

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K11330

研究課題名(和文) 粒子シミュレーションによる左心室から大動脈への血流の可視化と圧力変化の検証

研究課題名(英文) Validation of Blood Flow Visualization and Pressure Change from the Left Ventricle to the Aorta using Particle Simulation

研究代表者

向井 信彦 (Mukai, Nobuhiko)

東京都市大学・情報工学部・教授

研究者番号：20350233

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では左心室から大動脈への血流の可視化と血流に伴う圧力変化の粒子法によるシミュレーションを行った。左心室や大動脈は弾性体、血液は流体であるため、コーシーの運動方程式を基にして、弾性体用のコーシー・ナビエと流体用のナビエ・ストークスの方程式を導出した。また、X線CT画像を基に、計算リソースを考慮しながら粒子モデルを作成した。シミュレーションを行ったところ、僧帽弁口から左心室に血液が流入した後、左心室の収縮が始まって左心室内圧力が大動脈内圧力よりも高くなると、大動脈弁が開口して血液が左心室から大動脈へ流れる様子を可視化することができ、また、このときの圧力変化を調べると文献とほぼ一致した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

先行研究では大動脈の円筒モデルを用いていたり、実データを基にしても左心室のみのモデルであったりしていたのに対し、本研究では実データを基にして左心室と大動脈の粒子モデルを構築し、粒子法を用いたシミュレーションを行った。また、従来では左心室から大動脈への血流を流線で表示していたのに対し、本研究では粒子を用いて血液の流れを可視化すると共に、粒子の圧力を色スケールに従って表示することで血液の流れを詳細に可視化できたことは学術的意義が高い。さらに、シミュレーション結果の圧力変化が文献とほぼ一致したことにより、今後の術前シミュレーションに本研究の成果を活用する見込みが立ったことは社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：In this research, blood flow from the left ventricle to the aorta and the pressure changes in them have been investigated by the simulation using a particle method. Cauchy-Navier and Navier-Stokes equations of motion have been derived since two different materials should be treated in the simulation. The simulation model has also been generated using particles based on X-ray computed tomography. As the results of the simulation, blood flow has been visualized using particles. After blood flow into the left ventricle through the mitral valve hole, the left ventricle was contracted, and blood flow into the aorta through the opened aorta valve from the left ventricle due to the pressure difference between the left ventricle and the aorta. In addition, the simulated pressure changes in the left ventricle and the aorta almost corresponded to those in the reference.

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

- (1) 厚生労働省の調査によると日本人の死因第2位は心疾患であり、狭心症や心筋梗塞などが含まれる。特に、心臓から全身に血液を送り出す大動脈は人体で最も太く最も重要な血管であり、大動脈弁が血流のコントロールをしている。このため、大動脈弁膜症になると正常な血液循環が行われず、弁機能回復のためには手術が必要となる。手術には置換術と形成術の2種類があるが、いずれも術前におけるコンピュータシミュレーションが必要不可欠である。
- (2) 術前における一般的なコンピュータシミュレーションでは、大動脈を円筒で近似し、有限要素法を用いた弁の挙動解析と流線を用いた血流の可視化を行っている。また、大動脈への血流には大動脈弁の両側に位置する左心室と大動脈の形状に起因する圧力が大きく影響しているため、コンピュータシミュレーションに用いるモデルは単純な円筒ではなく、実データを用いて作成する必要がある。さらに、血流を流線として表示するのではなく、左心室と大動脈の圧力差により血液粒子がどのように移動するのかを粒子法を用いて可視化し、結果として得られる左心室や大動脈内の圧力変化を文献と比較することで手法の妥当性を評価する必要がある。

2. 研究の目的

大動脈弁手術の中でも難易度が高い弁形成術を対象とした詳細なコンピュータシミュレーションの実現を目的とし、以下の課題に取り組む。

- (1) 大動脈弁の開閉により血流のトポロジーが変化するため、トポロジーに対して頑強な粒子法を用いたシミュレーションを行う。
- (2) 実データ(CT データ)を用いて大動脈弁の両側に位置する左心室と大動脈のモデル化を行うことで単純な円筒モデルでは解析できない詳細な解析を行う。
- (3) 弾性体と流体の支配方程式を用いて大動脈弁の開閉と血液粒子の挙動を解析すると共に、コンピュータグラフィックスを活用した可視化技法により軸流などを伴う粒子の動きを表現する。
- (4) シミュレーションにより得られた結果を医学データと比較することで、手法の妥当性を検証する。特に、左心室と大動脈における圧力の変化を文献のデータと比較することで手法の妥当性を評価する。

3. 研究の方法

- (1) 大動脈壁や大動脈弁、さらには左心室のような弾性体と血液流体の相互作用を考慮したシミュレーションを行うために、血液だけでなく弾性体も粒子でモデル化して支配方程式を解くことで挙動を解析する。そのためには、連続体の支配方程式であるコーシーの運動方程式に、弾性体と流体の各構成方程式を適用することでコーシー・ナビエの方程式とナビエ・ストークスの方程式を導出し、各方程式を弾性体と流体に適用することで弾性体の変形および流体の流れを解析する。
- (2) X線CT画像を基にして、弾性体と流体の双方の粒子モデルを作成する。モデルには大量の粒子が必要であり、1粒子に格納すべき物理量(位置座標、密度、速度など)を計算しながらモデルを構築する。さらに、粒子法では粒子同士が接近し過ぎると強い反発力が働いて粒子が飛散する可能性があるため、粒子飛散防止用のダミー粒子もモデル構築では考慮しておく必要がある。
- (3) 左心室や大動脈内の血液は複雑な挙動を示すため、血液粒子を球体で表示し、また、血液粒子が持つ物理量の一つである圧力の値を粒子の色で表示することにより、血液粒子の流れと共に、左心室や大動脈内における圧力の変化を可視化する。
- (4) シミュレーション結果として得られる左心室および大動脈内における圧力変化を文献と比較する。手術を行う実患者の圧力変化に関するデータは利用できないため、文献で紹介されている一般的な圧力変化と比較することで手法の妥当性を評価する。

4. 研究成果

(1) 支配方程式の導出

質量の保存を表す連続の式を次式(1)に、また、連続体の支配方程式であるコーシーの運動方程式を次式(2)に示す。

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \dots\dots\dots (1) \quad \rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 ρ は密度、 t は時刻、 \mathbf{v} は速度、 $\boldsymbol{\sigma}$ は応力テンソル、および \mathbf{b} は外力である。また、弾性体の構成方程式を次式(3)および(4)に示す。

$$\boldsymbol{\sigma}^e = \lambda \text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}) \mathbf{I} + 2\mu \boldsymbol{\varepsilon} \dots\dots\dots (3) \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} \{ \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^t \} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $\boldsymbol{\sigma}^e$ は弾性体の応力、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ はひずみテンソル、 \mathbf{I} は単位テンソル、 \mathbf{u} は変位であり、 λ と μ は次式(5)と(6)で表されるラメ定数である。

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \dots\dots\dots (5) \quad \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 ν はポアソン比、 E はヤング率である。式(3)と(4)をコーシーの運動方程式である式(2)に代入することで、弾性体の支配方程式であるコーシー・ナビエの方程式が次式(7)として得られる。

$$\rho \frac{D^2 \mathbf{u}}{Dt^2} = (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{b} \dots\dots\dots (7)$$

一方、流体の構成方程式は次式(8)と(9)で与えられる。

$$\boldsymbol{\sigma}^f = -p \mathbf{I} + 2\eta \mathbf{T} \dots\dots\dots (8) \quad \mathbf{T} = \frac{1}{2} \{ \nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^t \} \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 $\boldsymbol{\sigma}^f$ は流体の応力、 p は圧力、 \mathbf{I} は単位テンソル、 η は粘性係数、 \mathbf{T} はひずみ速度テンソル、および \mathbf{v} は速度である。式(8)と(9)をコーシーの運動方程式である式(2)に代入すると流体の支配方程式であるナビエ・ストークスの方程式が次式(10)として得られる。

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{b} \dots\dots\dots (10)$$

弾性体である大動脈弁や大動脈壁、および左心室は式(7)のコーシー・ナビエの方程式を、また、流体である血液には式(10)のナビエ・ストークスの方程式を用いてシミュレーションを行う。

(2) シミュレーションモデルの作成

図1に、シミュレーションモデルの作成に用いる X 線 CT 画像を示す。元になる X 線 CT のスライス画像(水平画像)は 114 枚あり、114 枚の画像をボリウム表示した後、垂直断面で切断した画像が図1である。なお、画像の色はワークステーションで自動的に着色された疑似カラーである。図1には左心室、大動脈(壁と弁)、およびバルサルバ洞が表示されている。

スライス画像の解像度は 512×512 、画素間距離は 0.25 [mm] である。一方、スライス画像間距離は 1 [mm] であるため、スライス画像の解像度を 128×128 と $1/4$ に縮小することで、水平および垂直方向の画素間距離を合わせ、さらに、計算機のリソースであるメモリ容量を考慮して、最終的には中央部にある解像度 64×64 のスライス画像 45 枚を用いてシミュレーションモデルを作成する。作成されたシミュレーション用粒子モデルを図2に示す。

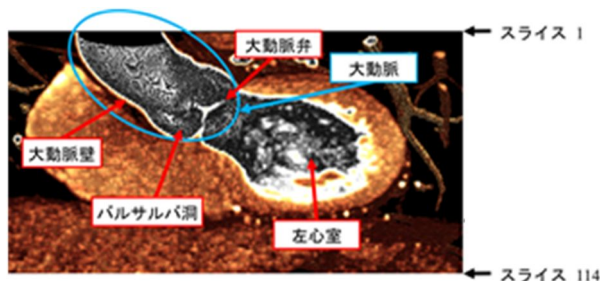


図1 X線 CT 画像 (垂直断面図)

シミュレーションモデルは3次元のモデルであり、図2は切断面の2次元画像を示す。図2(a)の左上にある灰色の粒子が大動脈壁、右下にある茶色の粒子が左心室内部であり、左心室の中央にある穴は僧帽弁口である。また、左心室と大動脈の間にある赤い粒子が大動脈弁であり、左心室の周囲にある紫の粒子は粒子飛散防止用のダミー粒子である。図2(b)は別の角度における切断面図であり、僧帽弁口は左心室の右に位置している。なお、血流の可視化には図2(b)を用いる。最後に、図2(c)は大動脈弁のみを表示した図であり、3つの弁を色分け表示している。ただし、大動脈弁はX線CT画像上には明瞭に表示されていないため、文献を参考に作成している。

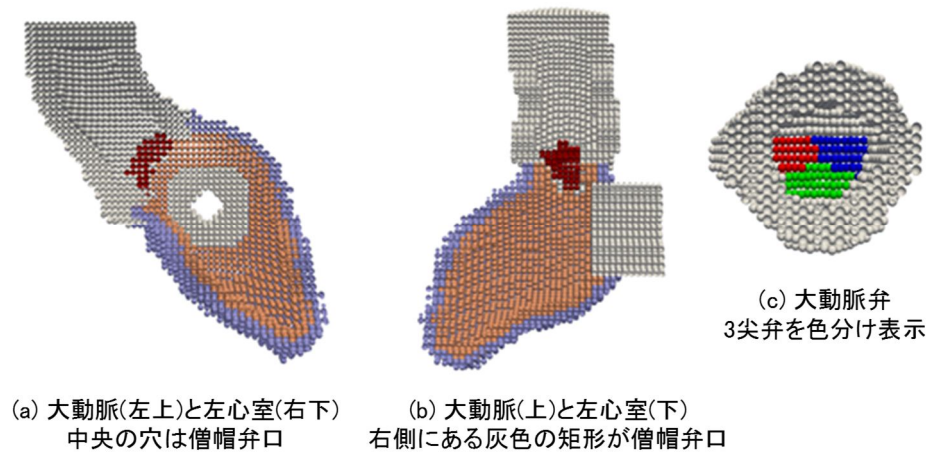


図2 シミュレーション用粒子モデル

(3) 血流の可視化

シミュレーション結果に基づく血流の可視化を図3に示す。なお、血液の色は図3(c)の右横にあるスケールに従った粒子が持つ圧力値を示す。一方、灰色で示す僧帽弁口と大動脈壁は剛体、茶色で示す大動脈弁と左心室は弾性体、紫色で示す左心室の周囲はダミー粒子である。僧帽弁口および大動脈壁は本来弾性体であるが、本研究では剛体として扱う。このため、僧帽弁口と大動脈壁に対して支配方程式はコーシー・ナビエの方程式を用いるが、粒子の移動は行わない。図3(a)は僧帽弁口から左心室に血液が流入している様子を示している。血液の色は青色であるため、粒子の圧力は非常に低い。図3(b)は左心室に血液粒子が充満した後、左心室が収縮している様子を示す。左心室の収縮は左心室壁を構成する粒子の法線ベクトル方向に一定の力で左心室壁を押し出すことで実現している。図3(c)は左心室内の圧力が大動脈内の圧力よりも高くなったため、左心室から大動脈へと血液が流出している様子を示している。

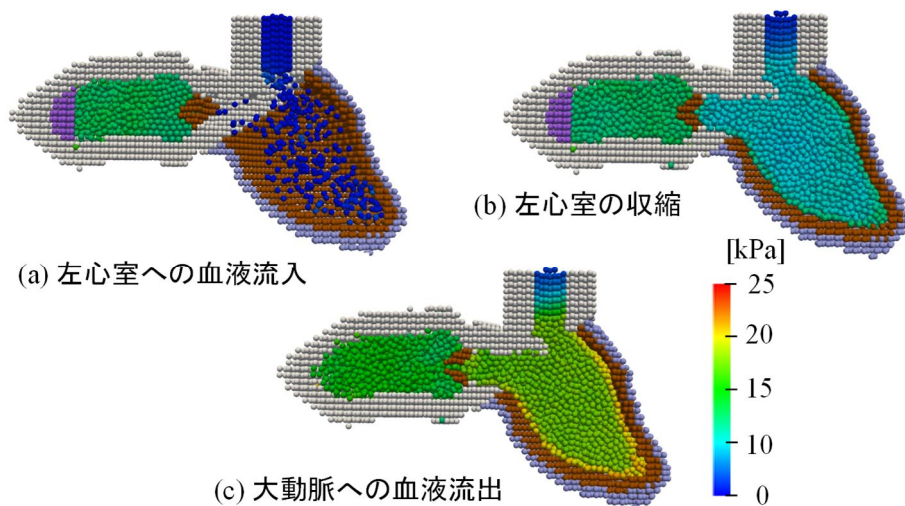
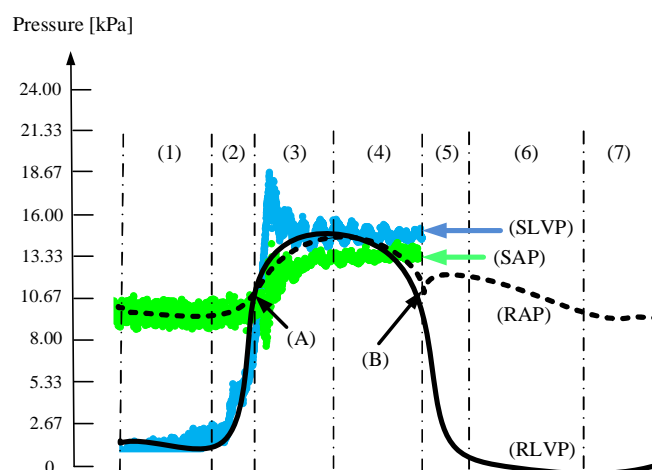


図3 血流の可視化

(4) シミュレーション結果と文献の比較

図3に示す左心室および大動脈内における粒子の圧力変化を図4に示す。黒の点線が文献における大動脈内の圧力変化、黒の実線が文献における左心室内の圧力変化であり、緑の太線がシミュレーションで得られた大動脈内の圧力変化、青の太線がシミュレ

ーションで得られた左心室内の圧力変化である。シミュレーション開始時における左心室内圧力は 0 [kPa] , 大動脈内圧力は約 9 [kPa] であり、シミュレーションの開始時における圧力は文献値に合わせている。シミュレーションが進行し、僧帽弁口から血液が流入すると左心室内の圧力が徐々に上昇する。このときの圧力変化が図 4(1)の心房収縮期であり、血流の様子は図 3(a)に示されている。左心室に血液が充満すると左心室の収縮が始まり、左心室内の圧力が急速に上昇する。このときの圧力変化が図 4(2)に示す等容性収縮期であり、そのときの血液の様子が図 3(b)に示されている。このとき粒子の移動はなく、左心室は徐々に収縮している。左心室の収縮に従って左心室内の圧力が上昇し、大動脈内の圧力よりも高くなると、大動脈弁が開口して血液は急速に左心室から大動脈へと流れる。このときの圧力変化が図 4(A)の大動脈弁開口であり、大動脈弁が開いて血液が左心室から大動脈へと流れる様子が図 3(c)に示されている。



(1) 心房収縮期 (2) 等容性収縮期 (3) 急速駆出期 (4) 減速駆出期

(5) 等容性弛緩期 (6) 急速充満期 (7) 減速充満期

(A) 大動脈弁開口 (B) 大動脈弁閉口

(SLVP) シミュレーションの左心室圧力 (SAP) シミュレーションの大動脈圧力

(RLVP) 文献の左心室圧力 (RAP) 文献の大動脈圧力

図 4 左心室と大動脈内の圧力変化

本研究は心房収縮期から始まり、急速駆出期を経て減速駆出期に至るまでのシミュレーションであり、シミュレーションの結果として得られた左心室および大動脈内における圧力変化は文献とほぼ一致した。しかしながら、大動脈弁の開口時における左心室内の圧力(図 4 の(3)における青の太線)が文献(図 4 の(3)における黒の実線)よりも高い値を示している。今後は、大動脈弁の閉口時以降における左心室内の圧力降下を試みると共に、大動脈弁の閉口を経て、大動脈と左心室内の圧力が低下するシミュレーションを行う必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Nobuhiko Mukai, Kimie Mori, and Yoshiko Takei	4. 巻 Vol.49, Issue 2
2. 論文標題 Tongue model construction based on ultrasound images with image processing and deep learning method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Medical Ultrasonics	6. 最初と最後の頁 153-161
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10396-022-01193-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Youngha Chang, Takuya Iiyama, and Nobuhiko Mukai	4. 巻 4
2. 論文標題 Combination of statistics and deep learning-based illumination estimation methods	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 OSA Continuum	6. 最初と最後の頁 2936-2948
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 向井信彦, 中村建太, 張英夏	4. 巻 75
2. 論文標題 空間整合性を考慮したOutside-in方式拡張現実感の実現	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 映像情報メディア学会誌	6. 最初と最後の頁 297-304
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3169/itej.75.297	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Takuya Natsume, Masamichi Oishi, Marie Oshima, Nobuhiko Mukai	4. 巻 9
2. 論文標題 Droplet Formulation Method for Viscous Fluid Injection Considering the Effect of Liquid-Liquid Two-Phase Flow	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ITE Transactions on Media Technology and Applications (MTA)	6. 最初と最後の頁 33-41
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3169/mta.9.33	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 夏目拓也, 大石正道, 大島まり, 向井信彦	4. 巻 18
2. 論文標題 粒子法による液滴の滴下挙動再現と定量的評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 芸術科学会論文誌	6. 最初と最後の頁 106-113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また, その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nobuhiko Mukai, Yuki Matsuura, Masamichi Oishi, and Marie Oshima	4. 巻 Vol.6, No.1
2. 論文標題 Chromatic Aberration Based Depth Estimation in a Fluid Field	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Image and Graphics	6. 最初と最後の頁 59-63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18178/joig.6.1.59-63	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また, その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Youngha Chang, Akinori Urayama, Miho Watanabe, and Nobuhiko Mukai	4. 巻 Vol.17, No.2
2. 論文標題 Generation of CAPTCHA Using Sprinkled Destructors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of the Society for Art and Science	6. 最初と最後の頁 52-61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また, その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計47件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 20件)

1. 発表者名 Nobuhiko Mukai, Ren Morooka, Takuya Natsume, and Youngha Chang
2. 発表標題 Viscoelastic Fluid Simulation based on the Combination of Viscous and Elastic Stresses
3. 学会等名 SIMULTECH 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuhiko Mukai, Shoya Yagi, and Youngha Chang
2. 発表標題 Japanese Sign Language Recognition based on a Video accompanied by the Finger Images
3. 学会等名 NICOGRAPH International 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 明島豊, 張英夏, 向井信彦
2. 発表標題 両刃包丁研ぎシミュレータの開発
3. 学会等名 映像情報メディア学会研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大友裕介, 張英夏, 向井信彦, 谷高竜馬, 松村寛夫, 白石将
2. 発表標題 カメラ映像を基にした人物の追跡に関する検討
3. 学会等名 映像情報メディア学会冬季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 勝間田凌太郎, 張英夏, 向井信彦
2. 発表標題 多面体展開図から立体形状構築に関する一考察
3. 学会等名 NICOGRAPH 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯山拓也, 張英夏, 向井信彦
2. 発表標題 光源色の影響を考慮した物体領域のカラーネーミング手法
3. 学会等名 NICOGGRAPH 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西野悠馬, 夏目拓也, 張英夏, 向井信彦
2. 発表標題 気化による水煙の変化を考慮した滝の表現手法
3. 学会等名 NICOGGRAPH 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 植松隆史, 張英夏, 向井信彦
2. 発表標題 仮想空間における歩行シミュレーションの曲がり角認識
3. 学会等名 映像情報メディア学会研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村直樹, 張英夏, 向井信彦, 荒木健友
2. 発表標題 深層学習を用いた自転車速度推定手法と精度の検討
3. 学会等名 自動車技術会 秋季大会 学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 向井信彦, 西村直樹, 張英夏, 荒木健友
2. 発表標題 3D CNNのパラメータ検討と自車速度の推定
3. 学会等名 自動車技術会 春季大会 学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 向井信彦, 松友悠太郎, 森紀美江, 武井良子, 山田紘子, 山下夕香里, 長谷川和子
2. 発表標題 舌表面自動推定手法の構音障害症例への適用
3. 学会等名 日本超音波医学会第94回学術集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuya Natsume, Masamichi Oishi, Marie Oshima, Nobuhiko Mukai
2. 発表標題 Wettability Method based on Surface Free Energy between Solid and Liquid
3. 学会等名 IWAIT2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Youngha Chang, Takuya Iiyama, Nobuhiko Mukai
2. 発表標題 Ensemble of Illumination Estimation Methods using Support Vector Regression
3. 学会等名 IWAIT2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Youngha Chang, Kentaro Takeuchi, Nobuhiko Mukai
2. 発表標題 Dominant Color Extraction from a Single Image
3. 学会等名 IWAIT2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuhiko Mukai, Kazuhiro Aoyama, Youngha Chang
2. 発表標題 Pressure Simulation in the Heart with Valve Interlocking and Isovolumetric Contraction
3. 学会等名 SIGGRAPH Asia Posters (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nobuhiko Mukai, Ryoma Yata, Kimie Mori, Yoshiko Takei, Hiroko Yamada, Yukari Yamashita, Kazuko Hasegawa
2. 発表標題 Deep Learning Based Tongue Surface Extraction Method For Tongue Model Construction
3. 学会等名 SMIT(International Conference of the Society for Medical Innovation and Technology) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口健太, 張英夏, 向井信彦
2. 発表標題 花と剣山の接触を考慮したいけばなシミュレータの開発
3. 学会等名 映像情報メディア学会研究会(映情学技報)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 太田一光, 張英夏, 向井信彦
2. 発表標題 セグメンテーションを基にした深度推定に関する一考察
3. 学会等名 映像情報メディア学会創立70周年記念大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯山巧也, 張英夏, 向井信彦
2. 発表標題 複数の推定手法を組み合わせた光源色推定高精度化に関する研究
3. 学会等名 画像電子学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 向井信彦, 矢田龍馬, 森紀美江, 武井良子, 山田紘子, 山下夕香里, 長谷川和子
2. 発表標題 深層学習を用いた舌表面上の特徴点自動推定
3. 学会等名 日本超音波医学会第93回学術集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 向井信彦, 田代喜見彦, 張英夏
2. 発表標題 3D CNNによる日本手話の認識
3. 学会等名 NICOGRAPH
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 明島豊, 向井信彦, 張英夏
2. 発表標題 包丁研ぎシミュレータの開発
3. 学会等名 NICOGGRAPH
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 向井信彦, 堀駿介, 張英夏, 荒木健友
2. 発表標題 深層学習を用いた道路の車線数と自車速度の推定
3. 学会等名 自動車技術会 春季大会 学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nobuhiko Mukai
2. 発表標題 Computer Graphics Applications with Particle Methods
3. 学会等名 International Conference on Image and Graphics Processing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuya Natsume, Masamichi Oishi, Marie Oshima, and Nobuhiko Mukai
2. 発表標題 Particle based Droplet Simulation in Liquid-Liquid Two-phase Flow
3. 学会等名 International Congress on Modelling and Simulation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiko Mukai
2. 発表標題 Particle based Blood Flow Simulation in the Aorta and the Left Ventricle
3. 学会等名 International Drug Discovery Science and Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiko Mukai, Kazuhiro Aoyama, Takuya Natsume, and Youngha Chang
2. 発表標題 Pressure Change Simulation in the Aorta and the Left Ventricle with Compression
3. 学会等名 International Conference of the Society for Medical Innovation and Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiko Mukai, Shu Akasaka, and Youngha Chang
2. 発表標題 Candle Flame Simulation Considering Combustion States
3. 学会等名 International Workshop on Image Electronics and Visual Computing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiko Mukai, Erika Matsui, and Youngha Chang
2. 発表標題 Investigation on Viscoelastic Fluid Behavior by Modifying Deviatoric Stress Tensor
3. 学会等名 International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiko Mukai, Yuka Sunaoshi, and Youngha Chang
2. 発表標題 Study on Spray Cloud Behavior depending on Waterfall Height
3. 学会等名 NICOGGRAPH International (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塚本貴也, 張英夏, 向井信彦
2. 発表標題 力覚提示を伴う魚料理の操作シミュレーション
3. 学会等名 映像情報メディア学会研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口健太, 張英夏, 向井信彦
2. 発表標題 いけばなシミュレータにおける花材の転倒と破断の実現
3. 学会等名 映像情報メディア学会研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村建太, 張英夏, 向井信彦
2. 発表標題 空間整合性を基にしたマーカレス拡張現実感の実現
3. 学会等名 映像情報メディア学会冬季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武井良子, 森紀美江, 山田紘子, 長谷川和子, 向井信彦, 高橋浩二
2. 発表標題 側音化構音の舌運動様式について—3次元舌モデルとエレクトロパトグラフィを用いた分析の試み—
3. 学会等名 日本言語聴覚学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 夏目拓也, 大石正道, 向井信彦, 大島まり
2. 発表標題 界面張力モデルによる脳動脈瘤用塞栓材液滴形成の比較
3. 学会等名 日本バイオレオロジー学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuya Natsume, Masamichi Oishi, Nobuhiko Mukai, and Marie Oshima
2. 発表標題 Droplet Simulation for Cerebral Aneurysm Embolization
3. 学会等名 IWAIT (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiko Mukai
2. 発表標題 VR based Simulator for Japanese Flower Arrangement
3. 学会等名 ICIGP (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiko Mukai, Kazuhiro Aoyama, Takuya Natsume, and Youngha Chang
2. 発表標題 Simulation Model on Blood Flow from the Left Ventricle to the Aorta
3. 学会等名 SMIT (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuhiko Mukai, Taishi Nishikawa, and Youngha Chang
2. 発表標題 Evaluation of Stretched Thread Lengths in Spinnability Simulations
3. 学会等名 SIGGRAPH (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuhiko Mukai, Yuto Hizono, and Youngha Chang
2. 発表標題 Particle based Waterfall Simulation with Spray Cloud Emerging from Basin
3. 学会等名 SIMULTECH (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuhiko Mukai, Yulong Zhang, and Youngha Chang
2. 発表標題 Pet Face Detection
3. 学会等名 NICOGGRAPH International (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山名承太郎, 向井智彦, 向井信彦
2. 発表標題 フェイシャルアニメーションのための例示データからの制御点配置推定法の検討
3. 学会等名 映像情報メディア学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石毛勇哉, 張英夏, 向井信彦
2. 発表標題 小規模ブロック作品のためのボクセルモデル低解像度化手法
3. 学会等名 映像情報メディア学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 夏目拓也, 大石正道, 向井信彦, 大島まり
2. 発表標題 脳動脈瘤塞栓術を対象とした安定的な液滴注入シミュレーション
3. 学会等名 NICOGRAPH
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青山和広, 夏目拓也, 張英夏, 向井信彦
2. 発表標題 粒子法を用いた左心室と大動脈における圧力変化シミュレーション
3. 学会等名 映像情報メディア学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 夏目拓也, 大石正道, 向井信彦, 大島まり
2. 発表標題 脳動脈瘤塞栓術を目的とした液滴形成シミュレーション
3. 学会等名 映像情報メディア学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 向井信彦, 石津剛志, 森紀美江, 武井良子, 山田紘子, 長谷川和子
2. 発表標題 構音障害患者用舌運動観察ツールの開発
3. 学会等名 日本超音波医学会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 向井信彦, 田村慶信, 細野泰彦	4. 発行年 2020年
2. 出版社 オーム社	5. 総ページ数 256
3. 書名 コンピュータ概論	

1. 著者名 Nobuhiko Mukai, Kazuhiro Aoyama, Takuya Natsume, and Youngha Chang	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 12
3. 書名 Advances in Intelligent Systems and Computing	

1. 著者名 Nobuhiko Mukai	4. 発行年 2019年
2. 出版社 IntechOpen	5. 総ページ数 20
3. 書名 Computer Graphics and Imaging	

〔産業財産権〕

〔その他〕

発表文献一覧 https://www.vgl.cs.tcu.ac.jp/mukai/bibliography.html

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------