

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00176

研究課題名(和文) 心拍と軸流を考慮した大動脈内の血流と大動脈弁開閉動作の解析に関する研究

研究課題名(英文) Study on Analysis of Blood Flow and Aortic Valve Behavior by Considering Heartbeat and axial-flow

研究代表者

向井 信彦 (MUKAI, NOBUHIKO)

東京都市大学・知識工学部・教授

研究者番号：20350233

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)： 実患者のCTデータを基にして構築したモデルを用い、左心室から大動脈への血流の可視化と左心室及び大動脈内における圧力変化を調べた。

モデルの構築にはデータの削減及び粒子流出抑制のためのダミー粒子付加を行い、また、流体と弾性体の挙動解析にはコーシーの運動方程式を基に流体と弾性体の構成方程式を適用して、ナビエ・ストークスとコーシー・ナビエの方程式を導出することで、流体と弾性体の相互作用の解析を容易にした。

シミュレーションの結果、左心室内の圧力上昇に伴って大動脈弁が開閉し、血液が大動脈に流れる様子を表示できた。また、圧力変化を文献値と比較した結果、左心室内の圧力は文献値と同等の変化を示した。

研究成果の概要(英文)： I have visualized blood flow from the left ventricle to the aorta and researched the pressure change in them with the simulation model generated from a real patient CT data.

In the model generation, data reduction and addition of dummy particles for prevention of outflow particle have been performed. In addition, Navier-Stokes equation and Cauchy-Navier equation are derived from Cauchy equation of motion by applying constitutive equations of liquid and elastic body for the behavior analysis of them, so that it has become easier to analyze the interaction between them.

As the result of the simulation, the aortic valve has opened according to the pressure ascension in the left ventricle, and the blood flow into the aorta has been observed. By the comparison of the simulation result with pressure change in a medical book, I have confirmed that the pressure change in the left ventricle was similar to the data in the book.

研究分野：情報学

キーワード：可視化 グラフィクス シミュレーション 医療応用

1. 研究開始当初の背景

現在、計算機能力の向上と共に、CG (Computer Graphics) や VR (Virtual Reality)、さらには AR (Augmented Reality) 技術を利用した様々なシステムが開発され、特に医療現場では大いに利用されている。例えば、VR 技術を活用した手術シミュレータを用いると、教科書やビデオだけの視覚的な学習ではなく、触覚や力覚を実現することで手術感覚を養う訓練が可能となる。また、計算機内に構築した人体モデルや臓器モデルを用いると、手術シミュレーションが可能となり、術中の計画や術後の予測を立てることもできる。さらに、実患者の CT (Computed Tomography) 画像などを基にして構築したデータを術中に表示することで、臓器と術具の位置関係を明確に把握できる手術ナビゲータも開発されており、これらのシステムを活用すれば合併症を未然に防ぎ、手術の成功率を格段に向上させることが可能となる。

このような技術の向上を背景として、東京慈恵会医科大学では、指先の感覚を伴う「肝臓」の手術シミュレータを開発し、日本とドイツの間で医療画像の伝送を行うことで遠隔医療の可能性を検証してきた。また、名古屋大学では、実患者の「大腸」データを基にした仮想内視鏡を開発し、実際の手術では見ることのできない角度からの内視鏡画像を表示することで、内視鏡手術の普及に貢献してきた。さらに大阪大学では、計算機上に構築した実患者のデータを基にして、人工股関節手術を受ける患者の「骨」の効率的な切削方法をシミュレーションしてきた。このように、各研究機関で様々な医療システムが開発されてきたが、システムの大半は、肝臓、大腸、骨などの局所的な部位に留まるものであった。

我々も、1997年より「黄斑前膜症」を対象とした眼科の手術シミュレータを開発し、高度で繊細な技術を要する眼科手術の支援を行ってきた。しかしながら、人体のあらゆる部位には血管があり、血管内を流れる血流が必要な栄養素を人体の細部に運んでいることを考えると、血管を対象とした医療システムは各研究機関で開発されている多くの手術シミュレータに利用することができる。このような考えの下に、2000年より「脳動脈瘤」を対象とした脳神経外科用手術シミュレータを開発し、「血管」という細長い特性を持つ部位に対するコンピュータシミュレーションを行ってきた。その後、脳に限らず血管そのものを対象として、手術シミュレータを対象とした血管の変形と出血の同時処理における高速化に関する研究を行い、さらに、血管を流れる血流の影響による血管の変形を解析するために、手術シミュレータ向け血管内圧力を考慮した血管の変形方式を研究してきた。そして、人体における血管で最も太く最も重要な血管は「大動脈」であることから、大動脈を対象として大動脈内の血流を

制御する「大動脈弁」の手術支援を目的として、大動脈弁にかかる応力分布の可視化に関する研究を行ってきた。

このように、血管の変形や血管内における血流、さらには大動脈内にある大動脈弁にかかる応力分布をコンピュータシミュレーションして、結果をCGで可視化することにより、難度の高い大動脈弁形成術の支援を行ってきた。しかしながら、より正確なシミュレーションを行うためには、実患者のデータを基にしたモデルの構築と、大動脈内の血流を引き起こす心臓の拍動(心拍)の考慮、および大動脈内における血流(軸流)の検討が必要不可欠であると判断した。

2. 研究の目的

今までに行ってきた血管の変形や血流に関する研究、特に大動脈内を流れる血流と大動脈弁の手術に対する術前計画のコンピュータシミュレーションで得た知見を活かして、さらなる精度の高いシミュレーションを行うために、実患者のデータを用いたモデルの構築と、心臓の拍動および大動脈内の軸流を考慮したコンピュータシミュレーションを基にした、大動脈内の血流と大動脈弁の開閉動作に関する解析を本研究の目的とする。

3. 研究の方法

(1) シミュレーションモデルの構築

従来のコンピュータシミュレーションでは、一般的な心臓を対象として、モデリングソフトウェアを用いて仮想的に構築したCGモデルを用いていた。しかしながら、精度の高いシミュレーションを行うためには、実物の心臓データを基にしたシミュレーションモデルの構築が必要である。

心臓の画像データはX線CTなどで得られるが、基本的には2次元画像であるため、奥行きを持つ複数枚の画像を3次元的に並べることで体積を持つボリューム画像を生成する。次に、生成されたボリューム画像からノイズ除去などを施して心臓の壁を抽出する。ここで、X線CT画像の全画素を用いてシミュレーション用モデルを構築すると、データ容量が膨大となる。特に、本シミュレーションでは粒子法を採用しているため、各画素(3次元的にはボクセル)を1つの粒子としてシミュレーション用モデルを構築すると、粒子の数が多すぎて通常の計算機では扱うことのできないメモリ容量が必要となる。そこで、画像データを削減し、シミュレーションモデルとして不具合が生じない程度の粒子数に抑える。

さらに、粒子法では高圧を持つ粒子が計算対象領域から流出することを抑制するため、ダミーとしての壁粒子も必要となるため、これらの粒子数も考慮してモデルを構築する。なお、大動脈弁はX線CTで鮮明に撮像されないため、文献を基にモデリングソフトウェアを用いてモデルを構築する。

(2) シミュレーション手法の確立

本研究は、大動脈内の血流と大動脈弁の開閉動作の解析が目的である。つまり、血液である流体と大動脈壁、あるいは大動脈弁という弾性体の両方を扱う必要がある。通常、流体の挙動解析には粒子法を、弾性体の解析には有限要素法を適用する。しかしながら、2つの異なる手法を適用すると、2つの物質間における力の相互作用を解析することが困難となる。そこで本研究では、2つの異なる物質に対しても物質間の相互作用を容易に解析できるような式を導入する。

基本的に流体や弾性体のような連続体の解析には、連続の式とコーシーの運動方程式を適用する。密度を ρ 、時間を t 、物質の速度を \mathbf{u} 、応力を $\boldsymbol{\sigma}$ 、外部加速度を \mathbf{k} とすると、連続の式およびコーシーの運動方程式はそれぞれ式()および式()で表現できる。

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (\text{I})$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{k} \quad (\text{II})$$

上記式に流体および弾性体の構成方程式を適用することで、それぞれ式()および式()に示す、ナビエ・ストークスおよびコーシー・ナビエの方程式を得ることができる。

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{k} \quad (\text{III})$$

$$\rho \frac{D^2 \mathbf{u}}{Dt^2} = (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{k} \quad (\text{IV})$$

ただし、 λ と μ はラメ定数であり、 η は粘性係数である。これらの方程式を基に大動脈内における血流と大動脈弁の開閉動作を解析する。式()および式()を解くことでモデルを構成する各粒子の速度を求めることができ、粒子の速度を時間積分することで各粒子の位置が求まる。

しかしながら、血流の速度は本来心臓の拍動(心拍)により決定されるため、本研究では一心拍における大動脈および左心室内の圧力変化を調べる。

(3) 医学的見地からの評価

最後に、本研究で用いた手法の妥当性を示すために医学的見地からの評価を行う。

- 1) 左心室から大動脈への血流に応じて大動脈弁が開閉する様子を可視化し、超音波画像における大動脈弁の開閉動作と比較する。
- 2) 左心室及び大動脈内の圧力変化をグラフ化し、グラフの変化を文献値と比較することで、手法の妥当性を検討する。

4. 研究成果

本研究で構築したシミュレーション用粒子モデルを図1に示す。

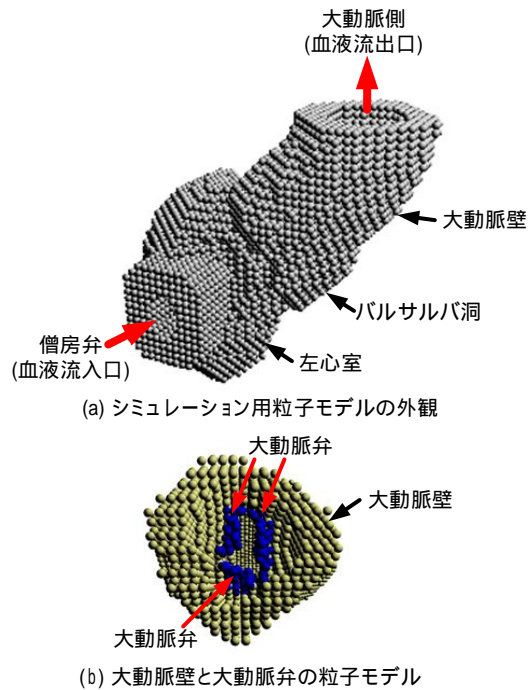


図1 シミュレーション用粒子モデル

図1(a)がシミュレーション用粒子モデルの外観であり、図1(b)がモデルのバルサルバ洞内にある大動脈弁である。大動脈弁は通常3葉弁であるため、本シミュレーションでも3葉弁としてモデルを構築している。

図1(a)左下にある僧房弁から血液が流入して左心室内で充満すると左心室内の圧力が高まり、左心室内と大動脈内で圧力差が発生し、図1(b)に示すように大動脈弁が開いて血液は大動脈内に流れる。シミュレーションでは大動脈側に流れた血液がモデル外に流出すると血液粒子を削除している。

また、図2にシミュレーションにおける左心室から大動脈への血液粒子の流れを示す。ただし、モデル内は不可視であるため、CG技法を用いてモデルの断面を2次的に表示している。なお、右上にあるスケールは粒子が持つ圧力を示している。図2(a)はシミュレーション開始後40[ms]の様子であり、僧房弁から血液が流入していることが分かる。また、血液粒子の圧力は未だ低い。シミュレーション開始後、90[ms](b)や270[ms](c)では未だ左心室の圧力は低いが、335[ms](d)になると圧力は高くなり、350[ms](e)では圧力が約10[kPa]に達して大動脈弁が開いて、血液粒子が左心室から大動脈側に流れる。さらに、365[ms](f)になると左心室内の圧力は約15[kPa]まで高まり、多くの血液粒子が大動脈側に流れる。

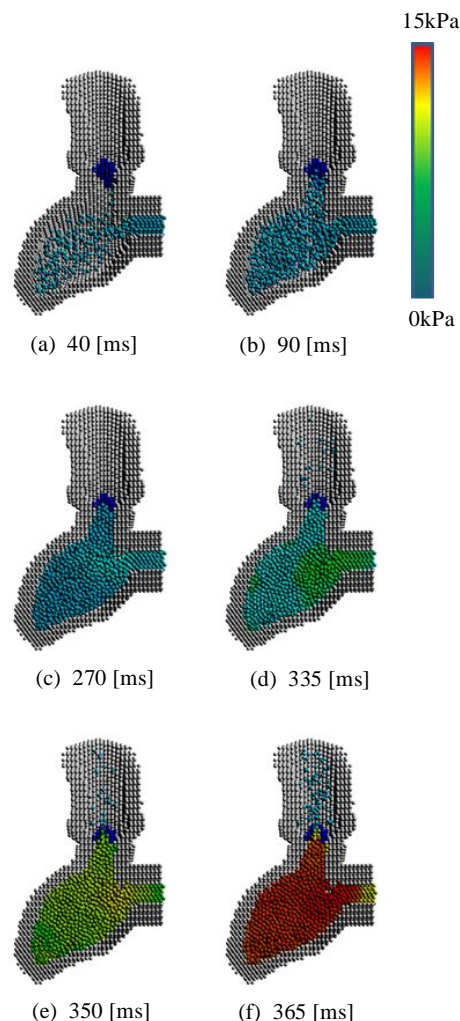


図2 左心室から大動脈への血流の様子

さらに、シミュレーションにおける左心室および大動脈内の圧力変化を図3に示す。

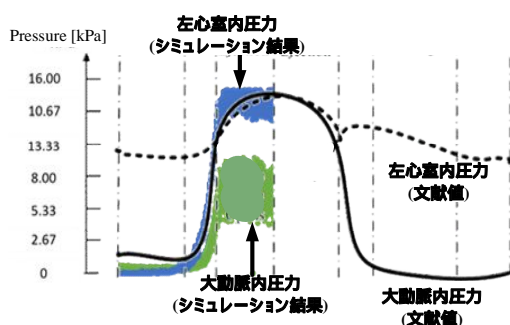


図3 左心室および大動脈内の圧力変化

図3は一心拍における左心室および大動脈内の圧力変化を、文献値を基にして作成したグラフ上に重畳表示した図である。図3より、左心室内の圧力変化は文献値とほぼ同等となり、シミュレーション手法が妥当であったことが判る。しかしながら、大動脈内の圧力は文献値よりも低い。これはシミュレーションの初期状態において大動脈内に粒子が

存在しないことが原因と考えられる。したがって、今後は初期状態においても大動脈内に文献の初期圧力に応じた粒子を配置して文献と同等な圧力変化を実現できるように手法を再検討する必要がある。

また、円筒を用いた単純な血管モデルにおいて、血液を高速で流すと軸流が発生することが判った。しかしながら、これは血液粒子が円筒内部の壁に衝突した際の反射により、血液が回転して結果的に軸流となったことも判明した。一方、実患者のデータを用いたモデルでは円筒形のような単純なモデルではないため、血液粒子が大動脈壁の内部で反射を起こしても明確な軸流とはならなかった。したがって、これらの点については今後検討を続けていく必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

向井信彦, 江藤祐介, 張英夏, “雪質の分布を考慮した屋根雪の分裂と滑落の表現手法”, 映像情報メディア学会誌, Vol.71, No.11, 2017, pp.J252-J258, 査読有, DOI:

<https://doi.org/10.3169/itej.71.J252>

Nobuhiko Mukai, Yuto Hizono, and Youngha Chang, “Waterfall Simulation with Spray Cloud in different Environments”, The Journal of the Society for Art and Science, Vol.15, No.3, 2016, pp.111-119, 査読有, <http://www.art-science.org/journal/v15n3/index.html>

張英夏, 飯田智大, 向井信彦, “自然画像におけるドミナントカラー抽出法”, 画像電子学会誌, Vol.44, No.4, 2015, pp.637-643, 査読有, http://www.iieej.org/gakkaishi/IIEEJ_Vol44-No4.pdf

三田直紀, 張英夏, 向井信彦, “高密度比を考慮した泡の3次元崩壊シミュレーション”, 芸術科学会論文誌, Vol.14, No.3, 2015, pp.66-72, 査読有, <http://www.art-science.org/journal/v14n3/v14n3pp66/artsci-v14n3pp66.pdf>

〔学会発表〕(計 20 件)

Nobuhiko Mukai, Yuki Matsuura, Masamichi Oishi, and Marie Oshima, “Chromatic Aberration based Depth Estimation in a Fluid Field”, ICIGP, 2018

森紀美江, 武井良子, 山田紘子, 向井信彦, 石津剛志, 張英夏, 長谷川和子, 山下夕香里, 高橋浩二, “舌超音波画像の構音治療に対する機能評価の有用性の検討”, 日本超音波医学会, 2017

石津剛志, 向井信彦, 森紀美江, 武井良子, 山田紘子, 張英夏, 山下夕香里, 長谷川和子, 高橋浩二, “舌基準モデルの変形による側音化構音患者の舌運動表現”, 日本超音波医学会, 2017

Nobuhiko Mukai, Tsuyoshi Ishizu, Kimie Mori, Yoshiko Takei, and Hiroko Yamada, “3D Tongue Model Construction and the Motion Regeneration”, SMIT, 2017

夏目拓也, 大石正道, 向井信彦, 大島まり, “脳動脈瘤塞栓術を目的とした液体注入シミュレーションの検討”, 日本機械学会, 2017

青山和広, 岡本有平, 張英夏, 向井信彦, “粒子法を用いた大動脈のモデル化と大動脈弁の開閉シミュレーション”, 第17回日本VR医学会学術大会, 2017

Nobuhiko Mukai, Yuhei Okamoto, Kazuhiro Aoyama, and Youngha Chang, “Blood Flow and Pressure Change Simulation in the Aorta with the Model Generated from CT Data”, SIMULTECH, 2017

石津剛志, 向井信彦, 森紀美江, 武井良子, 山田紘子, 張英夏, 山下夕香里, 長谷川和子, 高橋浩二, “超音波画像を基にした舌基準モデルの構築と動画化”, 日本超音波医学会, 2017

Nobuhiko Mukai, Yusuke Eto, and Youngha Chang, “Representation Method of Snow Splitting and Sliding on a Roof”, AET, 2017

Nobuhiko Mukai, “Keynote Speech 1: Physical Simulation with Particle Methods”, URST, UR(UAE), EAP & EIRAI International Conference, 2017

Nobuhiko Mukai, Tomofumi Takahashi, Ryosuke Ishizuka, and Youngha Chang, “Aortic Valve Simulation based on Blood Flow Velocity”, SMIT, 2016

石塚良介, 張英夏, 向井信彦, “血流速度を基にした大動脈弁の開閉シミュレーション”, 映像情報メディア年次大会, 2016

向井信彦 “画像工学の医療応用”, 昭和大学学士会, 2016

三田直紀, 向井信彦, 張英夏, “泡の上昇と崩壊のシミュレーション”, Visual Computing/グラフィクスとCAD 合同シンポジウム, 2016

石津剛志, 向井信彦, 森紀美江, 武井良子, 山田紘子, 張英夏, 山下夕香里, 長谷川和子, 高橋浩二, “2次元超音波画像からNスプライン曲線を利用した舌表面3次元形状モデルの構築”, 日本超音波医学会, 2016

Nobuhiko Mukai, Tomofumi Takahashi, and Youngha Chang, “Particle-based Simulation on Aortic Valve Behavior

with CG Model Generated from CT”, VISIGRAPP, 2016

Nobuhiko Mukai, “Generation of the Aorta Model and Simulation of the Aortic Valve with Particle Method”, SMIT, 2015

Nobuhiko Mukai, Naoki Mita, and Youngha Chang, “Bubble Rupture Simulation by Considering High Density Ratio”, SIGGRAPH, 2015

Naoaki Nishibe, Nobuhiko Mukai, and Youngha Chang, “Spray Cloud Simulation by Considering Environment Conditions”, NICOGRAPH International, 2015

近藤貴大, 向井信彦, 森美江, 武井良子, 山田紘子, “超音波画像を基にした舌運動の再現”, 日本超音波医学会, 2015

〔その他〕

ホームページ等

URL <http://www.vgl.cs.tcu.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

向井 信彦 (MUKAI Nobuhiko)
東京都市大学・知識工学部・教授
研究者番号: 20350233

(4) 研究協力者

石塚 良介 (ISHIZUKA Ryosuke)

高橋 智史 (TAKAHASHI Tomofumi)

岡本 有平 (OKAMOTO Yuhei)

青山 和広 (AOYAMA Kazuhiro)