

—総説—

## 最先端の三次元イメージングシステム -心臓血管外科における Virtual Reality 技術の有用性-

神谷 賢一<sup>1),3)</sup>, 松林 優児<sup>1)</sup>, 永谷 幸裕<sup>2)</sup>, 寺田 真也<sup>1)</sup>, 角 宏明<sup>1)</sup>, 松岡 健太郎<sup>1)</sup>,  
島田 ゆうじ<sup>1)</sup>, 脇坂 穂高<sup>1)</sup>, 鉢呂 康平<sup>1)</sup>, 榎本 匡秀<sup>1)</sup>, 高島 範之<sup>1)</sup>, 藤井 太平<sup>3)</sup>,  
仲田 晋<sup>4)</sup>, 鈴木 友彰<sup>1)</sup>

1) 滋賀医科大学 外科学講座 (心臓血管・呼吸器外科)

2) 滋賀医科大学 放射線医学講座

3) 立命館大学 総合科学技術研究機構

4) 立命館大学 情報理工学部

**抄録:** 滋賀医科大学心臓血管外科では医療用画像を三次元構築し、臓器を立体表示する Virtual Reality (VR) 技術を用いて心臓血管系の 3D 解析研究を進めている。VR では臓器の内腔を可視化することができ、また 3D 構築した画像に直接介入し、従来の 2D 解析では評価困難であった複雑な構造も術者の視点で直観的に計測できるという利点がある。あらゆる医療画像データを三次元化し、かつ直感的な立体計測が可能な VR 技術は、これまでの診断精度を上回る形態学的な情報を臨床医に提示し得ると考えられる。特に外科医にとって有用な手術支援 VR 画像は、難易度が高い手術の治療成績を向上させる可能性が高い。

**キーワード:** バーチャルリアリティ, 三次元画像, 心臓血管解剖, バーチャル解剖, 術前シミュレーション

### はじめに

滋賀医科大学心臓血管外科では立命館大学との医工連携により共同開発を進めている画像解析ソフトウェア Vesalius 3D (PS Tech, Amsterdam, Netherland) [本邦未承認] を用いて、心臓血管系の三次元画像解析研究を行っている。今回、最先端のイメージングシステムを紹介する。

### 1. VR 技術

バーチャルリアリティ(VR)とは、コンピュータグラフィックスを応用し、現実に近い環境や情報をユーザーに提示する理工学技術であり、「人工現実感」あるいは「仮想現実」とも訳される<sup>1)</sup>。近年、VR 技術は医療分野でも応用されつつあり、CT や MRI などの画像データからさまざまな臓器を立体的な三次元(3D)画像として表示し、さらに内部を可視化(See through)することで、より高度な解析が可能となり、診断や治療に役立つと期待されている。その一方で、1980 年代以降にアミューズメント分野で発展した、ウェアラブルデバイス(ヘッドマウントディスプレイ)を用いた体

感型 VR は、コンピューターが高次元の情報をユーザーに付加・提示することで、より現実世界に近い知覚が得られる<sup>2)</sup>。最近では拡張現実(Augmented reality: AR)または複合現実(Mixed reality: MR)といった現実世界と仮想空間を融合する技術も開発され、外科系の領域では手術の模擬体験やシミュレーションに用いられている<sup>3,4)</sup>。なお、本稿で紹介する Vesalius 3D は三次元表示に特化したイメージングシステムであり、これら AR や MR とは異なる概念であることを、予め述べおく。

### 2. VR イメージングシステム

Vesalius 3D は、心エコー、CT、MRI など、あらゆる医療画像データから三次元解析が可能である。一部、異なるベンダー間によっては画像に使用制限(データが読み込めない)があるが、基本的に DICOM 形式であれば、いかなる画像データも再構成できる。本システムは大きく立体表示(3D visualization)と立体計測(3D interaction)の二つの機能からなり、特に後者は、表示された画像に直感的に介入できるため、医療画像解析

では革新的な技術といえる。図 1 にワークステーション型の VR システム(C-station, PS Tech, Amsterdam, Netherland)を提示する。この機種には、下記の三つの機能が搭載されている。

1. 画像を 3D 表示するソフトウェア(Vesalius 3D)
2. 画像を立体視するディスプレイ (3D display)
3. 画像を立体計測するプログラム (PST)

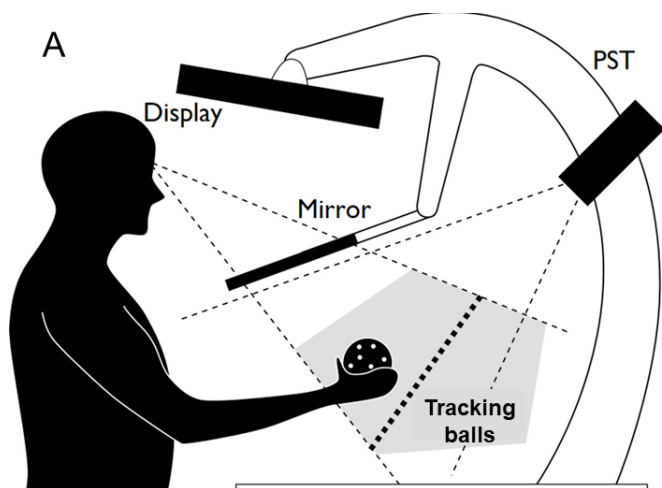


図 1A. ワークステーション型 VR 装置 (C-Station)。VR 技術の詳しい原理に関しては、PS Tech 社の HP にも紹介されている。(https://www.vesalius-3d.com)



図 1B. 実際の操作: ユーザーは鏡面に投影された 3D ディスプレイの画像を見ながら、空間情報を認識するトラックボールで VR 画像を直接操作・計測する。

手元のトラックボールを動かすと、画像もそれに合わせて連動し、画像をあらゆる方面から、さらに任意の多断面で切って内腔を観察できる。また表示された 3D 画像に直接、点や線を置くことで、距離や角度を直接計測できる<sup>5</sup>。ユーザーは 3D グラスを装着すると、ディスプレイに表示された 3D 画像が立体的に浮かび上がって見え、臓器の奥行きを認識できる(図 2A, 2B)。

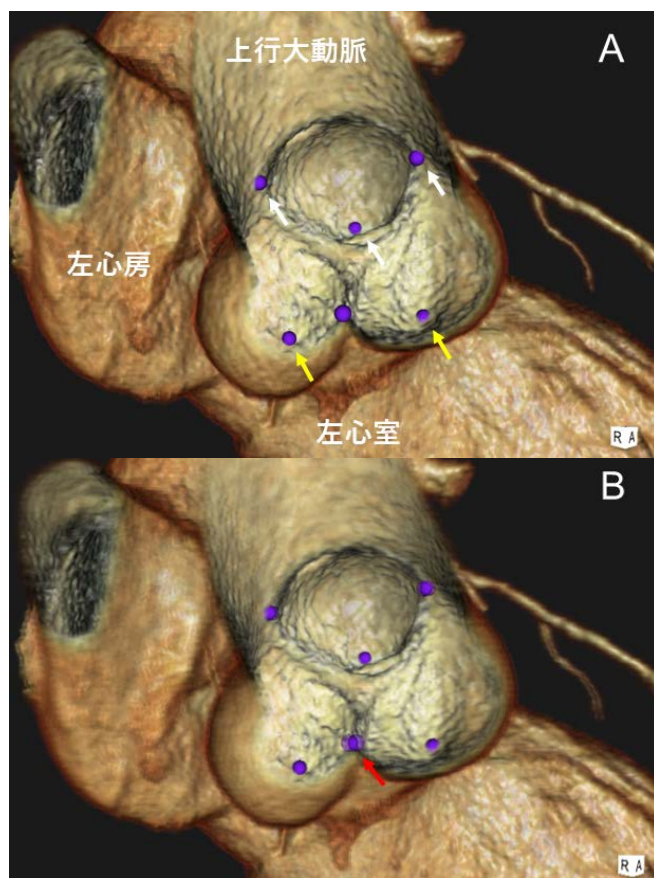


図 2A. 3D-VR 画像: 青い 6 点は、大動脈基部の各交連と弁輪部に置かれている(矢印)。

図 2B. 立体映像(side by side 形式): ユーザーに近い側の点(赤矢印)は、二重に(離れて)表示される。

これまで世界各国の競合企業から多くの類似製品が開発・販売されてきたが、どれも高額(500~1000 万円)で、操作も複雑なため、多忙な臨床医の間ではあまり普及していない。これに対し我々が新たに開発した Vesalius 3D は、通常の PC 画面上でマウスでの操作が可能のため、ソフトウェアをインストールするだけでよく、価格も大幅に抑えられる。また立体表示の機能自体は、一般的な PC 画面では不可能だが、実臨床ではあまり意味がない。画像解析に関しては、臓器の内腔構造を多角的かつ自由に観察でき、3D 画像を瞬時に、簡単に立体計測できる機能が、臨床医には最も重要と考えられる。

### 3. 従来の画像ワークステーションの現状

近年、CT 撮影装置の多列化・高精細化・管球回転速度の高速化等の技術革新に伴い、汎用のワークステーションの画像解析アルゴリズムも高性能化している。本学でも 320 列 CT 撮影装置によりデータ収集ならびに再構成された高分解能の volume data に対応可能な解析システム Ziostation2 (Ziosoft Inc, Tokyo, Japan)が導入され、冠動脈狭窄度評価や TAVI の術前計測などに使用されている。このシステムは 0.5mm の thin slice データを Volume rendering 画像に再構成することで、



臓器の形状が確認できる。Volume rendering 画像は、病巣の広がりや周囲構造との関係を客観的に容易に把握可能な点で臨床的に有用であるが、あくまで3次元の奥行きを有する volume data を2次元平面に表示した画像である。即ち volume rendering 画像は、空間内のある視点から対象物に仮想的な光をあてた場合の光の透明度や色情報 (RGB) を、対象物を構成するボクセルに与え、2次元平面に投影した画像である。そのため、定量的な計測に必要な十分な3次元の情報を有しているわけではなく、評価対象となる臓器・病巣・構造の形態が複雑になるほど解析が不正確となる。Volume rendering 画像では、一見して3次元計測が可能に見えるが、実際は意図する部位をトレースできず、正確とは言えない(図3)。加えて、表示されていない皮膚、筋肉、肺、骨などの volume データが実際は存在し、画像表示のしきい値を調整することで、これらの組織が現れ、対象物の定量評価がより不正確になる可能性がある。以上の理由により、Ziostation2 をはじめ、多くの CT 解析ソフトウェアでは、Volume rendering 画像に基づいた計測は、推奨されていない<sup>9</sup>。

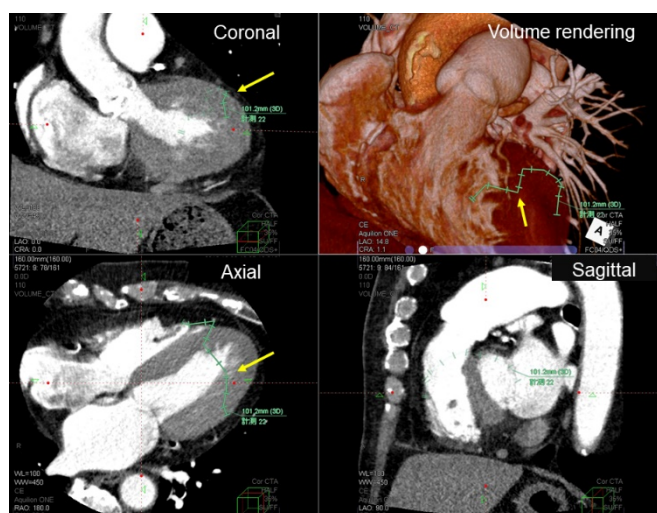


図3. Ziostation2による画像解析: ポリウムレンダリング画像上で直接計測すると、2Dのスライス画像では意図した部位(左心室の表面)をトレースできない。

現在のCT定量解析は、axial, coronal, sagittalの三方向スライスを用いる multi-planar reconstruction (MPR画像)、および curved planar reconstruction (CPR画像)という2D計測法が一般的である<sup>6,7</sup>。この方法は計測したいポイントを適切な3断面あるいは適切な任意断面で特定する必要があり、計測部位が複数に及ぶ場合は、解析にある程度の時間を要する。また同一平面上にない複雑な形状は、解析に習熟したベテランの放射線科医でも計測が困難であり、計測が不正確になる可能性があるとされている。CT撮影装置により得られたデータには、三次元の情報・要素があるにも関わらず、ソフトウェアやディスプレイの機能制限により、十分に描出できないのが現状である。

#### 4. VR画像解析の実際

具体的なVR解析を、胎児MRI画像を用いて紹介する。通常は2Dの断層像(図4A)をもとに診断や治療方針を決める。臨床医は各断面像をスクロールし、胎児臓器の立体的な構造を脳内で想像し、詳細な解剖イメージを得る。これに対してVR画像では、胎児の表情を含め臓器の解剖構造も奥行きを持つ立体映像として瞬時に表示でき(図4B)、同時に多断面で内腔を直感的・感覚的な操作で観察できる。また画像のモード(表示する画像のしきい値)を調整すると、内部臓器を可視化できる(図4C)。2D画像では可視化できない臓器の特徴を、生体を解剖せずとも非侵襲的に描出できるため、Virtual dissection と呼ばれる<sup>8-10</sup>。この任意の断面で内腔を観察する機能を、我々は Traversing view(物体を横切る)と呼ぶが、See-through image(透過像)と表現する報告もある<sup>9</sup>。この表示方法は、前述の volume rendering でも利用可能であるが、決定的な差として、VR画像には空間位置情報があるため脊髄の立体的な曲線を直接マーキングし、2D-MPR法よりも迅速かつ直観的に計測できる(図4D)。

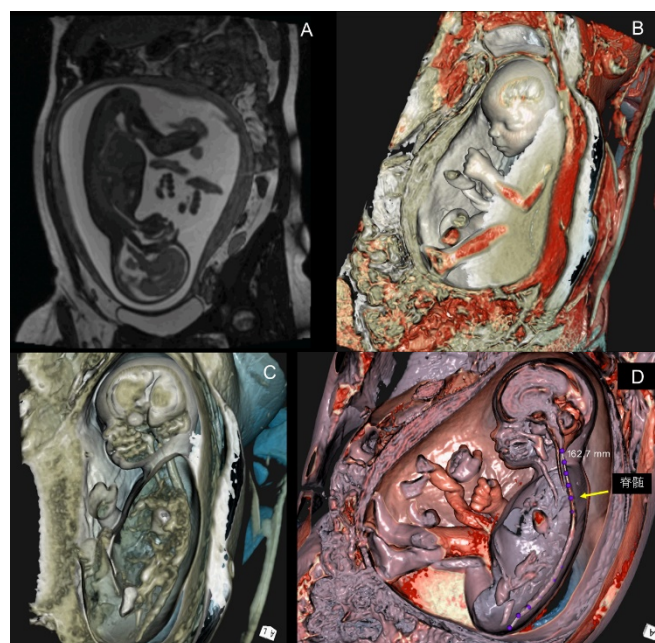


図4A. 胎児のMRI画像(断層像)

図4B. 3D-VR画像: 胎児の表情が明瞭にみえる。

図4C. Virtual dissection: 内部の臓器が可視化できる。

図4D. 3D計測: 脊髄の立体曲線を直接計測できる。

#### 5. VR技術の臨床応用

心臓血管系の術前評価には、一般的に造影CTが用いられ、VR画像は左心系の解析に適している<sup>11</sup>。特に心臓CTは心電図同期下でデータ収集されるため、心拍数・管球回転速度・再構成心位相・画像再構成アルゴリズム等、様々な要素が画質に影響を及ぼし、十分な時間分解能と最適心位相が得られた場合には、呼吸や心拍動に伴うモーションアーチファクトが抑えられ、冠動脈や大動脈弁の高空間分解能の画像が得られる。



これを VR 構築することで、極めて鮮明な 3D イメージが描出できる。心臓弁膜症の手術は基本的に心停止下で行い、心腔内は無血野となり、完全に虚脱する。また大動脈壁や弁尖組織は弾力に富み、術者の力加減で計測値は大幅に変わる。これに対し心臓 CT は心腔内に血液が充満し加圧された、言わば生理的条件下で撮影されている。そのため 1 心周期分に相当する心臓 CT データより、収縮期・拡張期の異なる至適時相で VR 構築された 3D 画像を用いると、自己弁温存手術(弁形成術)に必要な解剖構造を正確に計測できる<sup>12</sup>。

## 6. 胸部大動脈 CT

胸部大動脈瘤手術は、患者の解剖構造によって術式の難易度が大きく異なる。限られた心停止時間/循環停止時間の中で、いかに良好な視野が得るかが手術の成否を決定する。特に弓部や下行大動脈瘤の手術では、大動脈の末梢吻合部や頸部三分枝(特に左鎖骨下動脈)の形態が、術前のプランニングには重要である<sup>13,14</sup>。

以下に複雑な解剖の胸部大動脈瘤症例を提示する<sup>15</sup>。大動脈縮窄症に対するパッチ拡大手術後、約 30 年の経過中に下行大動脈囊状瘤を指摘された希少な症例であったが、拡大傾向のため再手術が必要であった。

術式の検討において、胸部大動脈 CT の 2D-MPR による診断だけでは解剖学的な情報が十分に得られず、VR 画像を用いて術前評価を行った(図 5)。その結果、胸郭の断面・内腔を観察する Traversing view により、左肋間開胸を再現した視野が得られた。また大動脈内腔を露出し、より背側の断面を描出すると、末梢吻合部を剥離した映像が得られた。これらの情報をもとに残存した大動脈の狭窄部位、瘤と鎖骨下動脈との位置関係、具体的な手術アプローチなどが明らかになった。

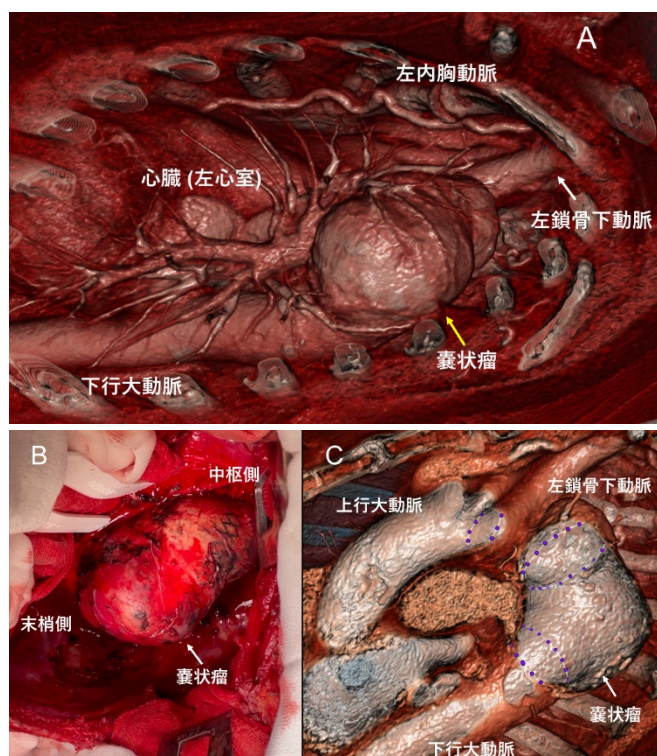


図 5A. CT 画像を 3D 構築し左第 4 肋間開胸をイメージした VR 画像。左胸腔内部に突出した囊状瘤や周囲の血管との位置関係が確認できる。

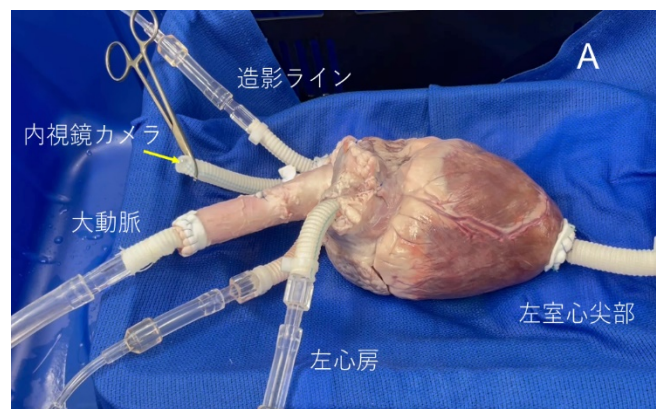
図 5B. 術中所見：第 4 肋間開胸により露出した動脈瘤。VR 画像通りパッチ拡大した大動脈が囊状に瘤化しているのが確認できる。

図 5C. 大動脈の内腔を可視化した VR 画像。外科医が血管内腔の状態を直接確認しながら 3D 計測できる。

VR では、さらに体表から中枢・末梢吻合部までの立体的距離を測ることで、術者が術中に体感するであろう術野の「深さ」を予測でき、手術シミュレーションに有用である。経験の浅い若手外科医にとって、事前と同じ患者データで何度もイメージトレーニングできるため、手術教育と術前検討に有用と思われる。

## 7. VR 技術のピットフォール

従来の画像診断に比べて飛躍的な診断や治療精度の向上が期待される VR 技術だが、いまだ課題もある。どれほど精密に再構成可能なソフトウェアを用いたとしても、元の画像データの「質」を上回る 3D 画像は作り出すことはできない(母性原理)<sup>16</sup>。従って、撮影した画像データの解像度が著しく劣る場合には、VR 解析も信頼できない事実を十分に認識した上で、臨床医は使用すべきである<sup>16</sup>。その反面、最近の CT や MRI 画像の空間/時間分解能の進化は目覚ましく、元画像データに規定される VR 画像のクオリティも更に鮮明化することが期待される。さらには VR が表示する画像や計測精度に関しても、未だエビデンスに乏しく、確立された技術とは言えない。滋賀医科大学心臓血管外科では、動物の生体組織(ブタの摘出心臓)を用いて、実際の内視鏡画像と心臓 CT データから構築した大動脈弁の 3D-VR 画像を直接比較し(図 6A, B)、VR 画像の精度を検証した<sup>17</sup>。



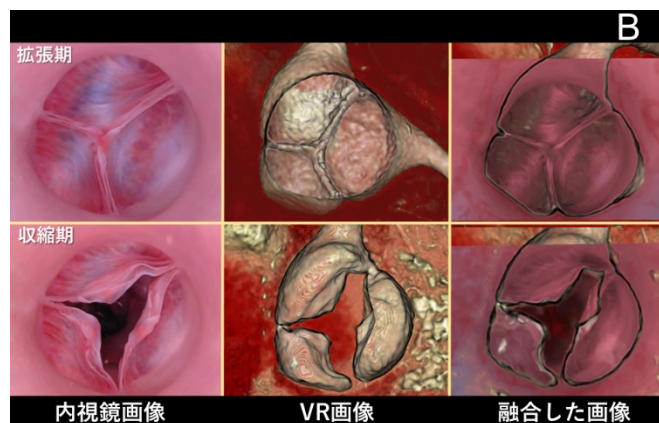


図 6A. ブタ摘出心を用いた生体シミュレーター。心臓内部の弁を内視鏡によってリアルタイムに表示できる  
図 6B. 大動脈弁の収縮期・拡張期における VR 画像と内視鏡映像との直接比較。異なるモダリティ画像を VR 上で融合できる。

また計測の正確性や信頼性検証 (Measurement validation) に関しては、心臓や血管のファントムモデルを用いて、2D-MPR と三次元計測の精度比較を現在進めている<sup>18, 19</sup>。これまでの予備実験の結果では、実測値と VR 計測の誤差が 1mm 以内であり、VR を用いた 3D 計測は妥当であると推定される。今後、更に研究を進める予定である。

## 7. 今後の展望

今後、本システムを新たな画像診断用ソフトウェアとして導入すべく、研究開発を進めている。また画像技術の急速な発展に伴い、3D を超えた 4D を表示する VR システムや、現在は人間がマニュアルで計測している作業を自動化するための AI や画像認識といった最新の工学技術を VR に融合する新たな開発を立命館大学、PS Tech 社との国際プロジェクトチームで進めている。更なる技術の進歩によって、膨大なデータ量がさらに短時間で解析できれば、拍動している心臓弁や大動脈の挙動を明らかにする 4 次元動態解析が可能となり、心臓弁膜症や血管疾患に関する新たな知見が得られる可能性が高いと期待されている。

### 開示すべき利益相反(COI)

本研究では、共同研究契約に基づき PS Tech 社より Vesalius 3D ソフトウェア、およびサンプル画像データ (図 4 にて使用) の無償提供を受けた。

### 謝辞

本研究をご支援・ご指導頂いた牛尾哲敏氏、吉田均氏、淵上久史氏、Arjen Brinkman 氏、Istvan Prive 氏、Piers Vigers 先生に心より感謝申し上げます。

## 文献

- [1] 舘暉. バーチャルリアリティとは何か. バーチャルリアリティ学, 佐藤誠ほか (編), 日本バーチャルリアリティ学会, 2-22, 2010.
- [2] Carmigniani J, Furht B, Anisetti M, Ceravolo P, Damiani E, Ivkovic M Augmented reality technologies, systems and applications. *Multimed Tools Appl*, 2011 51:341-377.
- [3] Halabi O, Balakrishnan S, Dakua S, Navab N, Warfa, Mohammed. *Virtual and Augmented Reality in Surgery. The Disruptive Fourth Industrial Revolution*. W. Doorsamy ed), Springer Nature, Switzerland, 257-285, 2020.
- [4] Khor WS, Baker B, Amin K, Chan A, Patel K, Wong J. Augmented and virtual reality in surgery-the digital surgical environment: applications, limitations and legal pitfalls. *Ann Transl Med*, 4(23): 454. 2016.
- [5] Pisowodzka IK, Gründeman PF, Meijboom F, van Aarnhem G, Meijer R, Cramer MJ, Teske AJ, van der Spoel T, Wind A, Dieleman S, Suyker W, Chamuleau SAJ. Added value of interactive 3-D stereo vision echocardiography in the heart valve team: A post hoc analysis for optimal decision making in patients with mitral valve regurgitation. *Innovations*, (Phila). 15(1):36-42. 2020.
- [6] Kallianos KG, Burris NS. Imaging Thoracic Aortic Aneurysm. *Radiol Clin North Am*, 58(4):721-731. 2020.
- [7] Törnqvist P, Dias NV, Resch T. Optimizing imaging for aortic repair. *J Cardiovasc Surg (Torino)*, 56:189-195. 2015.
- [8] Maresky HS, Oikonomou A, Ali I, Ditkofsky N, Pakkal M, Ballyk B. Virtual reality and cardiac anatomy: Exploring immersive three-dimensional cardiac imaging, a pilot study in undergraduate medical anatomy education. *Clin Anat*, 32(2):238-243. 2019.
- [9] Tretter JT, Gupta SK, Izawa Y, Nishii T, Mori S. Virtual Dissection: Emerging as the Gold Standard of Analyzing Living Heart Anatomy. *J Cardiovasc Dev Dis*, 7(3):30. 2020.
- [10] Anderson RH. Re-Setting the Gold Standard. *J Cardiovasc Electrophysiol*, 26(7):713-714. 2015.
- [11] Heuts S, Maessen JG, Sardari Nia P. Preoperative planning of left-sided valve surgery with 3D computed tomography reconstruction models: sternotomy or a minimally invasive approach?. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*, 22(5):587-593. 2016.
- [12] Kamiya K, Nagatani Y, Matsubayashi Y, et al. A Virtual-Reality Imaging Analysis of the Dynamic Aortic Root Anatomy. *Ann Thorac Surg*, 112(6):2077-2083. 2021.
- [13] Hage A, Ginty O, Power A, et al. Management of the difficult left subclavian artery during aortic arch repair. *Ann Cardiothorac Surg*, 7(3):414-421. 2018.
- [14] Shelstad RC, Reeves JG, Yamanaka K, Reece TB. Total Aortic Arch Replacement: Advantages of Varied Techniques. *Semin Cardiothorac Vasc Anesth*, 20(4):307-313. 2016.
- [15] Matsubayashi Y, Kamiya K, Suzuki T, Enomoto M, Minamidate M, Takashima N. Virtual Imaging for a Complex Case of Previous Coarctation Repair. *Ann Thorac Surg Short Rep*, [published online ahead of print, 2022 Oct 3]
- [16] Mathur M, Patil P, Bove A. The Role of 3D Printing in Structural Heart Disease: All That Glitters Is Not Gold. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2015;8(8):987-988.

- [17] Anderson RH, Bolender D, Mori S, Tretter JT. Virtual Reality Perhaps, but Is this Real Cardiac Anatomy?. Clin Anat, 32(4):468. 2019.
- [18] Kamiya K, Nagatani Y, Terada S, et al. Validation of Virtual Imaging of a Dynamic, Functioning Aortic Valve Using an Ex Vivo Porcine Heart. Ann Thorac Surg, 114(1):334-339. 2022.
- [19] Kamiya K, Matsubayashi Y, Terada S, Matsubayashi Y, Miwa S, Takashima N, Fujii T, Nakata S, Chen YW, Suzuki T. Ex-vivo aortic root and coronary artery cast measurement to validate the accuracy of virtual imaging. J Card Surg, 37(8):2461-2465. 2022.

## A virtual-reality imaging system potentially useful for cardiovascular surgeons.

Kenichi KAMIYA<sup>1),3)</sup>, Yuji MATSUBAYASHI<sup>1)</sup>, Yukihiro NAGATANI<sup>2)</sup>, Shinya TERADA<sup>1)</sup>,  
Komei KADO<sup>1)</sup>, Kentaro MATSUOKA<sup>1)</sup>, Yuji SHIMADA<sup>1)</sup>, Hodaka WAKISAKA<sup>1)</sup>,  
Kohei HACHIRO<sup>1)</sup>, Masahide ENOMOTO<sup>1)</sup>, Noriyuki TAKASHIMA<sup>1)</sup>,  
Taihei FUJII<sup>3)</sup>, Susumu NAKATA<sup>4)</sup>, and Tomoaki SUZUKI<sup>1)</sup>

- 1) Department of Cardiovascular Surgery, Shiga University of Medical Science
- 2) Department of Radiology, Shiga University of Medical Science
- 3) Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University
- 4) College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

**Abstract:** Adequate preoperative planning may facilitate successful procedures in cardiovascular surgery. We have newly developed a system the Vesalius 3D suite, combining three-dimensional (3D) image-processing software with an optic-tracking spatial navigation, allowing quick, accessible 3D image interpretation for virtual reality (VR) exploration and measurement of complex anatomy. In this review, we present a novel method of virtual imaging analysis for preoperative planning and simulation in cardiovascular operation using this 3D-VR system. Based on unimodal or multimodal medical imaging data, DICOM data sets can be reconstructed for 3D visualization. Virtually reconstructed images can be viewed on stereoscopic 3D display, revealing each patient's specific anatomy and the internal structures in exquisite detail. Highly accessible 3D interpretation promptly permits precise and intuitive measurements of repair-relevant anatomical parameters including geometrically complex shapes. This technology may promote understanding of form and function in the cardiovascular system, and facilitate operative procedures in more challenging cases. Furthermore, this system can be especially valuable for any surgeon to gain experience in practicing for rarely-performed procedures or uncommon patient-specific preoperative surgical simulations.

**Keywords:** virtual reality, three-dimensional imaging, cardiovascular anatomy, virtual dissection, preoperative simulation