バネを与えて曲率を表現する手法を取ったが、局所的な安定状態に陥ってしまい、コイルの形状を再現できなかった。そのため、図1に示すように、粒子間を弾性バネで接続するとともに、形状記憶を再現するために、方向ベクトルを用いて記憶形状への復元力を与えることにした。各粒子における方向ベクトルの計算は、周辺粒子の方向と、元形状の方向とが一致する方向とした。復元力は、得られた方向ベクトルと、粒子間の接続方向との間の角度を小さくする方向に発生する。



(a) コイルの長さの維持する力



(b) コイルの形状を維持する力

図1 コイルの計算モデル

コイル同士が重ならないように、粒子の衝突時における重なり長さに比例した反力を与えるペナルティ法を採用した。粒子の衝突判定は、図2に示すように粒子直径に近い寸法単位で区切った128×128×128の格子を用意し、各格子に粒子を登録することで、衝突判定回数の検索数を減らした。格子寸法を0.4mmとすることで、計算の対象となる寸法を51.2mm角とした。脳動脈瘤は最大でも直径15mmほどであるため、カテーテルの通り道である親血管と合わせた十分な計算範囲を確保した。

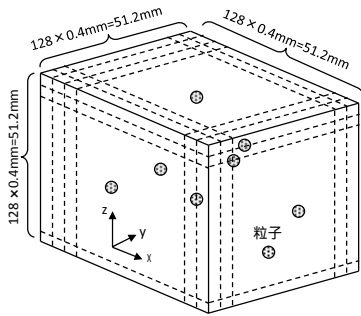


図2 格子数と計算範囲

(2) カテーテルの計算モデル

カテーテルもコイルと同じ計算モデルを用いたが、カテーテルの中にコイルが内包している部分については、コイルを計算対象から除外をして、カテーテルとの衝突判定は行わないようにした。コイルの反力をカテーテルが受けるため、計算上ではコイルとカテーテルを一体のモデルとして扱った。

(3) 動脈瘤の計算モデル

研究当初の動脈瘤は、動脈瘤の形状を示す関数で表現をしたが、複雑な瘤形状に対応するために、粒子で表現をした。近接する粒子と、一つおきに粒子をバネで接続することで、曲率を設定して、瘤内壁の曲面を再現した。

(4) コイルとカテーテルの挿入方法とその他の操作方法

研究当初では、キーボード操作で、コイルとカテーテルの送りを行うことにした。コイルの挿入状態を確認するために、コイルとカテーテルの表示のオンオフや、ズームや視点を変更することができるようにした。

(5) コイルコンパクションの計算モデル

コイルコンパクションの再現には、拍動振動との練成解析が必要であり、研究開始当初は血液を粒子で表現をして、親血管からの血圧変動による血液の流れを再現する予定であったが、計算コストが大きく別の手法をとることにした。

内視鏡カメラによる脳内動脈を撮影した画像が入手できたので、拍動による動脈直径の拡大縮小の変動率を画像分析で求めたところ、13%~15%の振動率であることがわかった。この振動率に合わせて動脈瘤壁の粒子を瘤壁と鉛直方向に振動させることとした。

4. 研究成果

本研究では、1本目のコイル挿入についての成果を得ている。2本目以降では、リアルタイム性に問題があり、引き続き研究を進めていく。以下に研究成果を示す。

(1) 螺旋形コイルの挿入結果

直径コイルの方向ベクトルに螺旋形状を設定し、球状の動脈瘤にコイルを挿入した

結果を図3と図4に示す。動脈瘤の直径は5mm、コイルの直径は0.25mm、コイルの展開直径を、図3では瘤と同じ5mm、図4では3mmとした。点線は、動脈瘤の形状を示している。動脈瘤に接続された親血管よりカテーテルが挿入され、瘤の中にコイルが展開されていく様子をシミュレーションすることができている。コイルの展開位置を決めるカテーテルの出し入れも実現した。

図3では、瘤とコイルの直径が同じのために、瘤壁に沿ってコイルが展開されているのが確認できる。(b)から(c)に移るときにコイルの先端は5mm径に展開しようとするが、瘤壁に接触したために瘤壁に沿って小さい曲率半径で曲げられている。その後、ほぼ5mmに展開をしている。

図4では、コイルは瘤壁に沿って下側に展開されているが、挿入が進むにつれて瘤は球状であるために、先端部が中央に移動しているのが確認できる。

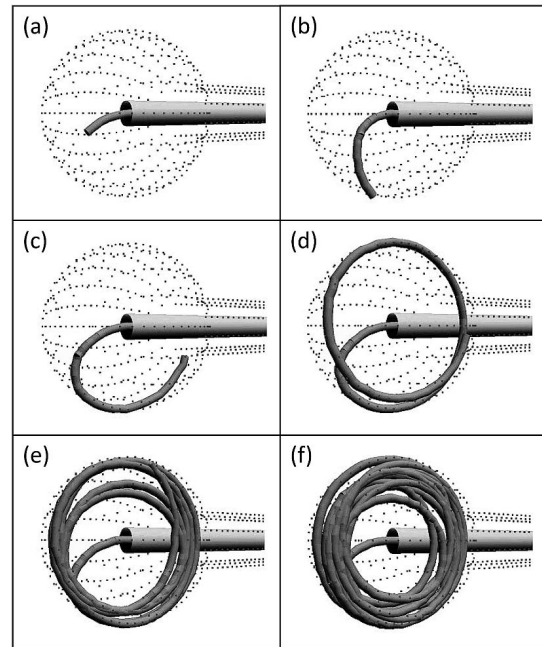


図3 螺旋形コイルの挿入（展開直径5mm）

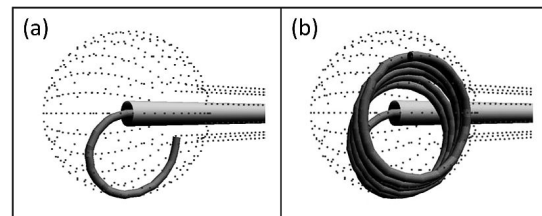


図4 螺旋形コイルの挿入（展開直径3mm）

(2) 籠形コイルの挿入結果

コイルの方向ベクトルに籠形状を設定し、球状の動脈瘤にコイルを挿入した結果を図5に示す。

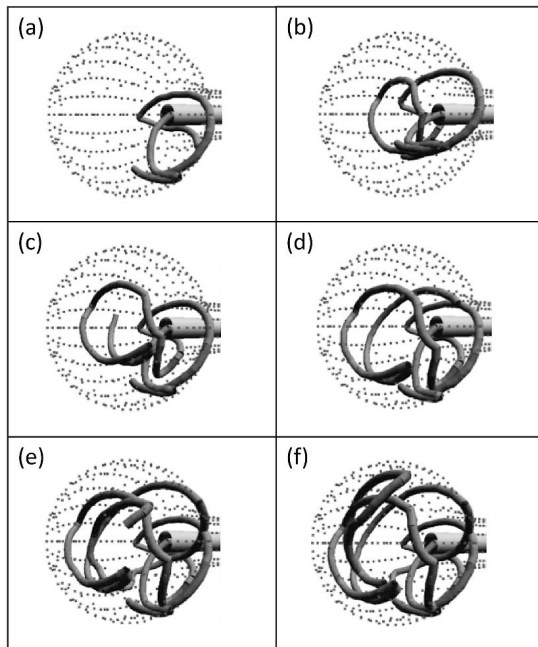


図5 籠形コイルの挿入

(3) 計算速度と高速化の課題

1 本目のコイル挿入では、リアルタイム性に問題はなかった。質点数 1000 個での計算時間は 2ms であった。現在、GPGPU の並列化をさらに進めて、計算の高速化を図っているが、2 本目以降は、質点数が多くなるため、現状ではリアルタイム性を確保できていない。

(4) シミュレータの評価と今後の展開

脳神経外科専門医のシミュレータの評価では、螺旋形状や籠形形状のコイルが脳動脈瘤に挿入されていく動作に関しては、基本的に問題のないことが示された。一方、ステントやバルーンを併用した最新治療に対応するためには、本シミュレータを基盤にした機能拡張が必要であることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計1件)

永野佳孝、宮地茂、松原功明、浅井琢美、脳動脈瘤コイル塞栓術用コイルシミュレータの基礎検討、日本コンピュータ外科学会、2015年11月21日、東京大学本郷キャンパス(東京都文京区)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www1.aut.ac.jp/~nagano-lab/target.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永野 佳孝 (NAGANO, Yoshitaka)
愛知工科大学・工学部・教授

研究者番号：406101042

(2) 研究分担者

宮地 茂 (MIYACHI, Shigeru)
大阪医科大学・医学部・准教授
研究者番号：00293697

松原 功明 (MATSUBARA, Noriaki)
名古屋大学・医学部附属病院・講師
研究者番号：10422776