

平成22年5月20日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19700413  
 研究課題名（和文） 管腔臓器力学特性の計測・モデル化・データ公開とシミュレータ実装  
 研究課題名（英文） Measurement, Modeling and Publication of Hollow Organ Mechanics and its Simulator Implementation  
 研究代表者  
 中口 俊哉（TOSHIYA NAKAGUCHI）  
 千葉大学・大学院融合科学研究科・助教  
 研究者番号：20361412

研究成果の概要（和文）：本研究では外科シミュレータのための生体組織，中でも管腔臓器の力学特性の新しい計測・解析法を提案した．そして，その結果を集約して一般的に利用できる生体特性データベースを構築した．また，得られた力学特性を活用して医療シミュレータを実装した．

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed new measurement and analysis methods of visceral organs, especially hollow organs such as stomach and intestine for developing surgical simulators. Then we established a database of biomechanical characteristics in order to publish for researchers. Besides, we have implemented a new surgical simulator based on the obtained data in this study.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	630,000	3,830,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用システム

キーワード：コンピュータ外科学，外科手術支援

## 1. 研究開始当初の背景

医療訓練と医療支援は互いに密な関係にあり，一方の発展が他方に多大な影響を及ぼす．申請者らの研究グループは早くからこれに着目し，支援と訓練共に研究成果を発表してきた．これらのシステムの核となるシミュレータの技術要素を大別すると(1)変形再現，(2)提示方法，(3)特性計測に分類できる．

(1)変形再現の研究では生体組織が有する

極めて複雑な力学特性（非線形性，粘弾性，非一様性，非等方性）をモデルに組み込み，如何にして実時間で外力変形を再現するかということに関心が集まっているが，最先端の計算能力を用いても全ての特性を考慮した変形の実時間再現には至っていない．(2)提示方法に関してはリアリティ・没入感を高めるデバイス開発が中心であり，視覚再現装置は高度に進化した触覚再現については

発展途上である。これらの技術要素には多くの研究力が注がれていることに対し、(3)特性計測はほぼ未知の領域のまま残されている。

解剖学、生理学、組織学の見地から生体特性の計測・解析は数多く行われてきており細胞レベルに至るまで基本特性はほぼ完全に理解されていると言える。しかしながら外科シミュレーションを目的とした、外力に対する生体組織の力学特性計測の研究成果は非常に少ない。理由として上記に挙げた極めて複雑な力学構造を有することに加え、体液循環や筋作用を考慮した *in vivo* 計測の困難が挙げられる。1970 年に最初の研究成果として動物や解剖用の人死体を用いた計測データが公開され多くのモデルに利用されてきた。しかし構造モデルの高度化にデータが対応せず、近年新たな *in vivo* 計測手法が提案された。これらは *in vivo* 人体の非線形性、粘弾性を考慮した計測を可能としたが、肝臓、腎臓、脾臓といった固体臓器しか計測できない。一方、申請者は計測データと再現デバイス間のデータ整合の困難を克服する新しい計測手法を提案しているが、効果は簡素な構造モデルに限定されている。

以上の通り、生体特性の計測はあまりに未知の部分が多く、課題は山積している。特に腹腔内の多くを占める消化器官のような中空形状を有する臓器に適応した計測手法はこれまで全く皆無である。そこで本研究では中空形状を有する臓器の有効な生体力学特性の計測に注力した。

## 2. 研究の目的

### (1) 計測実験

管腔臓器の運動機能を限りなく *in-vivo* に近い状態で計測することを目的として、クレブス溶液による生理条件再現実験を実施する。計測には複数のカメラを使い、画像処理によって 3 次元形状、組織表面の筋活動の分布をそれぞれ時系列で記録する。筋活動については、臓器表面の周方向平滑筋と軸方向平滑筋のそれぞれの運動を独立して計測する技術を確立する。

### (2) シミュレータ実装

管腔臓器の外科手技の一つである吻合は、鉗子で針や糸を細かく操作して漏れのないようにつなぎ合わせる必要があり、医師の熟練した技術を要する。手術手技を習得するために、VR トレーニングシステムが注目を集めている。VR トレーニングは実際の手術のような状況下で訓練を繰り返し行うことが可能であるため、難易度の高い手技の習得が期待されている。本研究では、管腔臓器の吻合を目的とした VR トレーニングシステムの構築を目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 計測実験

ラットを使った生体計測を行った。24 時間絶食後のラットを頸椎脱臼により犠牲せしめ、開腹して各臓器を摘出した。迅速に摘出した臓器は慎重に洗浄して使用した。十二指腸、空腸、回腸をそれぞれ 50mm の断片に切断し準備した。この腸断片をクレブス溶液で満たされた溶液層に固定し、溶液には 95%酸素と 5%二酸化炭素の混合ガスを与え、温度を摂氏 37 度に維持した。二つの同期したカメラ（解像度 1280x1024, 30fps）を溶液層の上部 2 カ所に設置し、2 方向から腸断片を観察した。一回の撮影を 30 秒間とし、2 つのカメラからの同期映像を記録した。以上、本研究で独自に構築した観察装置の様子を図 1 に示す。

記録された 2 視点の映像から画像解析によって 3 次元形状と組織表面の筋活動の分布を算出する。まず臓器表面の特徴点解析を行った結果を図 2 に示す。検出された各カメラ画像上の特徴点の対応を、パターンマッチング法により自動検出した後、正確を期すために手動により誤った対応を修正した。2 つのカメラのパラメータ（内部パラメータ、外部パラメータ）は事前に正確にキャリブレーションしており、このパラメータと対応点情報から臓器表面の 3 次元形状を復元した。なお、特徴点の検出や対応点の手動修正などは初期フレームのみを行い、2 フレーム目以降は自



図 1 臓器運動計測装置の様子

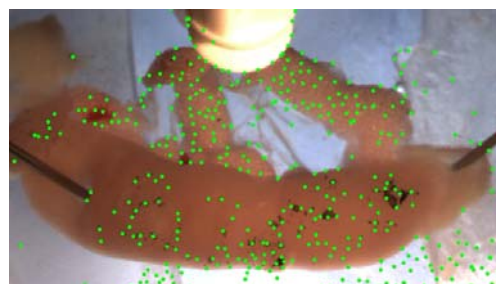


図 2 特徴点解析結果

動追跡アルゴリズムを用いて問題無く追跡することが出来た。

次に画像上の特徴点の動きから筋活動の分布を算出する。隣接する任意の2点の位置  $(p_1, p_2)$  と動き  $(\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2)$  からその領域に存在する平滑筋の動き量を推定する。算出する平滑筋の走行方向ベクトル  $\mathbf{d}_s$  と動き  $\mathbf{m}_s$  を以下の式で算出する。

$$\mathbf{m}_s = \mathbf{m}_2 - \mathbf{m}_1$$

$$\mathbf{d}_s = \frac{p_2 - p_1}{|p_2 - p_1|} \quad (1)$$

これらの値から筋運動指数  $a_s$  を算出する、

$$a_s = \mathbf{m}_s \cdot \mathbf{d}_s \quad (2)$$

この筋運動指数  $a_s < 0$  の場合は筋が収縮、 $a_s > 0$  の場合は筋の弛緩を表す。

最後に管腔臓器の形状から、筋運動指数  $a_s$  を周方向と軸方向の成分に分離した。以上の計算を全ての隣接する特徴点間で実施することによって、組織表面の筋運動分布を得ることが出来た。

## (2) シミュレータ実装

本研究で用いるモデルを図3に、吻合シミュレーションのフローを図4に示す。図3で示される鉗子は触覚デバイスにより操作される。まず、管腔臓器と糸の挙動を再現するモデルの構築を行った。次に、計算量を抑えたモデル間の接触処理や、吻合のための管腔臓器に対する針の挿入処理、針を挿入後の管腔臓器に糸を通したときの管腔臓器と糸の相互作用に関する処理を提案した。

管腔臓器の挙動再現モデルを構築するために、有限要素法を用いた。有限要素法は、弾性体を有限個の小さな弾性要素に分割して弾性体全体の変位を解析する手法である。分割された要素を構成する各頂点の力  $\mathbf{f}$  と変位  $\delta$  は剛性方程式と呼ばれる以下の式で表される。

$$\mathbf{f} = \mathbf{K} \cdot \delta \quad (3)$$

ここで  $\mathbf{K}$  は剛性マトリクスと呼ばれ、弾性体の物理特性を表す。この方程式から変位  $\delta$  を求めることで、弾性体の挙動が得られる。今回、有限要素法を用いて厚みのある管腔臓器モデルを構築した。一般に式(3)の変位を求めるために応力を入力とするが、鉗子は触覚デバイスの位置情報を用いて操作されるため、対応付けが求められる。そこで糸の手法を用いて触覚デバイスで操作する頂点  $i$  に対する力  $\mathbf{f}_i$  を算出し、 $\mathbf{f}_i$  を式(3)に代入する

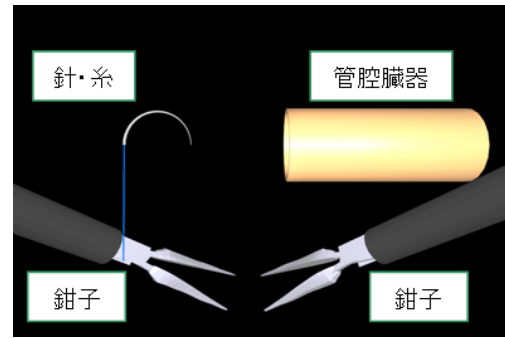


図3 シミュレーションのモデル

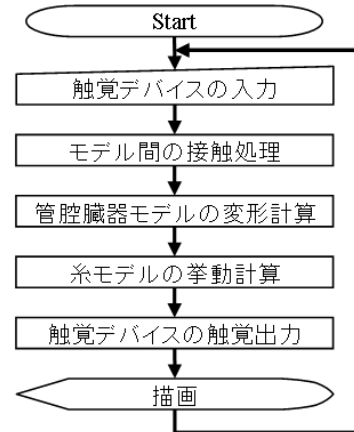


図4 処理の流れ

ことで管腔臓器の挙動計算を行った。

モデル間の接触処理では、鉗子・管腔臓器のポリゴン、糸の線分を対象に接触判定を行い、接触が検出された対象間で没入の抑制を行う。接触判定は判定の対象間で総当たり的に行われるため、計算量を削減するためには接触判定回数を削減する必要がある。そこで、接触判定を行う前に、Discrete Oriented Polytope (DOP) と呼ばれるボックスを各ポリゴン・線分に対して作成し、DOP間の重なり判定を行う。DOP間で重なりがなければ接触することはないため、判定回数の削減が可能となる。DOP間で重なりが検出された場合に接触判定を行い、接触が検出されたときに没入を抑制することで接触を考慮した挙動の再現が可能となった。また糸の挙動再現では糸同士の接触が起こるが、糸を構成する線分間の接触を各描画フレームで検出することは困難である。そこで、線分を囲むようにSphereを作成し、Sphere間で重なりが検出されたときに接触とした。接触応答は、Sphere間が重なる深度に合わせて没入の抑止力を変化させることで、糸の接触に対する挙動を再現した。

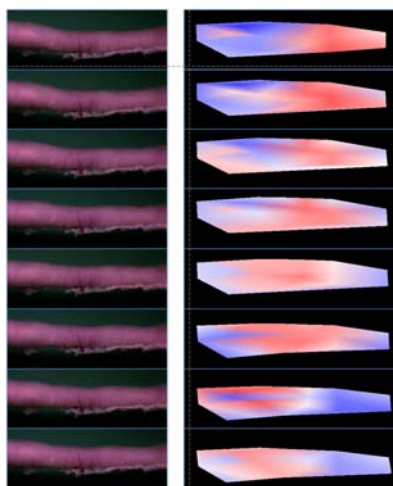
針の先端が管腔臓器に接触したときに、針の挿入を再現する処理を行った。臓器と針の接触が検出されると、針の先端に最も近い管腔臓器の節点を操作点として先端の位置に

変位させる。その後、接触点と同位置にある針の頂点と隣接した頂点に対して、接触点に隣接する管腔臓器の4頂点との総距離を計算し、最短となる針の頂点に接触点を移行させる。この流れを針の挿入がなくなるまで続けることで、針が挿入される様子を再現することが可能となった。

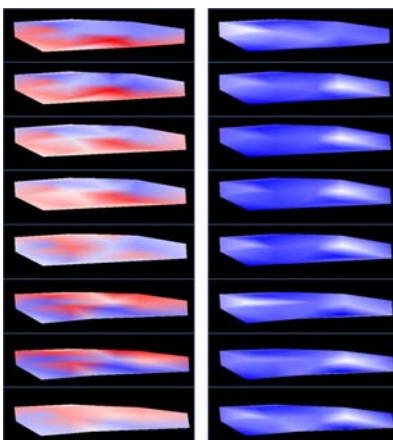
#### 4. 研究成果

##### (1) 計測実験

提案手法によって得られた平滑筋の運動の様子と形状変化の様子を図5に示す。図5(a)は1点のカメラからの撮影画像を示し、図5(b),(c)はそれぞれ軸方向と周方向の筋運動を算出した結果となっている。ここで赤色に示した領域は筋の収縮を意味しており、青色に示した領域は筋の弛緩を意味している。図5(b)から軸方向平滑筋の収縮が右から左へと伝搬していることがわかる。また図5(c)から周方向平滑筋の収縮が下から上へと伝搬していることがわかる。また、図5(d)は臓器表

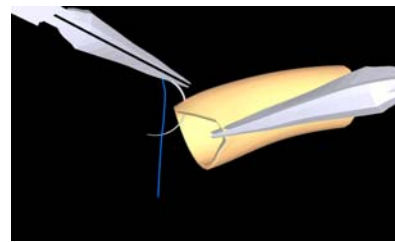


(a) 撮影画像 (b) 軸方向筋運動

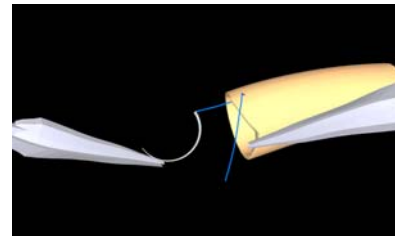


(c) 周方向筋運動 (d) 3次元形状

図5 時系列変化の計測結果

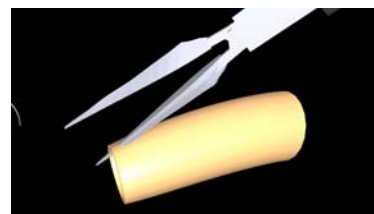


(d) 針の挿入再現

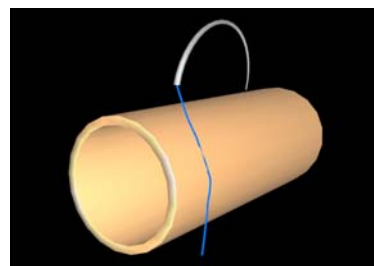


(e) 管腔臓器と糸の相互作用

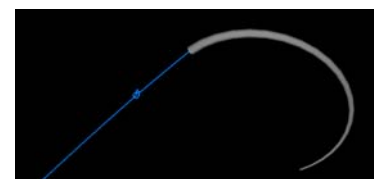
図6 シミュレーション結果



(a) 鉗子-管腔臓器



(b) 管腔臓器-糸



(c) 糸の自己接触

図7 接触処理結果

面の3次元形状の復元結果で、奥行きを青色で示している。このように本研究で提案した方法により、通常では観察できなかった平滑筋の運動と、三次元形状を同時に観察することに成功した。

##### (2) シミュレータ実装

図6にシミュレーションの結果を示す。管腔臓器モデルは2800の要素、600の頂点を用

いて構築した。糸モデルの頂点数は 69 である。接触判定に用いられた管腔臓器、鉗子、糸モデルのポリゴン数・線分数はそれぞれ、560, 616, 68 である。図 6 より、針の挿入処理および管腔臓器と糸の相互作用が適切に行われていることがわかる。図 7 に接触処理結果を示す。図 7(a), (b), (c) より、鉗子-臓器、臓器-糸の接触、糸の自己接触の再現が適切に行われていることがわかる。本システムは PentiumD 3.0GHz, メモリ 2GB のコンピュータ上で約 30 fps で描画が更新され、対話的に行うことが可能となった。

### (3) データベース構築

本研究によって得られた成果をデータベース化した。計測によって得られた数値だけでなく、算出の元となるオリジナル撮影画像と、計測の様子を俯瞰的に撮影した画像もデータベース素材として加えた。現在、データベースの一般公開に向け準備中を進めている。WEB で公開するための管理・運用スクリプトを開発しており、また、データ使用に関する契約書類を準備中である。

## 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 5 件)

[1] Jingbo Zhao, Toshiya Nakaguchi, Hans Gregersen, Biomechanical and Histomorphometric Colon Remodelling in STZ-Induced Diabetic Rats, Digestive Diseases and Sciences, 査読有, Vol.54, No. 8, 2009, pp.1636-1642

[2] Jian Yang, Jingbo Zhao, Toshiya Nakaguchi, Hans Gregersen, Biomechanical changes in oxazolone-induced colitis in BALB/C mice  
Journal of Biomechanics, 査読有, Vol. 42, No. 7, 2009, pp. 811-817

[3] 小石毅, 森田慎也, 中口俊哉, 川口泰弘, 津村徳道, 三宅洋一, 1 次元弾性要素配列を用いた針のしなりと生体組織の変形の実時間シミュレーション, 生体医工学, 査読有, Vol.46, No.6, 2008, pp.629-646

[4] 牛木卓, 松隈ちひろ, 小石毅, 中口俊哉, 津村徳道, 三宅洋一, VR 腹腔鏡下手術トレーニングシステムのための複数の構造梁を用いたリアルタイム臓器変形モデル, VR 医学, 査読有, Vol.6, No.1, 2008, pp.43-50

[5] 岡田義道, 小石毅, 牛木卓, 中口俊哉, 津村徳道, 三宅洋一, 腹腔内三次元復元を目的としたステレオ対応探索の高速化手法, Medical Imaging Technology, 査読有, Vol.25, No.5, 2007, pp.389-398

[学会発表] (計 9 件)

[1] Tatsuya Namae, Ginpei Okada, Toshiya Nakaguchi, Norimichi Tsumura 3-D Measurement for Internal Organ Surface Using Kaleidoscope, Optics-photonics Design & Fabrication (ODF'10), 20PSP-39, Yokohama, Japan, Apr. 2010

[2] Takeshi Koishi, Ginpei Okada, Tatsuya Namae, Toshiya Nakaguchi, Norimichi Tsumura, Yoichi Miyake, Evaluation of the two pattern projection methods in the body surface shape measurement for the system design of projection-image-guided laparoscopic surgery, Int'l Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2009), Vol.4 Supplement 1, p.S280 Berlin, Germany, June 2009

[3] Tatsuya Namae, Takeshi Koishi, Toshiya Nakaguchi, Norimichi Tsumura, Yoichi Miyake, 3-D Measurement for minimally invasive surgery by structured light system using kaleidoscope, Int'l Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2009), Vol.4 Supplement 1, p.S276 Berlin, Germany, June 2009

[4] Keiji Nishimura, Takeshi Koishi, Toshiya Nakaguchi, Sinya Morita, Norimichi Tsumura, Yoichi Miyake, Deformable Hollow Organ Models with Self-Collision Processing between Inner Surfaces, SPIE, Medical Imaging, Vol.7261, 7261-78, Orlando, USA, Feb., 2009

[5] Toshiya Nakaguchi, Jian Yang, Jingbo Zhao, Hans Gregersen, Hideki Hayashi, Norimichi Tsumura, Yoichi Miyake, An Imaging Method for 4D Motility Analysis of Small Intestine, Neurogastroenterology and Motility (NGM2008), FRI081, p.46, Lucerne, Switzerland, Nov., 2008

[6] Toshiya Nakaguchi, Yasuhiro Kawaguchi, Norimichi Tsumura, Yoichi Miyake, Modeling and Measurement of Surgical Incision for Virtual Training System, The 22nd International Congress and Exhibition of Computer Assisted Radiology

and Surgery (CARS), p.S293, Barcelona, Spain, June, 2008

[7] Takeshi Koishi, Suguru Ushiki, Toshiya Nakaguchi, Hideki Hayashi, Norimichi Tsumura, Yoichi Miyake, A navigation system using projection images of laparoscopic instruments and a surgical target with improved image quality, Proceedings of SPIE, Medical Imaging, Vol.6918, 6918-35, San Diego, USA, Feb., 2008

[8] Yoshimichi Okada, Takeshi Koishi, Suguru Ushiki, Toshiya Nakaguchi, Norimichi Tsumura, Yoichi Miyake, A fast stereo matching algorithm for 3D reconstruction of internal organs in laparoscopic surgery, Proceedings of SPIE, Medical Imaging, Vol.6918, 6918-91, San Diego, USA, Feb., 2008

[9] Suguru Ushiki, Chihiro Matsuguma, Takeshi Koishi, Toshiya Nakaguchi, Norimichi Tsumura, Yoichi Miyake, Liver Deformation Model for Two Point-Contacts Based on Beam of Structural Mechanics, 7th Int'l. Special Topic Conf. on Informaion Technology Applications in Biomedicine (ITAB2007), pp.123-126, Tokyo, Nov. 2007

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中口 俊哉 (TOSHIYA NAKAGUCHI)

千葉大学・大学院融合科学研究科・助教

研究者番号：20361412