

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：84404

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25282138

研究課題名(和文)先天性心疾患の診療支援をめざしたリアルタイム心拍動・マルチタッチ変形シミュレータ

研究課題名(英文) Technological development of heart simulators to perform heart beats in real time and multi-touch deformation available for medical care of congenital heart diseases

研究代表者

中沢 一雄 (Nakazawa, Kazuo)

国立研究開発法人国立循環器病研究センター・研究所・室長

研究者番号：50198058

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：先天性心疾患の診療を支援する実用性の高いシミュレータのための技術開発を行った。先天性心疾患の3次元心臓形状モデルは造影CT画像より生成した。タブレットPCにおいて弾性体シミュレーションを実行させて、インタラクティブに先天性心疾患の心臓モデルを引っ張ったり切れ目を加えたりして内部構造を確認できるシミュレータを作成した。さらに、リアルタイムに心拍動を実現するシミュレータの医療応用を進めた。我々のシミュレーション技術は、医師にとって、複雑な先天性心疾患の心臓を理解するのみならず、患者および患者家族とコミュニケーションをとるにも有効であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：We developed technologies for practical simulators available for medical care of congenital heart diseases. Actually, three dimensional heart models of congenital heart diseases were constructed from multi-slice contrast enhanced CT images. In a tablet PC for general consumers, we developed a simulator to conduct elastic simulation. So, users can observe the internal structure of the heart models by interactive handling such as deforming and cutting. Moreover, the medical application of the simulator which performs heart beats in real time was advanced. It was suggested that our simulation technologies are useful for medical doctors not only to understand complicated hearts of congenital heart disease but also to communicate with their patients and patient's families.

研究分野：生体医工学

キーワード：生体シミュレーション 先天性心疾患 コンピュータグラフィックス

1. 研究開始当初の背景

我々の研究グループでは、生命をシステムと見なし、細胞や組織・臓器といったように機能単位に構成的にモデル化し、生命現象を理解しようとする“フィジオーム”の考えに基づいて研究を進めてきた。特に、致死性不整脈の研究において、スーパーコンピュータ上に仮想の心臓モデル(バーチャル心臓)を構成し、電気生理学的シミュレーションを行うことで、メカニズムの解明や、予防・診断・治療に役立てるための一連の研究を行ってきた

一方、国立循環器病研究センターの小児科グループでは、先天性心疾患の心臓における3次元CTデータを基に、切開縫合が可能な軟性レプリカを作製するプロジェクトが進められている。CTやMRIなど3次元画像診断装置の発達により、周辺の大血管を含め心臓の3次元画像を任意の角度から立体的に把握できるようになった。しかし、画面上の心臓と実際の心臓との間にはまだまだ大きな乖離がある。実際に切開縫合ができる心臓精密レプリカを作製することで、先天性心疾患の複雑な解剖学的異常をより正確に理解できる。さらに、術前シミュレーションとして手術手技の向上や、新しい手術手技の開発に役立つものと思われる。

しかしながら、軟性レプリカは、一度、切開すると再利用ができない欠点がある。他方、バーチャル心臓だと、何度でも繰り返し利用可能である。そこで、これまで蓄積した心臓フィジオーム研究に基づくバーチャル心臓のモデル作成や興奮伝播シミュレーションなどの成果を、先天性心疾患の診療支援に応用できると考えた。レプリカでは切開しないと心臓の内部構造が確認できないが、バーチャル心臓では効果的な可視化を行うことで解決可能である。さらに、先天性心疾患の心臓形態だけでなく、血行動態や心拍動、不整脈の興奮伝播などにおいて応用が可能である。

2. 研究の目的

心臓に関するフィジオーム研究の成果を活かして、先天性心疾患の診療を支援する実用性の高いシミュレータの開発をめざす。先天性心疾患の心臓は、正常心臓と大きく形態や血行動態が異なり、また個体差も大きい。そこで、このシミュレータでは、1)患者さんへのわかりやすい病態の説明ツールとして、複雑な先天性心疾患の心臓形態や血流動態の3次元的把握を助ける。2)小児外科医のための手術実施にむけた簡易な手術シミュレーションが実行できる。3)手術適用後も含め、正常と異なった心臓形状あるいは刺激伝導系をもった心臓に対して特有な拍動や不整脈現象が説明できる。基本的に、以上の3つの機能を実現する技術開発を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、我々の研究グループの成果であるバーチャル心臓におけるモデル作成や電気生理学的興奮伝播、形状変形のシミュレーション技術を統合し、先天性心疾患の診療を支援する実用性の高いシステムの開発をめざす。ソフトウェア工学的な研究開発が主体であり、適切な心臓モデル作成の部分に重要なノウハウがある。基本的には、以下の4つのサブテーマ(システム)に分けて開発を進める。

- (1)先天性心疾患の複雑な形態や血行動態の説明
- (2)切開や変形などの簡易手術シミュレーションの実施
- (3)先天性心疾患に特有な不整脈の興奮伝播現象の説明および心拍動の再現
- (4)医療(病院)情報システムとの連携など

4. 研究成果

- (1)病院情報システムと連携する2次元シェーマによる先天性心疾患の形態や血行動態の説明システム

基本となる先天性心疾患の2次元シェーマの形状データベースを構築して、形態や血行動態の説明ができるシステムを開発し、病院情報システムと連携して稼働させた。従来のスタンドアロンシステムに対し、病院情報システムの電子カルテ上からも起動できるように、患者IDおよび医療従事者IDを連携するような仕組みを追加した。また、描かれたシェーマはシステム独自のデータベースに保存されるとともに、固定情報とするため文書管理システムへJPEG画像として電子カルテに保存される。さらに、病名等を記載するテキスト入力機能や印刷機能、これまでに作成したシェーマの検索機能を追加した。医師が本システムで作成したシェーマを患者への説明補助に使用しやすいように、病名や血流を表す矢印などを容易に編集できるインタフェースも作成した。さらに、形態的異常や病名などのキーワードを持たせ、素早くシェーマを見つけ出す機能や、心臓を部位別に分け、それぞれに対して典型的なパーツを用意して、それらを組み合わせるシェーマを作成する機能を持つ。このため複数の診断名を選択することにより自動的に複雑心奇形のシェーマを作成することができる。また、正常シェーマ上で各部位にカーソルを合わせることにより提示される異常パーツの選択肢を選ぶことでもシェーマの作成が可能である。

PDA	CoA	override Ao	PS sub_hypo PA,PS
RVH con	ASD,ASD SV	ASD,PFO	ASD,prim
ASD_sec	VSD,ECD_complete	VSD,ECD_incomplete	VSD,ECD_intermediate
VSD_inlet	VSD_large	VSD_medium	VSD_multi_muscular
VSD_override Ao,VSD	VSD_posterior_malali...	VSD_small	PA
PA,hypo PA	PS sev,hypo PA	PS valv	bicusp PV
AS sev	AS sub	AS valv	bicusp AV
RVH con	RVH ecc	LVH con	LVH con.sev
CoA	IAA,(A)	IAA,(A),hypo Arch	IAA,(B)
IAA,(B),hypo Arch	IAA,(C)	IAA,(C),hypo Arch	PDA
rt low PV to SVC,PAP...	hypo PA	hypo Arch	TGA
PS sub_hypo PA	SVAS	PAPVC,rt low PV to ...	PAPVC,rt up PV to S...
PPS	TGA,hypo PA		

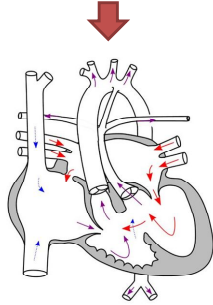


図1 2次元シェーマシステムによる
大血管転移 III 型の模式図
複数の診断名を選択することにより自動的
に複雑心奇形のシェーマを作成する

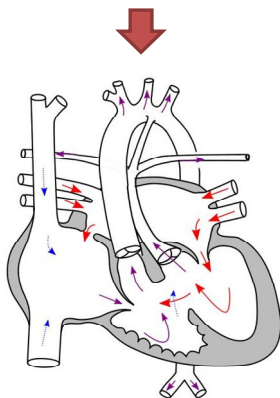
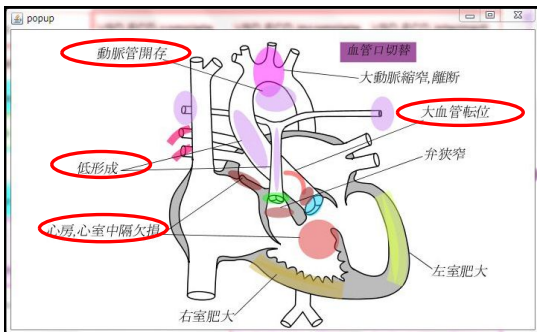


図2 2次元シェーマシステムによる
大血管転移 III 型の模式図
各部位にカーソルを合わせるにより提示
される選択肢を選ぶことでも作成可能
なインタフェース

(2) iPad を用いた 3 次元心臓モデルの形状変 形可能なマルチタッチシステム

手軽な心臓の 3 次元的な構造の理解を可能とする診療支援ツールを実現するため、タブレット型コンピュータ上でのマルチタッチインタラクションに着目し、iPad 上で動作するアプリケーションとして開発した。コンピュータグラフィクス技術を用いて心臓の 3 次元オブジェクトの描画を行うだけでなく、常に弾性体シミュレーションが実行される。ユーザは心臓オブジェクトの一部を引っ張って変形させるなどの操作を行いながら、その心臓の 3 次元的構造を効果的に理解できることが期待される。以下のような要件を満たすシステムの開発を行った。

システムは常に弾性体シミュレーションを実行し、ユーザはマルチタッチ機能を通して、心臓オブジェクトを指で引っ張って変形させることができる。

常に画面中央に空間中に浮いているような状態で心臓の 3 次元オブジェクトが表示され、また指先一つで任意の方向に視点回転できる。

心臓の半透明表示・光沢や輪郭線などの描画方法の切り替えを行うことができる。

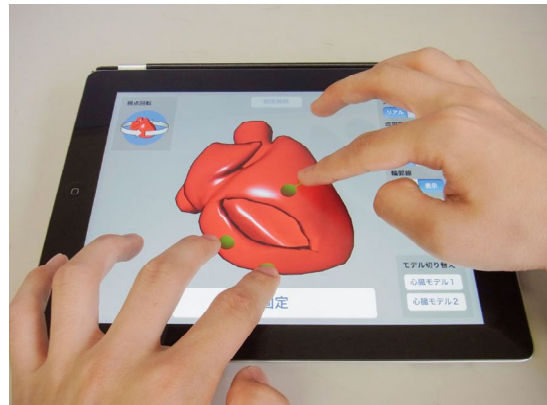


図3 iPad によるマルチタッチシステム

(3) 心臓拍動リアルタイムシミュレーション技術の応用

心臓シミュレーションに関する既存手法の多くは、現象解明を目的としたオフラインの計算を必要とするものであった。ここでの目標は、医師と患者間コミュニケーションに利用可能な実時間（リアルタイム）で動く、見た目に正しいシミュレーション手法の実現である。ロバストで計算効率が良いシミュレーション手法を実現するため、形状制約に基づく弾性体計算手法である Shape Matching 法を応用した。この手法は、物体が変形したとき、歪みによる弾性力を計算するのではなく、局所領域が元形状に戻るよう形状制約で物体を変形させるものである。心臓は四面体メッシュモデルで表現され、メッシュの各頂点に小さな体積を持つ局所領域を定義する。シミュレーション時には、まず心筋線維走向と収縮タイミングに従って全ての局所領域を収縮変形し、次に変形した局所領域の形状をなるべく満たすように心臓モデル全体を Shape Matching 法により変形する。心筋の異方性のある硬さを表現できるよう筋線維走行を考慮した重み付けを行い、さらに局所収縮の様子を手軽に変更できる心筋線維走行・収縮タイミングの編集インタフェースを作成した。ちなみに、収縮タイミングは従来のバーチャル心臓における興奮伝播シミュレーションから算出した。応用として、本シミュレータを使った突発性房室ブロックの映像が、NHKの「ためしてガッテン」で紹介された（平成 27 年 2 月 4 日放送）。

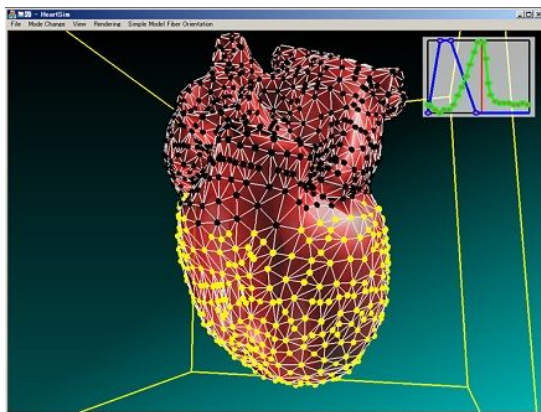


図 4 心臓拍動リアルタイムシミュレータ

(4) 医用画像から先天性心疾患心臓の形状作成と診療支援システムとしてのインタラクティブな心臓モデルの形状変形の実現

形状に抽出に関しては、実際の先天性心疾患の造影 CT 画像より画像領域分割し、6 症例に対する先天性疾患心臓の 3 次元形状モデルを生成した。心室や心房内腔は造影剤の効果により明瞭な境界を持っており、単純な閾値法や領域拡張法で容易に分割できた。一方、心臓外側部の心筋領域は隣接する他領域との境界が曖昧で自動分割が困難であるため、輪郭線制約を用いた領域分割法を適用した。得られた分割結果を統合し、精度の高い先天性心疾患心臓 3 次元モデルを得た。そこで、先天性心疾患の診療支援システムとして、これまでより複雑な心臓モデルを扱うため、計算コストを考慮し従来の iPad から Surface に機種およびシステム変更、さらにアルゴリズムの改善を行った。結果として、心臓モデルは従来に比べ、シミュレーションのための頂点数を約 6 倍、可視化のためのメッシュ数を約 60 倍に拡張できた。また、描画する心臓オブジェクトの動きが柔らかすぎるところも、実際の軟性心臓レプリカの物性に近づくことができた。提案フレームワークを用いて、インタラクティブに先天性心疾患の心臓モデルを引っ張ったり切れ目を加えたりして内部構造を確認できるシステムの開発を行った。

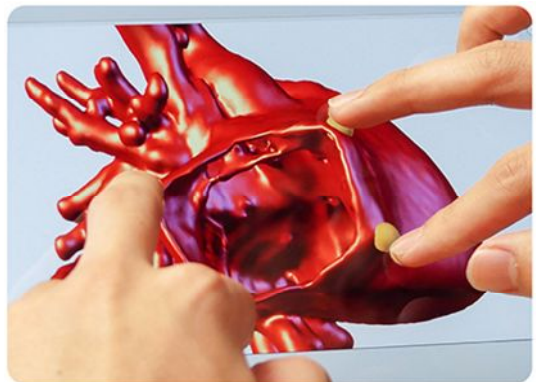


図 5 Surface によるインタラクティブ心臓形状変形システム

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

(1)Kazutaka Nakashima, Yuki Koyama, Takeo Igarashi, Takashi Ijiri, Shin Inada, Kazuo Nakazawa, Interactive Deformation of Structurally Complex Heart Models Constructed from Medical Images, EUROGRAPHICS2016, Short Papers, 査読有, <http://www-ui.is.s.u-tokyo.ac.jp/~taka/interactive-deformation-of-hearts/interactive-deformation-of-hearts.pdf>

(2)井尻敬, 芦原貴司, 梅谷信行, 小山裕己, 五十嵐健夫, 原口亮, 横田秀夫, 中沢一雄, Shape Matching 法による心臓拍動のビジュアルシミュレーション, 生体医工学, 査読無, 53(3), 2015, 130-137, DOI: <http://doi.org/10.11239/jsmbe.53.130>

(3)黒寄健一, 岩田倫明, 原口亮, 中沢一雄, 先天性心疾患診療支援のための2Dシェーマおよび3DCGモデル作成システム, 循環器専門医, 査読無, 23(1), 2015, 62-68, http://ci.nii.ac.jp/els/110009930876.pdf?id=ART0010474598&type=pdf&lang=jp&host=cinii&order_no=&ppv_type=0&lang_sw=&no=1466403846&cp=

(4)小山裕己, 五十嵐健夫, 井尻敬, 稲田慎, 黒寄健一, 白石公, 中沢一雄, 三次元心臓モデルのリアルタイム形状変形を実現するマルチタッチインタラクティブシステムの技術開発, 医療情報学, 査読有, 34(5), 2014, 221-232, <http://koyama.xyz/project/HeartTouch/heart.pdf>

〔学会発表〕(計22件)

(1)Kenichi Kurosaki, Isao Shiraishi, Michiaki Iwata, Ryo Haraguchi, Kazuo Nakazawa, Automatic two-dimensional illustration system and three-dimensional modeling system based on echocardiographic images for understanding of complex congenital heart disease, The 8th World Congress on Pediatric Intensive and Critical Care, 2016.6.4~8, Toronto(Canada)

(2)中沢一雄, 小山裕己, 中島一崇, 井尻敬, 稲田慎, 黒寄健一, 白石公, 五十嵐健夫, 先天性心疾患の心臓レプリカの機能を補完しコンシューマレベルのコンピュータで実用可能なマルチタッチブラウザ, 第63回日本心臓病学会学術集会, 2015.9.18~18, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

(3)中沢一雄, 井尻敬, 小山裕己, 中島一崇, 五十嵐健夫, 稲田慎, 原口亮, 奈良崎大士, 岩田倫明, 芦原貴司, 神崎歩, 黒寄健一, 坂口平馬, 市川肇, 白石公, 先天性疾患心臓の形状抽出と心臓レプリカを想定したマルチタッチブラウザ開発, 第51回日本小児循環器学会総会・学術集会, 2015.7.16~18, ホテル日航東京(東京都・港区)

(4)白石公, 黒寄健一, 神崎歩, 中沢一雄, 小山裕己, 五十嵐健夫, 畑中克宣, 竹田正俊, 帆足孝也, 鍵崎康治, 市川肇, 手で触れることのできるシミュレーターの開発: 複雑先天性心疾患の3次元診断, 外科手術シミュレーション, 医学教育の向上をめざした精密心臓レプリカとその応用, 第50回日本小児循環器学会総会・学術集会, 2014.7.3~5, 岡山コンベンションセンター(岡山県・岡山市)

(5)黒寄健一, 坂口平馬, 白石公, 岩田倫明, 原口亮, 中沢一雄, 吉松淳, 遠隔医療における多職種コミュニケーションツールとしての新しいシェーマシステムの試み, 第50回日本小児循環器学会総会・学術集会, 2014.7.3~5, 岡山コンベンションセンター(岡山県・岡山市)

(6)中沢一雄, 稲田慎, 谷昇子, 原口亮, 奈良崎大士, 桑田成規, 岩田倫明, 五十嵐健夫, 小山裕己, 井尻敬, 芦原貴司, 神崎歩, 鍵崎康治, 市川肇, 黒寄健一, 坂口平馬, 白石公, 医学・医療分野におけるコンピュータシミュレーション技術の可能性: 先天性心疾患分野の診療支援に向けたシステム開発, 第50回日本小児循環器学会総会・学術集会, 2014.7.3~5, 岡山コンベンションセンター(岡山県・岡山市)

(7)Kazuo Nakazawa, Shin Inada, Ryo Haraguchi, Takashi Ashihara, Isao Shiraishi, Kenichi Kurosaki, Suzu Kanzaki, Takeo Igarashi, Takashi Ijiri, Yuki Koyama, Takanori Ikeda, Technological Development of Heart Simulators for Various Computer Platforms in the Medical and Health-care Fields, The 78th Annual Scientific Meeting of the Japanese Circulation Society, 2014.3.21~23, 東京国際フォーラム・東京商工会議所(東京都・千代田区)

(8)Keinchi Kurosaki, Heima Sakaguchi, Isao Shiraishi, Michiaki Iwata, Ryo Haraguchi, Kazuo Nakazawa, A New Application of Automatic Illustration System for Better Understanding of Complex Congenital Heart Diseases, The 78th Annual Scientific Meeting of the Japanese Circulation Society, 2014.3.21~23, 東京国際フォーラム・東京商工会議所(東京都・千代田区)

(9)岩田倫明, 原口亮, 谷昇子, 黒寄健一, 稲田慎, 白石公, 桑田成規, 中沢一雄, 先天性心疾患を対象としたベクトルシェーマシステムの病院情報システムへの導入, 第33回医療情報学連合大会(第14回日本医療情報学会学術大会), 2013.11.21~23, 神戸ファッションマート(兵庫県・神戸市)

(10)岩田倫明, 原口亮, 黒寄健一, 白石公, 桑田成規, 中沢一雄, 先天性心疾患を対象とした異種情報を結合可能とするベクトルシェーマシステムの開発, 電子情報通信学会 ME とバイオサイバネティクス研究会,

2014.3.17, 玉川大学(東京都・町田市)
(11)中沢一雄, 小山裕己, 五十嵐健夫, 井尻敬, 稲田慎, 谷昇子, 岩田倫明, 奈良崎大士, 原口亮, 桑田成規, 神崎歩, 黒寄健二, 白石公, タブレットPCによるマルチタッチインタラクションを活用した先天性心疾患のための診療支援システム, 第33回医療情報学連合大会(第14回日本医療情報学会学術大会), 2013.11.21~23, 神戸ファッションマート(兵庫県・神戸市)

[その他]

ホームページ

<http://www-ui.is.s.u-tokyo.ac.jp/~taka/interactive-deformation-of-hearts/>
<http://koyama.xyz/project/HeartTouch/index-j.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

中沢 一雄 (NAKAZAWA Kazuo)
国立循環器病研究センター・研究所・室長
研究者番号: 50198058

(2)研究分担者

原口 亮 (HARAGUCHI Ryo)
国立循環器病研究センター・情報統括部・室長
研究者番号: 00393215

稲田 慎 (INADA Shin)

国立循環器病研究センター・研究所・特任研究員
研究者番号: 50349792

白石 公 (SHIRAIISHI Isao)

国立循環器病研究センター・病院・部長
研究者番号: 80295659

桑田 成規 (KUWATA Shigeki)

国立循環器病研究センター・情報統括部・部長
研究者番号: 40379631

五十嵐 健夫 (IGARASHI Takeo)

東京大学・情報理工学系研究科・教授
研究者番号: 80345123

井尻 敬 (IJIRI Takashi)

立命館大学・情報理工学部・講師
研究者番号: 30550347

(3)連携研究者

黒崎 健一 (KUROSAKI Kenichi)
国立循環器病研究センター・病院・医長
研究者番号: 40561460

神崎 歩 (KANZAKI Suzu)

国立循環器病研究センター・病院・医師
研究者番号: 70382611

坂口 平馬 (SAKAGUCHI Heima)

国立循環器病研究センター・病院・医師
研究者番号: 70574630

市川 肇 (ICHIKAWA Hajime)

国立循環器病研究センター・病院・部長
研究者番号: 60303939

岩田 倫明 (IWATA Michiaki)

国立循環器病研究センター・知的資産部・特任研究員
研究者番号: 30631296

佐々木 博史 (SASAKI Hiroshi)

神戸大学・情報基盤センター・助教
研究者番号: 40379467