

機関番号：13901

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21860041

研究課題名（和文） 血管内手術用シミュレータのために数値的フィードバック

研究課題名（英文） Numerical Feedback for Endovascular Surgery Simulation

研究代表者：

テルセロ ラファエル (TERCERO Rafael)

名古屋大学・工学研究科・COE 研究員

研究者番号：60547420

研究成果の概要（和文）：カテーテル先端と血管壁の相互作用測定のために、血管モデルのための高精度光弾性応力解析および3次元応力計測について研究を行ってきた。さらに、血圧シミュレーションのためにポンプとそのシミュレーションの光弾性応力解析について研究を行った。作製した双方向平面ビジョンシステムを用いた血管モデルの光弾性応力と変形測定を行い、さらにカテーテル先端のモーションキャプチャーを用いてリアルタイムカテーテル経路解析を行った。

研究成果の概要（英文）：For quantification of the interaction of catheter tip and blood vessel wall, methods for high accuracy photoelastic stress analysis and three-dimensional visualization of stress fields were developed. As well as pumps for blood pressure simulation, enabling to visualize and measure the stress it produces on blood vessel walls. A bi-planar vision system was constructed for analyzing on real time the catheter trajectory in terms of its tip position, stress on the blood vessel wall and blood vessel morphology changes. This enabled to construct reference trajectories for evaluation while the catheter is driven by hand or with a robotic system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,080,000	324,000	1,404,000
2010年度	980,000	294,000	1,274,000
総計	2,060,000	618,000	2,678,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：血管モデル, 脳神経, 医療トレーニング, 応力解析, 人間の血圧シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

血管疾患による死亡率は高く、日本人の約3人に1人が同疾患が原因で死亡している。血管内（カテーテル）手術は、同疾患に対する低侵襲治療法として近年注目されているが、日本国内における普及率（脳神経外科分野）は20%に満たず（欧米では80%以上）、他は従来の切開術が適用されており、世界情勢に立ち後れている。

このため現在日本の指導医らは、同手術の

普及に努めているが、（1）現状では患者を用いた技術トレーニングが行なわれており、（2）かつ訓練医の数に対して患者数が不足しているため、十分な技術習得を行えない。この結果、医療事故が頻発し、過去数年の間に、手術シミュレータ開発への要望が飛躍的に高まった。この動きは日本に留まらず、患者でなくシミュレータを用いた手術トレーニングが世界的支持を集めつつある。

このような背景から、我々は手術シミュレーション媒体を提供するべく、CT/MRI情報に基づいて血管を精密にin-vitroモデル化する研究に着手し、2002年にその基礎技術を確立した。2005年には、同技術に基づいて全身の血管と血液循環を再現した手術シミュレーションシステムEVEを構築し、同年よりその事業化を手掛けている。実質的に、カテーテル手術シミュレータであるEVEは人間またはロボットのカテーテル操作および、血管内手術用具の性能について数値的な評価方法に関する研究は必要があった。さらに、シリコン血管モデルのための血压シミュレーションを行うために研究開発が必要であった。さらに、光弾性応力解析を評価パラメータとするために新しい血管モデリングの方法と光弾性応力解析の校正を行う必要があった。

## 2. 研究の目的

- 1) 術者への数値的なフィードバック機能を有する、小型で持ち運び可能な血管手術シミュレータの開発。
- 2) シミュレータの数値的フィードバックのための光弾性応力解析の評価。
- 3) 人間とロボットによるカテーテル挿入操作の数値的保存とその評価。
- 4) 人間の血压を模擬したシミュレーション(水压が 80 mmHg~200 mmHg)のための新しいウレタン血管モデルの開発。
- 5) シミュレータのウレタン血管モデル内への循環フローの生成。
- 6) ウレタン血管モデル壁の応力の可視化及び測定。

## 3. 研究の方法

### (1) 血压シミュレーション

#### ① ハイブリッドポンプ

生体内の拍動条件を再現することを目的としてピストンとローブポンプのハイブリッドポンプを作製した。このポンプは、圧力のフィードバック制御を用いてソフトウェアに保存してある血压波形を再生する。ピストンポンプを用いて心拍の周波数と振幅を制御し、ローブポンプを用いて最低の圧力と波形制御を行う。

### (2) 光弾性応力解析

#### ① 血管モデル

人間の血压のシミュレーションを目的とした光弾性による可視化可能な3層膜血管モデルを、シリコンとウレタンを用いて作製した。3層膜血管モデルとして、管、頸動脈、

動脈瘤、そしてブレブを有する動脈瘤の4つのタイプの作製に成功しました。

#### ② 光弾性応力解析の校正

複雑な血管モデルへの応用の為に高精度光弾性応力解析の理論を改良し、その理論を用いて新たな偏光器を開発した。

カメラで得られた画像データを独自に開発したソフトウェアで画像処理することにより、血管モデルの直径や分岐のある座標といった幾何学的情報の読み込みが可能となった。

### (3) 双方向平面ビジョンシステム

カテーテル先端と血管壁の相互作用測定パラメータとして模擬血管壁の応力と変形がある。光弾性と画像処理を用いた血管モデルの応力及び変形の測定と、カテーテル先端のモーションキャプチャーのための双方向平面ビジョンシステムを構築。

#### ① 基準カテーテル挿入経路を計算

双方向平面ビジョンシステムを用いて手動で5回再現したカテーテル挿入計画経路の情報をコンピュータに保存し、その情報から基準カテーテル挿入経路を計算した。その経路のパラメータは時間、カテーテル先端の区間差票(x, y, z), 双方向平面の応力とモデルの変形がある。

## 4. 研究成果

### (1) 血压シミュレーション

#### ① ハイブリッドポンプ

ハイブリッドポンプを用いて、実際の生体内と比較して5.6%誤差以内での血压シミュレーションが可能となり、血压が血管壁におよぼす応力を測定することができるようになった(図1-2)。

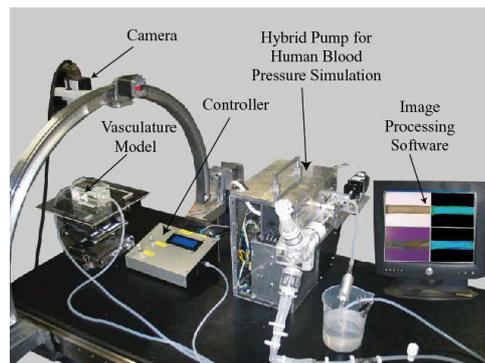


図1 ハイブリッドポンプ

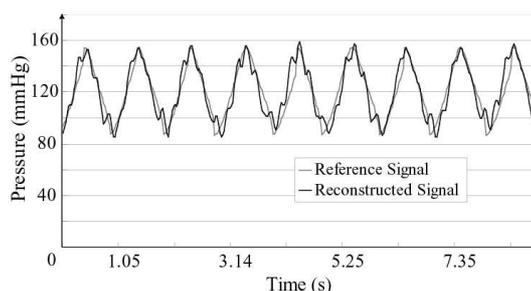


図2 ハイブリッドポンプを用いて再生した波形

② 小型ポンプ

ハイブリッドポンプ作製もの成果を基に血圧シミュレーションと流体温度制御のために小型ポンプについての研究を行ってきた(図3). このシステムは磁気ドラッグポンプを用いて最低と最大圧力制御を行い、ソフトウェアに保存してある血圧の波形を再生する. さらに、セラミックヒーターとサーミスターを用いて流体の温度制御を行い、血圧シミュレーションのレンジ: 75-150 mmHg, 拍動レンジ: 50-120bpm, 温度制御レンジ: 30-40C実現した.

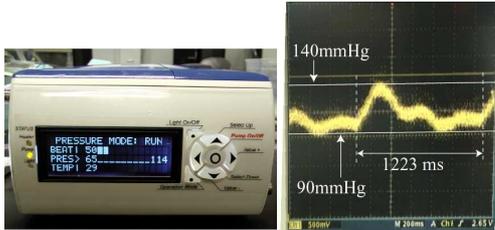


図3 小型ポンプ(左)を用いて再生した波形(右)

(2) 光弾性応力解析

① 光弾性応力解析の校正

3層膜血管モデル内圧(40-190mmHg)における人間の動脈モデル壁の応力の測定が可能になった. 光弾性応力解析用モデルのウレタンエラストマーの光弾性係数( $1.284 \times 10^{-9} \text{Pa}^{-1}$ )およびウレタンの透過率(1666.66)を確認し、校正用の画像処理ソフトウェアを独自に開発することで新たな偏光器で高精度のモデルの厚み測定が可能となった. その結果、血管モデル内圧(60-189mmHg)における膜モデルの高精度応力解析(平均誤差 3.9%)に成功した(図4-5).

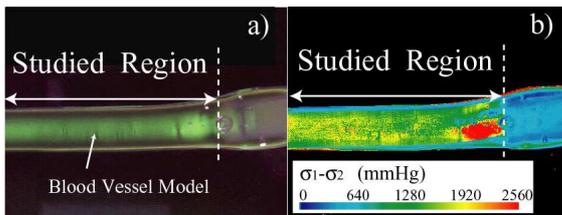


図4 a) 管モデル光弾性画像 b) その画像の高精度応力解析

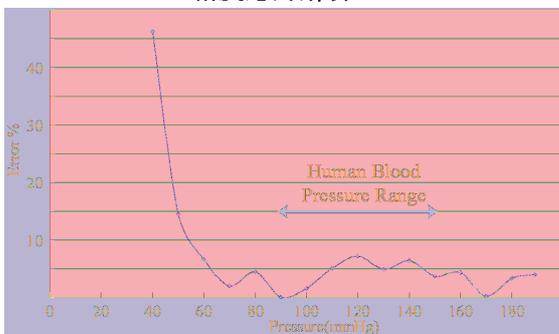


図5 モデル内圧力と応力解析精度の関係

② 光弾性応力解析

臨床的な応用として、ブレブを有する動脈瘤

3層膜モデル中へ流入波として85-115mmHgで変化する脈動が与えられた条件下で光弾性応力解析を行った. その結果、動脈瘤破裂時にブレブの存在する領域で高い応力が加わっていることが確認された(図6).

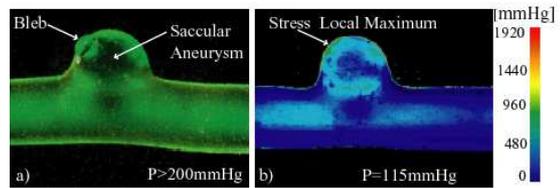


図6 a) ブレブ3層膜モデル光弾性画像 b) その画像の応力解析

3次元スキャナーを作製してML-EM方法を用いて血管モデルのための3次元応力計測についての研究を行ってきた(図7). また、マイクロカテーテルとコイルと血管壁の相互作用を見えるように動脈瘤の1層膜のモデルを作製して、その相互作用の光弾性応力解析を行った(図8).

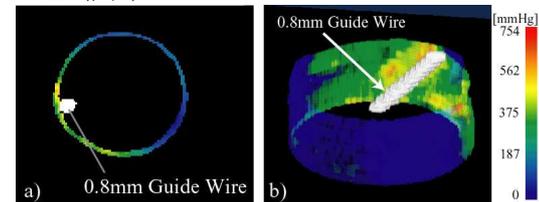


図7 a) 応力とカテーテルのスライス b) 3次元応力計測

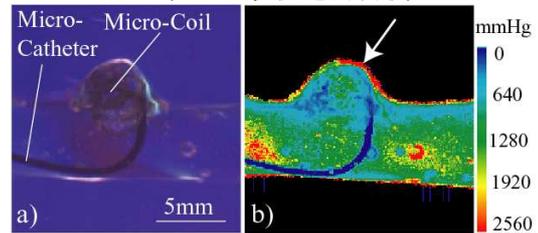


図8 a) 動脈瘤モデルに挿入したマイクロカテーテルとコイル光弾性画像 b) その画像の応力解析

(3) 双方向平面ビジョンシステム

双方向平面ビジョンシステム(図9)を用いて、リアルタイムカテーテル経路解析(3fps)が可能となった(図10). この双方向平面ビジョンシステムとカテーテル挿入ロボットを用いて、基準経路10回を再現した. さらに、その再生した経路の解析と基準経路解析を比較することで、再現した経路の定量評価が可能となった. (表1に再生した経路評価パラメータの平均テーブルを示す)

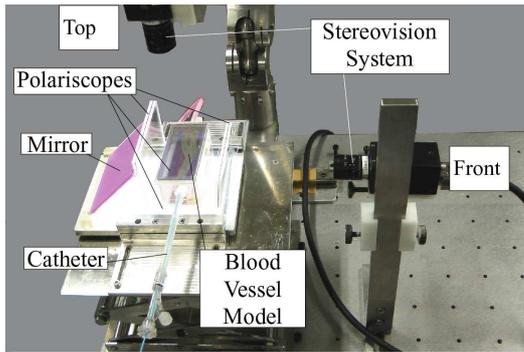


図9 双方向平面ビジョンシステム

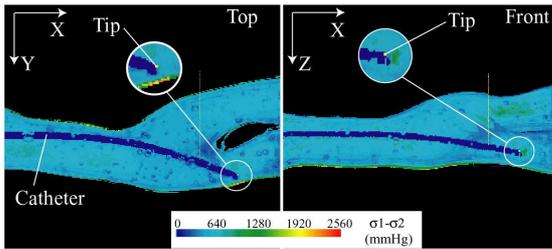


図10 双方向平面ビジョンシステムを用いてカテーテル経路解析の例.

評価パラメータ	基準経路	ロボット (平均)	
経過時間	13.06	13.79	
経路再現最大誤差	X [px]	-	76.75
	Y [px]	-	48.85
	Z [px]	-	56.84
応力< 640mmHgに	XY[%]	6.54	5.57
最大ピクセル数	XZ[%]	3.37	3.26
最大変形量	XY [px]	474	482.5
	XZ [px]	624	247.5

表1 カテーテル挿入経路評価の例

さらに、基準経路と血管内手術シミュレーションの未熟者が生成した経路の比較を図11-13に示す。X軸でのカテーテル先端の動きから、未熟者が成功するまでに、5回試みていることがわかる。さらに、5回目を試みた時にカテーテルを引張りながら、大きな応力を加えたことが明らかになった。血管モデルのピクセルの12%は応力が1280mmHG以上であることを意味する。

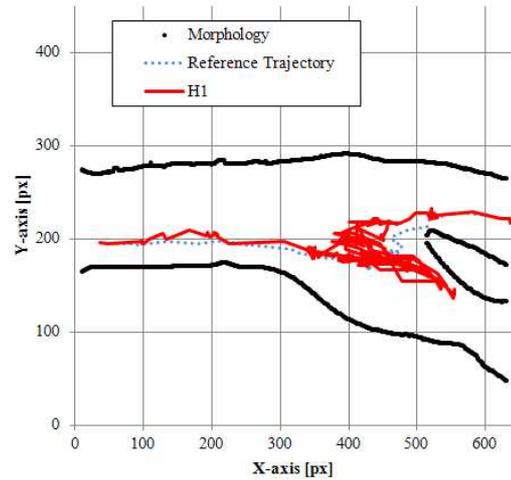


図11 血管モデルの形とカテーテル挿入経路定準経路と未熟者が作成した経路

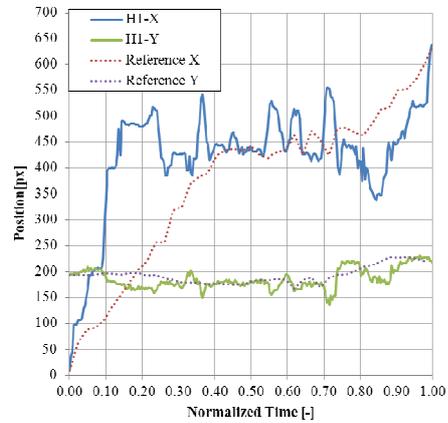


図12 カテーテル挿入経路定準経路と未熟者が作成した経路

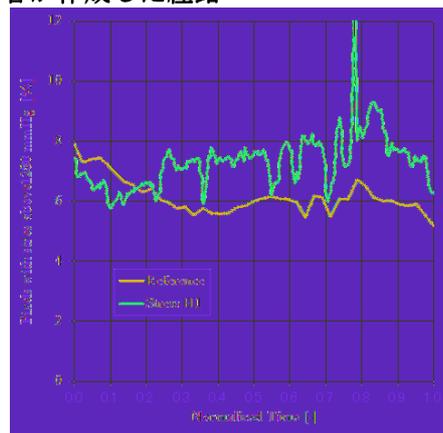


図13 定準経路と未熟者が作成した経路の応力変動

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① M. Matsushima, C. Tercero, S. Ikeda, T. Fukuda, et al., "Photoelastic stress analysis in blood vessel phantoms: three-dimensional visualization and saccular aneurysm with bleb," *Int. J. Med Robotics Computer Assisted Surgery*, Vol.7:1, pp.33-41 (2011). (査読有り)
- ② C. Tercero, M. Matsushima, S. Ikeda et al., "Photoelastic Stress Analysis Error Quantification in Vasculature Models for Robot Feedback Control," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol15:4, 2010, pp.520-526. (査読有り)
- ③ C. Tercero, S. Ikeda, E. Tijerino, et al., "Human Blood Pressure Simulation for Stress Analysis in Model of Vasculature using Photoelastic Effect," *International Journal of Automation Technology*, Vol. 3, 2009, pp.533-540. (査読有り)
- ④ C. Tercero, E. Tijerino, S. Ikeda, et al., "Bomba Híbrida para la Simulación de la Presión Arterial Humana," *Journal of Del Valle de Guatemala la University*, Vol.19, 2009, pp. 9-14. (査読有り)

[学会発表] (計 13 件)

- ① T. Fukuda, C. Tercero, M. Nakajima, S. Ikeda, R. Takamatsu, "Stress Analysis within Biomimetic Blood Vessel Model for Catheter Trajectory Evaluation," *Proceedings of 11th International Symposium on Biomimetic Materials Processing*, Nagoya, Japan, January, 25-28, 2011.
- ② C. Tercero, S. Ikeda, T. Fukuda, F. Arai, M. Negoro, I. Takahashi, "Numerical Comparison of Catheter Insertion Trajectory within Blood Vessel Model using Image Processing," *Proc. of the International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science*, Nagoya, Japan, November 9, 2010, pp.378-383.
- ③ T. Fukuda, C. Tercero, S. Ikeda and M. Negoro, "Needs and Technology for In-Vitro Endovascular Surgery Simulation," in *Proc. IEEE Workshop On Advanced Robotic and its Social Impacts*, Seoul, Korea, October 26-28, 2010.
- ④ M. Matsushima, C. Tercero, S. Ikeda,

T. Fukuda, and M. Negoro, "Three-Dimensional Visualization of Photoelastic Stress Analysis for Catheter Insertion Robot," *IEEE/RSJ International Conference on Robots and Systems*, Taipei, Taiwan, October 19, 2010, pp. 879-884.

- ⑤ C. Tercero, S. Ikeda, T. Fukuda, F. Arai, M. Negoro, I. Takahashi, "Reference Model Construction Method for Quantitative Analysis of Catheter Trajectory using Image Processing and Photoelastic Effect," *Proceedings of the 28th Congress of the Japanese Society of Robotics*, RSJ2010AC1M3-1, Nagoya, Japan, September 22, 2010.
- ⑥ C. Tercero, S. Ikeda, T. Fukuda, M. Negoro, I. Takahashi, "Correction Method for Photoelastic Stress Distribution Visualization in Models of Vasculature," *Proceedings of No.10-a JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, 242-G18, Asahikawa, Japan, June 16, 2010.
- ⑦ C. Tercero, S. Ikeda, T. Fukuda and M. Negoro, "Image Processing for Sensing Guide Wire Behaviour during Endovascular Surgery Simulation," in *Proc. of the International Symposium of Robotics*, Munich, Germany, June 8, 2010, pp.716-721.
- ⑧ C. Tercero, S. Ikeda, M. Matsushima, T. Fukuda, M. Negoro, I. Takahashi, "Photoelastic Stress Analysis Error Quantification in Vasculature Models for Robot Feedback Control," *Proceedings of IEEE-ICRA*, Anchorage, USA, May 6, 2010, pp.3680-3685.
- ⑨ T. Fukuda, C. Tercero, M. Nakajima, S. Ikeda, M. Matsushima, and R. Takamatsu, "Biomimetic Multilayered Blood Vessel Model and Applications," *Proceedings of 10th International Symposium on Biomimetic Materials Processing*, Nagoya, Japan, January 26-29, 2010.
- ⑩ M. Matsushima, C. Tercero, S. Ikeda, M. Kojima, T. Fukuda, et al., "Evaluation of stress behavior during aneurysm growth and rupture vasculature models," in the *Proc. of the Conference on System Integration*, Tokyo, Japan, December 24-46, 2009, pp.1665-1666.
- ⑪ C. Tercero, S. Ikeda, M. Matsushima, T. Fukuda, E. Tijerino, M. Negoro, I. Takahashi, "Human Blood Pressure

Simulation for Photoelastic Stress Analysis in Models of Vasculature,” Proc. of the International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science, Nagoya, Japan, November 9, 2009, pp.483-488.

- ⑫ C. Tercero, S. Ikeda, E. Tijerino, M. Matsushima, T. Fukuda, M. Negoro, I. Takahashi, “Human Blood Pressure Simulation for Stress Analysis in Model of Vasculature using Photoelastic Effect,” Proceedings of 27th Congress of the Robotics Society of Japan, Yokohama, Japan, September 15-17, 2009, 1B3-06.
- ⑬ C. Tercero, E. Tijerino, S. Ikeda, et al., “Feedback Control with Hybrid Pump for Realistic Human Blood Pressure Reconstruction,” 9th International IFAC Symposium on Robot Control, Gifu, Japan, September 9-12, 2009, pp. 645-650.

[その他]

ホームページ等

[http://www.mein.nagoya-u.ac.jp/activity/index\\_e.html](http://www.mein.nagoya-u.ac.jp/activity/index_e.html)

[http://www.mein.nagoya-u.ac.jp/www\\_groups/2010/Med001%20RA2010\\_Tercero1Eng.pdf](http://www.mein.nagoya-u.ac.jp/www_groups/2010/Med001%20RA2010_Tercero1Eng.pdf)

[http://www.mein.nagoya-u.ac.jp/www\\_groups/2010/Med002%20RA2010\\_Tercero2Eng.pdf](http://www.mein.nagoya-u.ac.jp/www_groups/2010/Med002%20RA2010_Tercero2Eng.pdf)

[http://www.mein.nagoya-u.ac.jp/www\\_groups/2010/Med003%20ResAct09Eng\\_matsushima\\_02.pdf](http://www.mein.nagoya-u.ac.jp/www_groups/2010/Med003%20ResAct09Eng_matsushima_02.pdf)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

テルセロ ラファエル (TERCERO Rafael)

名古屋大学・大学院工学研究科・COE 研究員

研究者番号：60547420

### (2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者 なし

### (4) 研究者協力者

福田 敏男 (FUKUDA TOSHIO)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70156785

新井 史人 (FUMIHITO ARAI)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90221051

根来 眞 (MAKOTO NEGORO)

藤田保健衛生大学・医学部・教授

研究者番号：90115618

池田 誠一 (IKEDA SEIICHI)

名古屋大学・大学院工学研究科・COE 研究員

研究者番号：00377821