

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ションシステムの技術開発*

小山 裕己 五十嵐 健夫 井尻 敬
稲田 慎 黒崎 健一 白石 公 中沢 一雄

概要

心臓血管に関する医療において、心臓の三次元的な構造を理解することは心疾患患者の治療において極めて重要である。しかしながら、特にいくつかの心疾患においては、実際の心臓の構造は複雑であり、適切にそれを把握するのはしばしば困難である。そこで、われわれは心臓の構造を効果的に理解するための新しいマルチタッチインタラクション技術を開発し、さらに、教育・説明用途を想定したプロトタイプシステムの実装を行った。本システムでは心臓の三次元モデルは弾性体オブジェクトとしてシミュレートされている。ユーザはタブレット型コンピュータを用いて、心臓モデルの一部分をマルチタッチインタラクションによって引っ張って変形させるなどの操作を行い、心臓の内外の構造を観察することができる。医師を対象に本システムの初期評価を行い、実用化に向けての意見や要望をまとめた。

1 緒論

心臓は三次元的に複雑な構造を持った臓器である。心臓の構造を正確に理解し、医療従事者間で治療に関する情報を共有するためには、心臓を三次元的に観察できる環境の実現が必要である。例えば、先天性心疾患は、生まれつき心臓および心臓周辺の構造に異常がある疾患である。この疾患には非常に多くの種類があり、個体差も大きく、その治療には複雑な形態的構造と血行動態を併せて考える必要がある。先天性心疾患のような心臓の構造に多様な異常を持つ疾患の場合、患者個別の心臓において三次元的な構造を正確に理解することは特に重要である。

近年、画像処理技術の目覚ましい進歩により、三次元エコー、MSCT、MRI等を用いた三次元画像診断が飛躍的に発展・普及している。しかし、これらのデバイスで得られた三次元画像の直交断面表示やボリュームレンダリングでは、心臓の形状をただ閲覧するだけであり、入り組んだ心臓の三次元構造を理解するのは難しい場合がある。

このような背景のもと、われわれの研究グループにおいては先天性心疾患の診療支援を行うために様々な取り組みを行ってきた。その一つとして、通常の手術器具を用いて切開

縫合ができ、手術シミュレーションが可能な先天性心疾患の三次元軟性心臓レプリカの作製がある [11][12]。これは心臓形状をただ閲覧するのではなく、実際に手に取って変形させながら閲覧することによって、より効果的な心臓の構造理解を実現することを目指したものである。実物に近い硬度と感触を備え、細かい部分まで患者個別に心臓レプリカを再現できるメリットは大きい。費用や作製時間において課題がある。さらに、心臓レプリカは基本的に再利用することができない。このような心臓レプリカの短所を補完できるような、インタラクティブな心臓の閲覧を可能とする診療支援ツールの開発が求められている。

そのような診療支援ツールの一つの実現方法として、心臓を弾性体オブジェクトとしてシミュレーションし、タブレット型コンピュータのマルチタッチ機能を通してインタラクションを行うバーチャルリアリティの応用が考えられる。心臓レプリカを手にとって変形させるような操作ということではなく、弾性体シミュレーションを実行して三次元オブジェクトの一部を引っ張るようなインタラクションは古くから研究が行われている [6][10][2]。しかしながら、これらの先行研究では、弾性体オブジェクトが三次元空間中に固定されていたり、床に置かれていたりといった、特定の物理的状況を想定している。これに対し、心臓レプリカの機能をできるだけ再現して心臓の三次元的構造を理解しやすい閲覧を実現させるには、周囲の臓器によって固定されていない、空間中に浮いているような状態にある心臓オブジェクトとの自然なインタラクションを実現させる必要がある。一方、一般の物理シミュレーションとマルチタッチインタラクションに関連した研究としては、Wilson らの研究 [15][14] が挙げられる。しかし、これらの研究では指の位置だけでなく、形状もセンシングできる高価なデバイスを用いているなど、汎用性に問題があると思われる。広く医師や医学生などが使用できるように、特別なデバイスを用意しなくても、コンシューマレベルのタブレット型コンピュータで動作するようにシステムを開発する必要がある。

2 開発目的

心臓レプリカの短所を補完し、手軽に心臓の三次元的な構造の理解を補助できるような診療支援システムを実現することがわれわれの大きな目標である。そこで本研究では、汎用的なタブレット型コンピュータによるマルチタッチインタラクションを活用した診療支援システムの構築を目指し、実用化に向けて必要となる技術や機能についての検討を行うため

* 本稿は以下の論文の写しである：小山 裕己, 五十嵐 健夫, 井尻 敬, 稲田 慎, 黒崎 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ションシステムの技術開発. 医療情報学, vol.34, no.5, pp.221-232. 2014. 日本医療情報学会編集委員会より許可を得て公開している。

のプロトタイプシステムを開発する。

具体的には以下のような要件を満たすシステムの開発を行う：

1. 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。
2. 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三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を回転できる。
3. 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。

3 システム実装方法

われわれは、タブレット型コンピュータである iPad 上で動作する iOS アプリケーションとしてシステムの実装を行った。以下に各機能の実装に用いた技術の詳細について記述する。

3.1 弾性体シミュレーション

まず、心臓オブジェクトを弾性体として表現するための手法について説明する。弾性体シミュレーション手法としては、バネ質点モデルや、有限要素法によるものなどが提案されている [8]。しかし、計算コストや数値安定性などの問題によって、本研究が目的とするようなインタラクティブな用途に用いることが困難なものが多い。インタラクティブな用途に適した弾性体シミュレーション手法としては、Muller ら [6] によって提案された Shape Matching 法が近年注目されている。Shape Matching 法は幾何制約に基づいた擬似的な法則によって弾性体シミュレーションを行う手法である。その特徴としては、実時間で計算可能で、数値的に安定でロバストに動作するなどが挙げられる。

Shape Matching 法では、弾性体オブジェクトは質点の集合として表されている。Shape Matching 法の基本的なアイデアは、これらのすべての質点に対して一つのある幾何制約を適用するというものである。これに対し、局所領域ベースの Shape Matching 法 [6][10][2][3][1] という拡張も存在する。局所領域ベースの Shape Matching 法では、弾性体オブジェクトを表す質点の集合に対し、互いに要素がオーバーラップした複数の局所領域を定義し、それぞれの局所領域に対して個別に幾何制約を適用するというものである。図 1 に基本となる Shape Matching 法と局所領域ベースの Shape Matching 法の違いを模式的に示した図を示す。局所領域ベースの Shape Matching 法を使用することで、変形の自由度が大きくなるという利点が得られるため、本システムでは、局所領域ベースの Shape Matching 法を用いた。

局所領域ベースの Shape Matching 法における局所領域の定義方法としては、格子状の空間分割を利用する方法 [10] や四面体メッシュの n -ring neighborhood を利用する方法 [2][3][1] などが提案されている。本システムでは、複雑な構造を持った心臓モデルを適切に表現可能である後者の方法を採用した。図 2 にその模式図を示す。

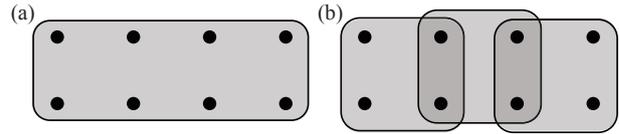


図 1 (a) 基本となる Shape Matching 法ではすべての質点に対して 1 つの幾何制約が適用される。(b) 局所領域ベースの Shape Matching 法では互いにオーバーラップした複数の局所領域が定義され、それぞれの領域に対して個別に幾何制約が適用される。

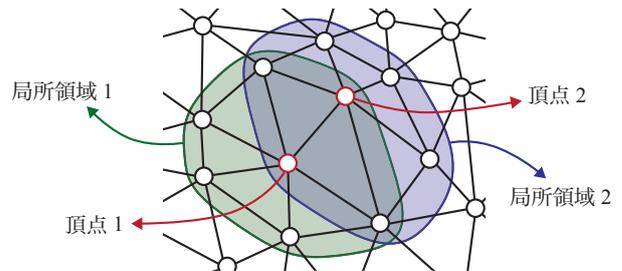


図 2 四面体メッシュにおける Shape Matching 法のための局所領域の定義の例。ここでは 1-ring neighborhood の場合を示しており、また実際には四面体メッシュは三次元的構造を持つが、紙面の都合上二次元的な表現を用いている。各々の頂点に対して、その 1-ring neighborhood にあたる頂点の集合を考え、それらを 1 つの局所領域と考える。

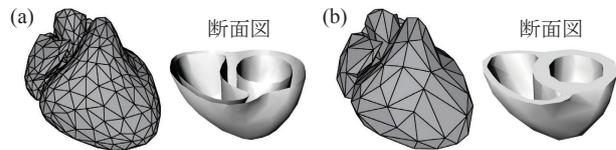


図 3 本システムで実際に用いた心臓の三次元モデルの例。(a) レンダリングに用いるための比較的細かい三角形メッシュ。(b) シミュレーションに用いるための比較的粗い四面体メッシュ。それぞれ右側に、各メッシュを適当な平面で切りスムーズシェーディングによって描画した断面図を示した。三角形メッシュは物体表面に関する情報のみを保持しているのに対し、四面体メッシュは中身の詰まったポリリユーメトリックなデータ構造である点に注意されたい。

なお、四面体メッシュを用いた弾性体シミュレーションでは、シミュレーション用の四面体メッシュに対して描画用の三角形メッシュを埋め込んでおく [3] ことが多い。この“埋め込み”と呼ばれる操作は、比較的粗い四面体メッシュに対して比較的細かい三角形メッシュを埋め込むことで、見た目の質を保ったまま計算効率を向上させるために行われる。本システムでも四面体メッシュに対して三角形メッシュを埋め込み、弾性体シミュレーションと描画のプロセスを分離した。図 3 に心臓の三次元モデルにおける、それぞれのメッシュと断面図を示す。

3.2 心臓モデルの位置と向き計算

画面中央付近に常に心臓オブジェクトを表示しておくためには、心臓オブジェクトが三次元空間に浮いているような効果を実現する必要がある。このような効果を実現するには、

単に無重力空間に心臓オブジェクトを配置するだけでは、指で引っ張る力によって運動量や角運動量が発生する。この場合、慣性に従ってそのまま画面外に移動したり、意図しない向きに回転したりするという問題が発生する。これを解決する一つのアプローチとしては、移動した心臓オブジェクトの重心位置を計算し、重心位置が常に画面中央になるように視点自体を移動させるという方法が考えられる。しかし、心臓オブジェクトが回転してしまう問題には対応できないだけでなく、引っ張っていない部分が引っ張った方向と逆の方向に移動してしまうという新たな問題が発生する。

そこで、すべてのシミュレーション用の頂点に対して、頂点と頂点の初期位置を結ぶ自然長がゼロであるような仮想的なバネを考えるアルゴリズムを実装した。それぞれのバネの力は弾性体シミュレーションに対応する力に比して十分小さくした。これによって、弾性体オブジェクトを引っ張っても、引っ張る力を取り除くと自然に元の位置に戻り、かつ元の向きに戻るような効果を実現した。

しかし、これだけでは引っ張った状態から力を取り除いた場合、バネの力によって振動が起きる。このような振動は心臓オブジェクトを閲覧する上での違和感となるため、適切に減衰させる必要があるが、一般的なバネの運動に用いられる、速度の大きさに比例した抵抗力を与える減衰の方法は望ましくない。なぜなら、バネの運動を減衰させるための抵抗力が、弾性体シミュレーションによる局所的な運動まで減衰させてしまうからである。

そこでわれわれは、弾性体オブジェクトの大局的な運動量と角運動量を計算し、すべてのシミュレーション用の頂点に対して、それらを僅かに小さくするという減衰アルゴリズムを開発した。結果、弾性体シミュレーションによる局所的な運動を減衰させることなく、バネによって生じた大局的な運動量や角運動量を減衰させることができた。

3.3 指で引っ張る力の計算

指で心臓オブジェクトを引っ張る力の計算方法として、以下に示すようなアルゴリズムを採用した。その模式図を図4に示す。まず初めに、指がタッチし始めた画面上の点を元に、力を作用させるシミュレーション用の四面体メッシュの頂点 p を探す。頂点 p の探し方については後述する。また頂点 p の画面からの距離、すなわち頂点 p の投影座標系における投影面からの距離を l とする。次に指の位置が移動し始めたら、指がタッチしている位置の投影座標系における鉛直下に、画面上からの距離が l であるような点 p' を考え、点 p と点 p' を結ぶ自然長がゼロのバネを生成する。指の位置が移動するにつれて点 p' の位置を更新する。最後に、指が画面から離れたら、生成したバネを消失させる。ここで投影座標系とは、三次元空間の基準となる座標系であるワールド座標系を視野変換によりカメラを原点とするカメラ座標系に変換し、さらに投影変換により変換して得られる、描画範囲となる四角錐状の空間(視野)を直方体状の空間に変換(正規化)した座標系のことである [16]。

さて、指がタッチし始めた画面上の点を元に、シミュレーション用の四面体メッシュの頂点 p を決定するには以下のよ

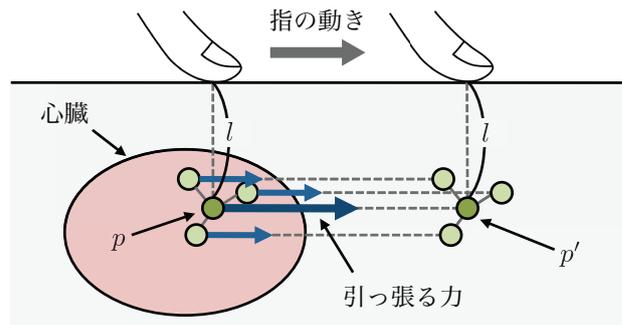


図4 指の動きを力に変換するアルゴリズムの模式図。対象となる頂点だけでなく、その n -ring neighborhood にも引っ張る力を適用する。

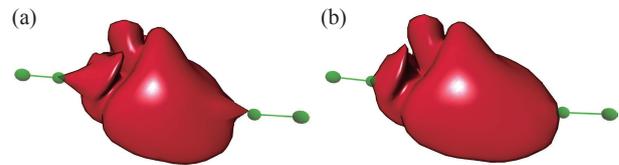


図5 指の動きを力に変換するアルゴリズムの適用例。(a) $n = 0$ の場合、(b) $n = 1$ の場合。

うな方法をとる。すなわち、まず投影座標系において、タッチの投影面上の位置から鉛直下に伸びる半直線を引き、この半直線と描画用の三角形メッシュとの交点のうち、最も投影面に近い点を探す。さらに、この点からワールド座標系において最も近い四面体メッシュの頂点を探して、頂点 p を決定する。ところで、このように力の作用点となる頂点 p を単一に決めることはできるが、これだけでは頂点 p だけにバネの力が集中し、引っ張った効果が局所的に大きくなる(図5(a))ため、見た目が不自然になるという問題が発生する。これを緩和するために、さらに頂点 p の n -ring neighborhood の各頂点にもバネを考えた。その際、バネのもう片方の端点の座標は、 p' の座標に対して p からその頂点へのオフセットを足したものとし、それらのバネ定数は頂点 p に対するバネ定数よりも、 p から遠ざかるにつれて小さくなるように設定した。また、この方法では n が大きいほど引っ張る効果は大局的になる(図5(b))。なお、このような考え方は三次元CGのオーサリングソフトウェアにおけるメッシュ形状の編集機能などでも用いられている。

3.4 描画方法

描画システムは OpenGL ES 2.0 を用いた。シェーディングについては、フォトリアリスティックな描画を行う Half Lambert [5] と呼ばれる手法、さらにセルアニメ調の平面的な描画を行うトゥーンシェーディングの二種類を実装した。トゥーンシェーディングは Half Lambert による描画結果を適当な閾値によって二色に分けることで実現した。また心臓の半透明表示機能を実装した。これは OpenGL ES で提供されているアルファブレンディング機能を活用することで実現した。心臓の光沢の表現には Phong の反射モデルを実装し、輪郭線の描画には Raskar の手法 [9] を用いた。

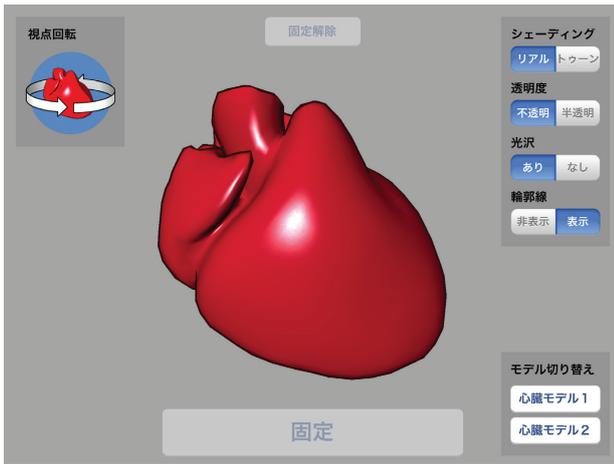


図6 本システムの画面キャプチャ。

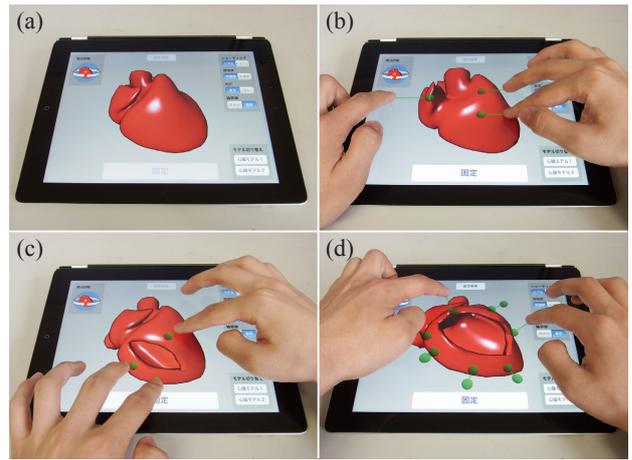


図7 本システムを使用している様子の例。

また、実際には描画の際に“埋め込み”の操作を行う。具体的には、各タイムステップにおいて、まず弾性体シミュレーションによって四面体メッシュの各頂点位置を更新し、それを元に詳細な三角形メッシュの各頂点位置を更新し、最後に三角形メッシュを上述の描画方法で描画するというプロセスとなる。

3.5 心臓の三次元モデルの用意

提案システムでは、変形シミュレーション用の四面体メッシュモデルと、“埋め込み”による描画のための三角形表面メッシュの両方が必要となる。われわれは実患者の胸部MRI画像を元に MeshLab [4] や Tetgen [13] 等の既存ツールを利用して、四面体メッシュは頂点数 1,240、また三角形メッシュは頂点数 2,129、面数 4,274 のものを構築した。ただし、既存ツールの自動機能だけでは適切なメッシュ構造の作成は不可能であったため、部分的な修正などは手動的に行った。この心臓モデルでは手軽に心臓の三次元的な構造の理解を補助できるよう、インタラクティブな実時間の操作性を重視して頂点数は最小限に絞った。

4 システム実装結果

本システムはタブレット型コンピュータ、iPad (第4世代) 上で動作する iOS アプリケーションとなっている。本システムのメイン画面を図6に、また本システム上でマルチタッチインタラクションを行っている様子を図7に示す。画面中央には心臓の三次元オブジェクトが表示されており、ユーザはこの心臓オブジェクトとインタラクションすることで心臓の構造を理解する。また、画面の端には各種の機能を提供するコンポーネントを配置した。以下では、本システムが備える個々の機能の振る舞いについて説明する。

4.1 指で引っ張る機能

本システムでは心臓の三次元オブジェクトにおいて常に弾性体シミュレーションが実行されている。その結果、指で心臓オブジェクト上をタッチし、画面上で動かすことで、タッチしている部分を引っ張って変形させるインタラクションが可能である(図7(b), (c), (d))。また、この操作はマルチタッチインタラクションとして複数の指で同時に行うことができる。

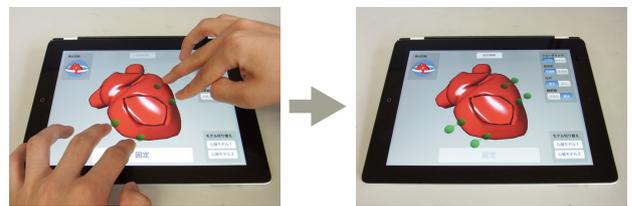


図8 固定機能の使用例。

4.2 引っ張った状態での固定機能

指で心臓オブジェクトを引っ張った状態で画面下部にある「固定」ボタンを押すことによって、指を離しても引っ張った状態を維持することができる。図8にその様子を示す。心臓オブジェクトを引っ張るのに使用する指は主に両手の人差し指と中指を想定している。人差し指と中指を引っ張るのに使用した状態でも親指によってタップしやすいように、画面下部に大きめの「固定」ボタンを設置した。また、画面上部に「固定解除」ボタンも設置しており、固定した状態を解除することも可能である。

4.3 視点の回転機能

三次元的な構造の理解を促進するため、本システムでは心臓モデルの周辺を回転させて視点を変更することができる。画面左上の視点変更アイコンをタッチしたまま指をスワイプすることにより、指先一つで視点の回転が行える。

4.4 描画方法の切り替え機能

心臓の複雑な三次元的構造を効果的に可視化するための機能として、描画に関するオプションが4つ用意されている。それぞれのオプションは、画面右上にあるボタンを選択することで簡単に切り換えられる。

シェーディング フォトリアリスティックなシェーディングによる描画を行う(図9(a), (b), (c), (d), (g), (h))だけでなく、トゥーンシェーディングによって、セルアニメ風の平面的な着色による描画を行う(図9(e), (f))ことが可能である。

透明度 心臓を不透明な材質で描画する(図9(a), (b), (e), (f), (g))だけでなく、半透明な材質で描画する(図9(c),

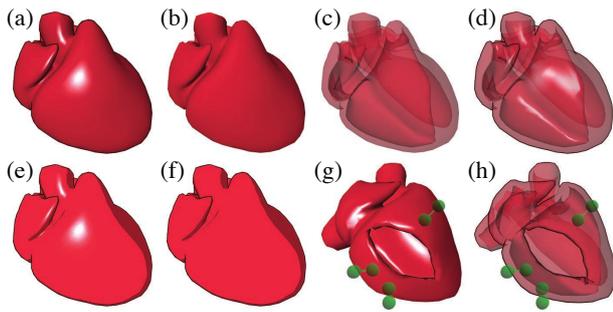


図9 心臓オブジェクトの描画例。

(d), (h) こともできる。半透明で描画することで、心臓の内部構造を可視化することができる。

光沢 光沢の描画を有効にしたり (図9 (a), (d), (e), (g)), 無効にしたり (図9 (b), (c), (f), (h)) することが可能である。光沢の有無を切り替えることによって、ユーザーの感じる立体感の消失の防止に効果があると考えられる。

輪郭線 心臓モデルに対して、漫画やイラストレーションのような輪郭線を表示する (図9 (a), (d), (e), (f), (h)) ことが可能である。輪郭線の表示は、血管が入り組んだ部分に注目する場合や、半透明表示によって心臓壁の前後関係の把握が難しくなる場合などに役立つと考えられる。

4.5 心臓モデルの切り替え機能

本システムでは、予め心臓の三次元モデルを複数用意しておくことで、表示する心臓モデルを切り替えることも可能である。現在、本システムは正常な心臓モデルと、外科手術を模して右心室の部分に切れ目を入れた心臓モデルの2種類を用意している。図7 (c), (d) は切れ目の入った心臓モデルに切り替え、切れ目を開くような操作を行っている例である。

5 システム評価

5.1 評価方法

開発したプロトタイプシステムの、診療支援システムとしての実用化に向けた今後の課題や方針を明確にするため、国立循環器病研究センターの小児循環器科専門医を対象として、インタビュー形式のユーザスタディを行った。対象とした医師は3名で、医療従事年数はそれぞれ7, 14, 10年であった。また、普段の生活様式において、それぞれ「日常的にマルチタッチ機能を備えたタブレット型コンピュータおよびスマートフォンを使っている」、「タブレット型コンピュータは使っていないがスマートフォンを使っている」、「どちらも使っていない」と三者三様であった。まず初めにわれわれが本研究の目的について説明し、続いて対象者に実際にシステムを触ってもらいながら順に機能を説明した。すべての説明が済んだ後、暫く自由にシステムを触ってもらいながら、口頭による自由形式のインタビューを実施した。

5.2 結果

まず初めに、ユーザスタディを通して観察できたのは、マルチタッチの操作も含め心臓オブジェクトを指で引っ張る、引っ張った状態で固定する、視点を回転させるなどの基本的

機能について3名ともすぐに使いこなせるようになったことである。また心臓オブジェクトの閲覧についても基本的に違和感がなく、全体として問題なく使用可能であった。

以下に口頭によるインタビューで得られた主な意見を内容別に纏めて記す。

【設問1：実際の診療に用いるための改善点】

1. 現在使用されている心臓モデルが簡略化されすぎており、より詳細な心臓モデルを扱えるようにする必要がある。具体的には、心臓の内部構造、特に弁、腱索、乳頭筋などの位置関係が重要であるが、現在の簡略化された心臓モデルではこれらの構造が消失してしまっている。
2. 外科手術の際にアプローチできるかどうかを判断するという観点では、心臓の構造だけでなく、大血管などの周りの器官との位置関係が把握できるようになると良い。

【設問2：将来的な用途に関して】

1. 実際の心疾患患者のデータを扱えるようになれば、将来的には診療支援ツールとして発展することが期待できる。しかし、特に内科医などは、二次元のエコー画像などの断面図を用いた診断に慣れているため、三次元モデルの提示と同時に対応する断面図を提示することが望ましい。
2. 医師から患者への説明ツールとしての用途にはあまり好ましいとは言えない。経験上、そのような用途では三次元モデルではなく簡略化された二次元イラストを用いる方が良い。ただし人工血管をつけるといった手術を説明するような特定のケースには三次元モデルが有効である可能性がある。
3. 医師間での情報伝達・共有ツールとしての用途も期待できる。そのような用途では、外科医の視点から見てもよりリアリティの高い弾性体シミュレーションや可視化が望まれる。また、実時間での切開、縫合のシミュレーション機能もあると良い。
4. 正常心だけでなく、先天性心疾患の典型的症例の心臓を扱えるようにすることで、学習ツールとしての利用が期待できる。

【設問3：その他の意見や要望】

1. 半透明表示にした際、心内膜に注目しづらいので、心内膜部分のみ別の色または透明度で可視化して欲しい。
2. 心臓モデルの各部位に、印を付けたり、色を付けたり、ラベルを付けたりするなどのアノテーション機能が欲しい。アノテーションの位置について、二次元断面図との対応がとれるとなお良い。
3. エコー検査の訓練ツールとしては、単なる弾性体シミュレーションではなく、拍動シミュレーションができるとう良い。
4. 現在の弾性体シミュレーションは、柔らかすぎる印象がある。実際の心臓に比べるとリアリティが乏しいと感じられる。
5. 興味あるシステムであり、将来的には臨床において役に立つと思われる。

6 考察

心臓レプリカの機能をタブレット型コンピュータ上に仮想的に再現するため、簡略化した三次元心臓モデルの構築を行い、また弾性体シミュレーションを幾何制約に基づいた Shape Matching 法を用いるなどして実時間で動作するシステムを開発した。特に、心臓オブジェクトの局所的な運動を維持しつつ大局的な運動を減衰させる方法や、指の動きを実際に心臓オブジェクトに作用させる力に変換する方法など、システムを実現する上での技術的な新規性は高いと考えている。しかし、当初より実時間の操作性を重視した心臓モデルの簡略化により、本来の目的とする先天性心疾患の心臓レプリカの短所を補完して診療支援を行うシステムとしては、プロトタイプの域を出ていない。実際、今回のユーザスタディも、現時点におけるシステムが実際の診療現場での使用に堪え得るかについて検証することを主眼とするものではない。現在のシステムが抱える問題や不足している機能について、将来的に実用化することを念頭に意見をj得るという観点から実施した。

医師による評価を通して、タブレット型コンピュータにおいてマルチタッチ操作が容易に行えること、また本システムが特にいくつかの用途に関しては実用的になり得るということが確認できたと思われる。また、診療支援のシステムとして実用化していくための意見も得られた。今回のユーザスタディでは様々な用途が想定され、外科的な手術シミュレーションを前提とした意見を始め、エコー検査などの内科的な診断のサポートツールや患者さんへの説明ツールとしての応用など広範な意見が得られた。今後はより具体的な用途に注目し、目的を絞ってシステムを設計する必要があると考える。ただし、ユーザスタディにおいても、「興味あるシステムであり、将来的には臨床において役に立つと思われる」と本システムに対する医師の関心が高いことを示唆する感想が得られている。推測ながら、他に同様のものがないことによる新規性やインタラクティブな心臓の閲覧性の高さなどに対して医師の期待感は大きいと感じられ、本システムに関する技術開発の有効性や可能性が評価されたものと見なしている。

一方、「現在の弾性体シミュレーションは柔らかすぎる」などと物理的な正確性の不十分さを指摘する意見があった。実時間の操作性を重視し、Shape Matching 法を採用して計算コストの低減を図ったことが大きな要因である。しかしながら、従来からも心臓手術シミュレーションについては、「シミュレーション精度の追求には生体の生理特性や複雑な物理特性の記述が必要となり、実時間性を満たしたシステムの構築は困難」との議論がある [7]。特に、本研究のように手軽に心臓の三次元的構造の理解を補助するシステムとしては、当面、心臓弾性の正確性の追求よりは、むしろ操作性の向上および個別の心疾患を対象とした心臓モデルの構築や精緻化の方向であると考える。

ところで、心臓レプリカの機能を補完する本システムの重要な技術要件の一つと考えていたマルチタッチ機能について、医師による評価においては具体的なコメントがほとんど得ら

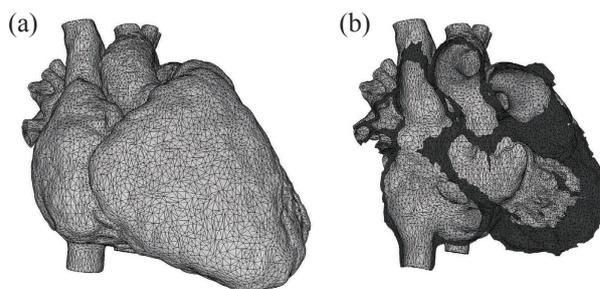


図 10 (a) 約 50,000 の頂点からなる先天性心疾患の心臓モデル. (b) その断面図.

れなかった。これは現状のスマートフォンやタブレット型コンピュータなどにおいてマルチタッチ機能が一般的になっていることが暗黙の前提となり、操作説明を行うまでもなく必然の技術と受け止められていた可能性が高いと思われる。なお、当初のシステム設計の段階において iPad を選定した理由の一つは、すでに広く普及しており、マルチタッチ機能を含む基本的操作の学習コストが低いものと期待したことによる。

現在、本システムで扱っている心臓モデルが簡略化されすぎているという意見について、これを改善するには 2 点解決すべき問題があると認識している。1 点目は計算コストの問題である。本システムはコンシューマレベルのタブレット型コンピュータ、iPad 上で動作するように設計されている。詳細なモデルを扱おうとすると、弾性体シミュレーションおよび描画の双方の点において処理が実時間では難しくなり、自然なインタラクションを行うことができない。解決すべき問題の 2 点目は、心臓モデルの作成方法である。現在は CT 画像を元に新たに心臓モデルを作成しているが、解像度の問題から診療で重要となる弁や腱索など細かい構造の取得は難しい。また、乳頭筋や筋束など心臓内腔の構造を示すのにも容易でなく、詳細な心臓モデルの作成には専門医の判断による用手的な方法に頼らざるを得ないと考えている。

なお、現在使用している iPad の計算性能では頂点数が 50,000 を超えるようなモデルを扱うことが困難であるため、目安とする心臓モデルのサイズとしては頂点数が 25,000–50,000 程度 (面数でいうと 50,000–100,000 程度) の三角形メッシュとして作成することを想定している。図 10 におよそ 50,000 の頂点からなる心臓モデルの例を掲載する。このまま使用するのは全体として粗すぎるため、必要に応じて、当該の先天性心疾患ごとに重要な部位のみ詳細にして重要でない部分は平滑化するなど、疾患別・部位別のチューニングを図る予定である。いずれにしても、タブレット型コンピュータ上での計算コストや制限を考慮しながら、今後、心臓モデルをどのように設計・構築するかが大きなポイントになる。現在、典型的な先天性心疾患を対象とし 10 症例を目標に詳細な心臓モデルの作成を進めている。

7 結論

手軽な心臓の三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、われわれは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、プロトタイプシステムを iPad 上で動作するアプリケーションとして開発した。本システムでは、コンピュータグラフィックス技術を用いて心臓の三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、その心臓の三次元的構造を効果的に理解できることが期待される。

このプロトタイプシステムを用いて、小児循環器科専門医 3 名を対象にインタビュー形式のユーザスタディを行い、診療支援ツールとしての実用化に向けての意見や要望などを得た。これらの意見や要望を参考にし、より実用的なシステムを開発していくことが今後の課題である。特に、先天性心疾患の心臓モデル構築について、タブレット型コンピュータ上での計算コストや制限を十分に考慮する必要があることが分かった。

謝辞

本研究の一部は「循環器病研究開発費 25-5-1」および「科学研究費補助金：基盤研究（B）25282138」の助成を受けて実施された。国立循環器病研究センターの倫理委員会の承認（承認番号 M24-75）を受けた。

参考文献

- [1] Ijiri, T., Ashihara, T., Umetani, N., Igarashi, T., Haraguchi, R., Yokota, H., and Nakazawa, K.: A Kinematic Approach for Efficient and Robust Simulation of the Cardiac Beating Motion, *PLoS ONE*, Vol. 7, No. 5(2012), pp. e36706.
- [2] Ijiri, T., Takayama, K., Yokota, H., and Igarashi, T.: ProcDef: Local-to-global Deformation for Skeleton-free Character Animation, *Computer Graphics Forum*, Vol. 28, No. 7(2009), pp. 1821–1828.
- [3] Koyama, Y., Takayama, K., Umetani, N., and Igarashi, T.: Real-time Example-based Elastic Deformation, *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, SCA '12, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, Eurographics Association, 2012, pp. 19–24.
- [4] MeshLab: <http://meshlab.sourceforge.net/>.
- [5] Mitchell, J., McTaggart, G., and Green, C.: Shading in Valve's Source Engine, *ACM SIGGRAPH 2006 Courses*, SIGGRAPH '06, New York, NY, USA, ACM, 2006, pp. 129–142.
- [6] Müller, M., Heidelberger, B., Teschner, M., and Gross, M.: Meshless Deformations Based on Shape Matching, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 24, No. 3(2005), pp. 471–478.
- [7] Nakao, M., Oyama, H., Komori, M., Matsuda, T., and Takahashi, T.: 心臓手術シミュレーションに要する心拍動の視覚及び力覚提示に関する研究, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 3(2002), pp. 413–420.
- [8] Nealen, A., Müller, M., Keiser, R., Boxerman, E., and Carlson, M.: Physically Based Deformable Models in Computer Graphics, *Computer Graphics Forum*, Vol. 25, No. 4(2006), pp. 809–836.
- [9] Raskar, R.: Hardware Support for Non-photorealistic Rendering, *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Workshop on Graphics Hardware*, HWWS '01, New York, NY, USA, ACM, 2001, pp. 41–47.
- [10] Rivers, A. R. and James, D. L.: FastLSM: Fast Lattice Shape Matching for Robust Real-time Deformation, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 26, No. 3(2007).
- [11] Shiraishi, I., Kurosaki, K.-i., Yamada, O., Kanzaki, S., Kagisaki, K., and Ichikawa, H.: MSCT を用いた複雑先天性心疾患 3 次元画像診断とその応用：画像計測から心臓レプリカ作成による手術シミュレーションまで, 日本心臓病学会誌, Vol. 6, No. 3(2011), pp. 261–268.
- [12] Shiraishi, I., Yamagishi, M., Hamaoka, K., Fukuzawa, M., and Yagihara, T.: Simulative operation on congenital heart disease using rubber-like urethane stereolithographic biomodels based on 3D datasets of multislice computed tomography, *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, Vol. 37, No. 2(2010), pp. 302–306.
- [13] Si, H.: On Refinement of Constrained Delaunay Tetrahedralizations, *Proceedings of 15th International Meshing Roundtable*, Springer-Verlag, 2006, pp. 509–528.
- [14] Wilson, A. D.: Simulating Grasping Behavior on an Imaging Interactive Surface, *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '09, New York, NY, USA, ACM, 2009, pp. 125–132.
- [15] Wilson, A. D., Izadi, S., Hilliges, O., Garcia-Mendoza, A., and Kirk, D.: Bringing Physics to the Surface, *Proceedings of the 21st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '08, New York, NY, USA, ACM, 2008, pp. 67–76.
- [16] コンピュータグラフィックス編集委員会: コンピュータグラフィックス, CG-ARTS 協会, 2nd edition, 2006.