

カテーテルシミュレータの開発

山村 直人 (理化学研究所)
深作 和明 (理化学研究所,
春日部中央総合病院 脳神経外科)
姫野龍太郎 (理化学研究所)
牧野内昭武 (理化学研究所)

背景

● 脳動脈瘤



脳動脈が嚢状に拡大して
コブができた状態



くも膜下出血 等
— 致死率あるいは後
遺症が残る率が高い

未破裂動脈瘤の破裂の予防
再破裂の予防

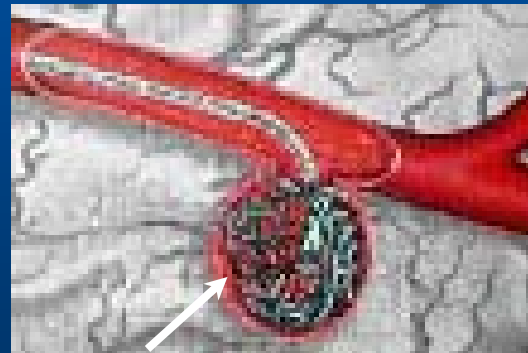
のための治療

脳動脈瘤の治療法

- 開頭によるクリッピング術
- カテーテルによる血管内治療



動脈瘤



金属コイル



カテーテル治療の問題点

● 問題点

- ✓ 脳動脈瘤は破裂の危険性の高い場所にできる
- ✓ 術前トレーニングが困難

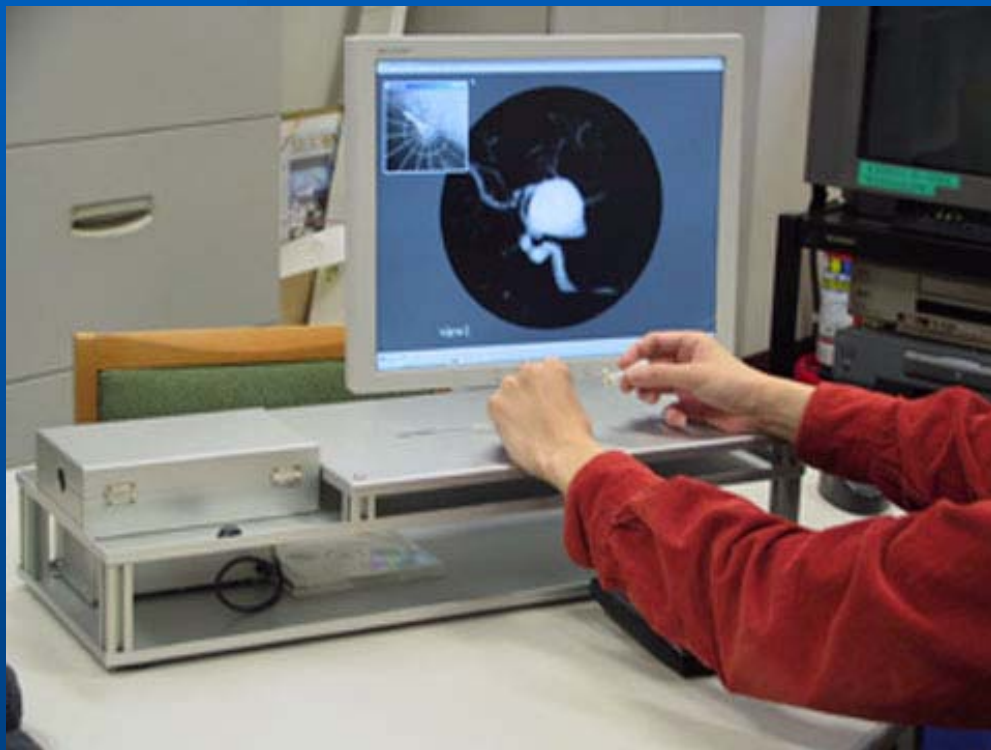
いかにカテーテルを安全に動脈瘤まで誘導するか

● 安全な血管内治療に向けて

- ✓ 透視などの放射線診断技術の向上
- ✓ カテーテル・ガイドワイヤー作成技術の向上
- ✓ 効率的, 効果的な術者のトレーニング環境の提供

カテーテルシミュレータの開発

カテーテルシミュレータ

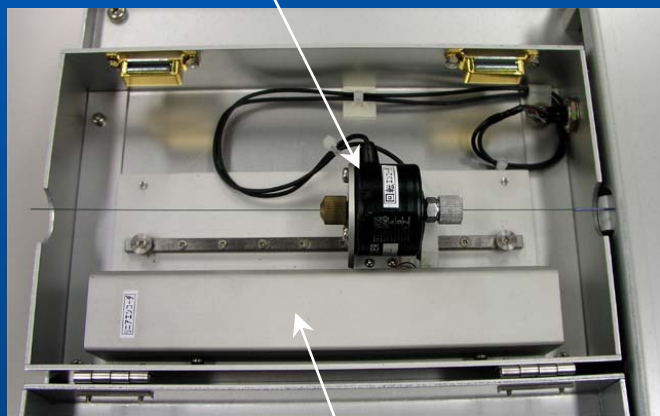


- ✓ PCおよび入力デバイスから構成
- ✓ 仮想的な脳動脈瘤のカテーテル手術環境
- ✓ 患者個々の血管画像を使用可能
- ✓ リアルタイムトレーニングシステム
- ✓ 診断(血管画像撮影)から短時間にシミュレーションが可能

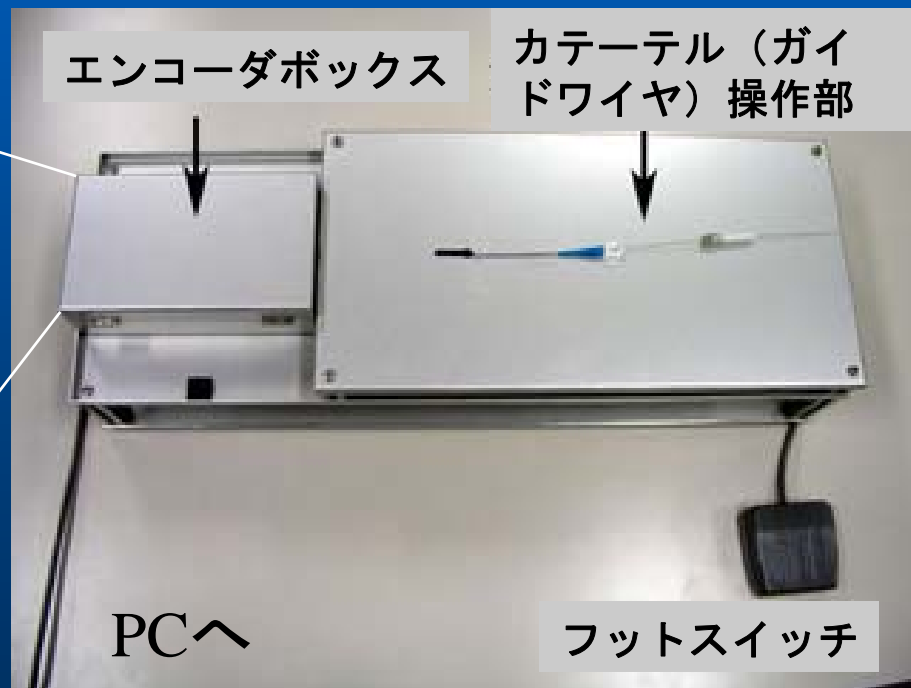
入力デバイス

- エンコーダボックス内部

回転エンコーダ



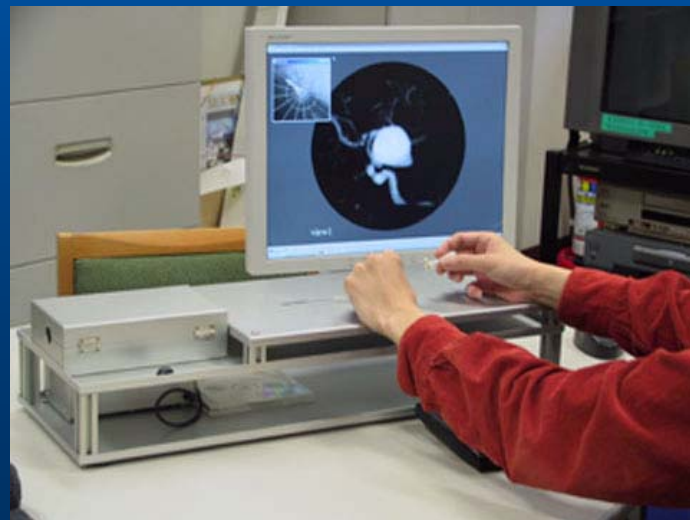
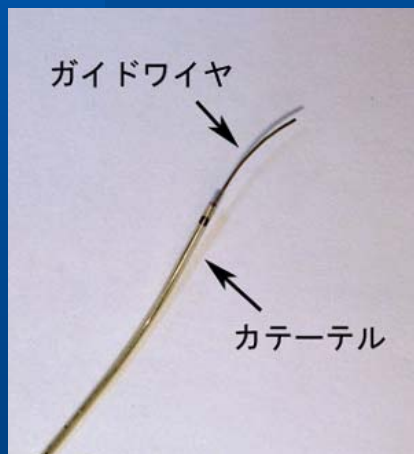
リニアエンコーダ



ガイドワイヤのシミュレーション

カテーテルシミュレータの開発の第一段階として、ガイドワイヤシミュレーションソフトウェアの開発を行った

- ガイドワイヤ



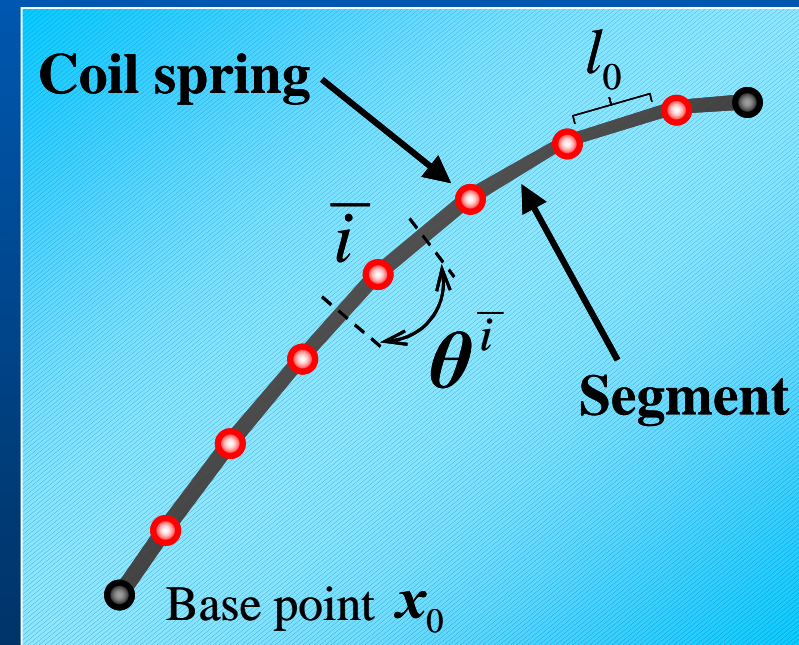
ガイドワイヤの力学モデル

● 基礎仮定

- ✓ 解析対象はガイドワイヤのみ
- ✓ 静的問題とする
- ✓ 血管壁との摩擦は無視する
- ✓ 血流の影響は無視する

● 離散化モデル

- ✓ 真直セグメントと回転ばねによる離散化
- ✓ 曲げおよびねじれ剛性のみを考慮し、それを回転ばねの回転により記述



ガイドワイヤの力学モデル

● 停留ポテンシャルエネルギーの原理

$$\Pi^* = U - (W_e + W_c) + B. C. term \quad \Longrightarrow \quad \delta\Pi^* = 0$$

- ✓ 系全体のひずみエネルギー U

$$U = \sum_{k=1}^{NSP} \frac{1}{2} \left\{ K_x^i (\text{Bend } \theta_x^i)^2 + K_y^i (\text{Bend } \theta_y^i)^2 + K_z^i (\text{Torsion } \theta_z^i)^2 \right\}$$

- ✓ 系全体の外力による仕事 W_e

$$W_e = \sum_{i=0}^{NSP+1} F^i \cdot (x^i - X^i)$$

θ^i : 曲げ角およびねじり角

K^i : バネ定数

- ✓ 系全体の接触による仕事 W_c

$$W_c = \sum_{i=1}^{NC} F_c^i \cdot (x^i - X^i)$$

F^i : 外力ベクトル

F_c^i : 接触力ベクトル

X^i : 無負荷時の位置ベクトル

ボクセル情報による血管モデル

- 血管モデル
 - ✓ ボクセルデータによりモデリング
 - ✓ 適当な輝度値の等値面を血管壁と定義



接触の取り扱い

● 接触判定

- ✓ 接触判定は輝度値による

$$Br(\mathbf{x}^i) \leq Br(BVW)$$

$Br(\mathbf{x}^i)$: ガイドワイヤ接触点の輝度値

$Br(BVW)$: 血管壁の輝度値

● 接触による仕事

$$W_c = \sum_{i=1}^{NC} F_c^i \cdot (\mathbf{x}^i - \mathbf{X}^i)$$

* 血管壁は摩擦0の剛体壁を仮定

接触力と血管壁の法線ベクトル

● 接触力ベクトル

- ✓ 接触力ベクトルは血管壁の法線方向に沿ったベクトルとして定義

$$F_c^i = F_{Br}^i \bar{e}_3^i$$

- ✓ 接触力は血管壁への食い込み量(輝度値による評価)により評価

$$F_{Br}^i = \frac{Br(Bvw) - Br(x^i)}{Br(x^i)} k$$

\bar{e}_3^i : 血管壁の単位法線ベクトル
 k : 材料パラメータ

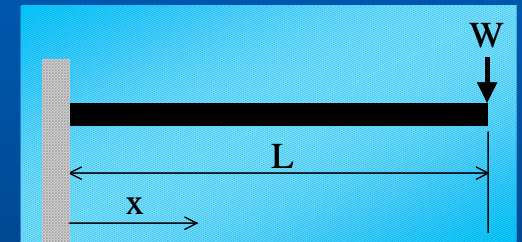
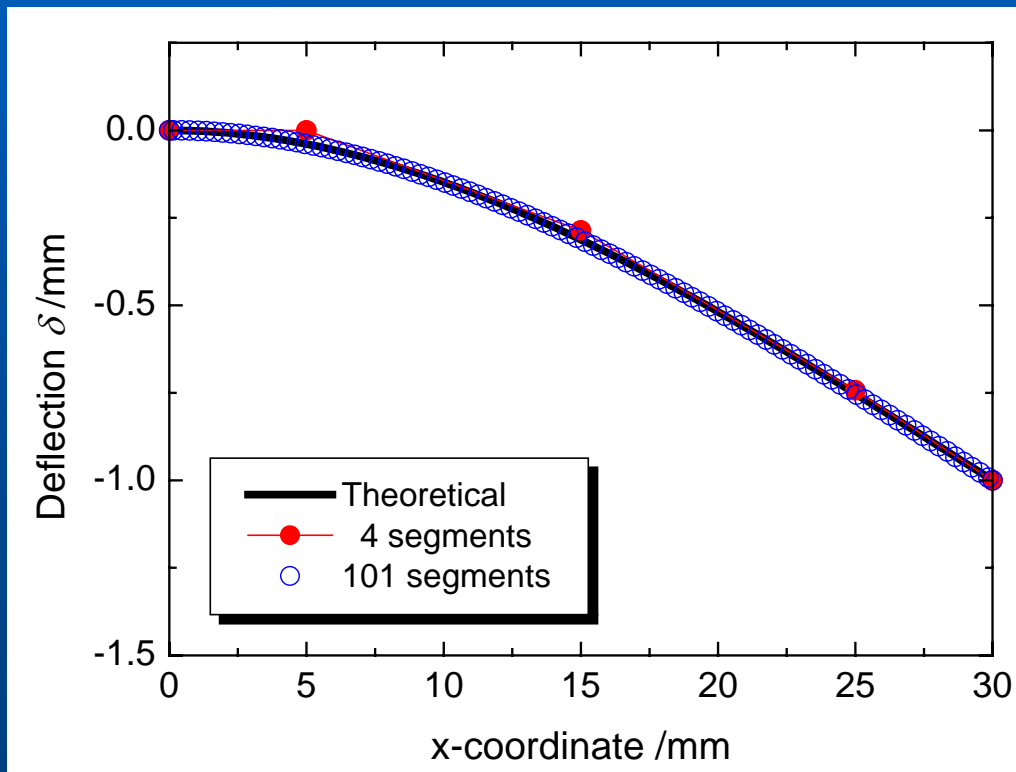
● 血管壁の単位法線ベクトル

- ✓ 輝度値の勾配ベクトルより定義

$$\mathbf{g}^i = \frac{\partial Br(x^i)}{\partial \mathbf{x}} \quad \Rightarrow \quad \bar{e}_3^i = \mathbf{g}^i / |\mathbf{g}^i|$$

片持ち梁の変形

- 強制変位を受ける片持ち梁のたわみ(2次元)



Circular cylinder
Length : $L=30\text{mm}$
Radius : 1mm
Young's ratio : 200GPa
Poisson's ratio : 0.3
Num. of segments : 4 and 101

Num. of segments	4	101
Moment /%	2.91	0.05
Reaction force /%	2.97	0.11

ガイドワイヤシミュレーション例

- 2次元H形モデル



シミュレーションソフトの動作環境

●オペレーティングシステム

Microsoft社Windows 2000以上

●必須ソフトウェア

Windows付属のOpenGLライブラリ

●ハードウェア

- ✓ 入力デバイス(マウスによる操作可)
- ✓ 2D_TEXTUREまたは3D_TEXTUREをサポートしているグラフィックカード(ビデオメモリ128MB以上を推奨)

シミュレーションの設定項目

- **ガイドワイヤ形状データ**

- ✓ ガイドワイヤ先端形状
- ✓ ガイドワイヤ長さおよび径
ーライブラリとして設定可

- **ガイドワイヤの材料特性**

- ✓ Yong's modulus および poisson's ration
ーライブラリとして設定可

- **血管の形状データ**

- ✓ VolumePro VOXELフォーマット (TERA RECON社)
- ✓ 4次元可視化ボリュームフォーマット (理化学研究所)

- **血管の材料特性**

- ✓ 血管壁の反力

ガイドワイヤシミュレーション

まとめ

本研究ではカテーテルシミュレータの開発の第一段階として、ガイドワイヤシミュレーションソフトウェアの開発を行った。

- 2次元モデルによる曲げ問題および接触問題について、本手法の妥当性と有効性が確認された。
- カテーテルシミュレータは、血管表現のために有限要素メッシュ等を構築必要がないため、MRI等から得られた患者のデータを用いて短時間にシミュレータにかけることが可能である。
- 今後、3次元問題への適用とともに、カテーテル本体の変形や血流との連成解析、また、血管壁との接触力を入力デバイスにフィードバックしたヴァーチャルリアリティ手術環境の構築などへつなげていきたい。