

循環器系生体力学シミュレーションのためのモデリング手法と、血管病のリスク評価のための統合システムの開発

早坂 智明[!], 船曳 淳[@], 松本 昌昭[@], 森 大祐[#], 山口 隆美[#]

[!] 理化学研究所 生体力学シミュレーション特別研究ユニット

埼玉県和光市広沢 2-1

e-mail: hayasaka@postman.riken.go.jp

[@] 三菱総合研究所

東京都千代田区大手町 2-3-6

e-mail: funabiki@mri.co.jp, matsumot@mri.co.jp

[#] 東北大学大学院 工学研究科

宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 01

e-mail: daisuke@pfs1.mech.tohoku.ac.jp, takami@pfs1.mech.tohoku.ac.jp

我々は、各種の血管疾患の病因の解明、治療の計画や評価、医用機器の設計のために、主として大動脈弓部を中心とする大血管の計算生体力学シミュレーションの研究を進めてきた。その中で、計算生体力学シミュレーションを臨床に応用するために必須の、効率的な形状モデリング手法を開発した。またこれまでの研究成果を踏まえ、計算生体力学シミュレーションにもとづいた血行力学的な解析と各種のリスクの評価を行うための統合システムを開発している。このシステムの狙いは、可能な限りモデリング作業と計算を回避し、リスク評価に要する時間を劇的に短縮することである。

1. Background

計算生体力学シミュレーションは、各種の血管疾患の病因の解明、治療の計画や評価、医用機器の設計のツールとなることが期待されている。しかしながら、計算モデル作成に複雑で慎重な作業が要求されること、計算量が大きいため計算機への莫大な投資が必要であること、既存のソフトウェアは汎用であろうとするあまりシミュレーションの専門家にしか使えないユーザーインターフェイスを持つことなどの問題から、計算生体力学シミュレーションは広く利用されているとは言い難い。特に臨床の場での利用は皆無に近いと考えられる。これらの問題点を踏まえ、計算生体力学シミュレーションを一部の専門家の研究のみならず広く臨床に応用するために、我々は、人間の空間認知力を活用しモデル作成作業を効率化するプログラム **malmodeler** を開発した。またさらに臨床現場でのモデリングおよび計算を可能な限り回避することを基本として、短時間で各種の血管病のリスク評価を行うための統合システム『CREAM (Computational Risk Estimation And Management)』を開発している。

2. malmodeler

malmodeler は、CT や MRI など得られた医用画像から形状モデルをインタラクティブに作成するためのプログラムである [1]。医用画像をボリュームイメージとして、作成中の形状モデルと重ね合わせて表示する機能を持つ。最近の廉価で強力なグラフィックスハードウェアを利用し、『普通の』 PC でも実用的な速度で動作する。空間的な血管走行や形状が分かりやすく提示された環境下で、人間の空間認知力を活用した直感的なモデリングが可能である(図 1,2)。

ボリュームイメージの表示の実装には OpenGL の GL_NV_texture_shader2 拡張を用いた。これにより、医用画像の可視化で特に必要とされる translation function のインタラクティブな変更 (ブライツネス調整、コントラスト調整、スレッシュホールド、特定の値のみの強調など) と、各種の投影オペレータの切り替え (over、MIP など)、pre-integrated な高品位なボリューム表示とを実現した [2, 3, 4]。

malmodeler で主に使用される形状の表現は polygonal mesh と multi-resolution mesh である。polygonal mesh は n 角形ポリゴンのメッシュであり、任意のトポロジーを持つ。multi-resolution mesh は 3 角形ポリゴンのメッシュであり、任意のトポロジーを持ち、loop subdivision surface にもとづいた複数解像度での編集が可能である [5, 6]。また、ノードに血管径を結びつけることで、面の無い multi-resolution mesh で centerline based な血管の表現ができる。作成された形状モデルは、ファイルの上では S 式の形をとるため、他のプログラムでの直接利用がしやすく、XML 等の他形式との相互変換も容易である。

3. CREAM

モデリングの時間は、malmodeler で短縮されたとは言え、大動脈弓部で十分から一時間は必要である。また計算に要する時間は短縮できていないなど、臨床応用の場で日常的に利用するための環境は依然として整っていない。そこで我々は、現場でのモデリングおよび計算を可能な限り回避することを基本として、短時間で各種の血管病のリスク評価を行うための統合システム『CREAM (Computational Risk Estimation And Management)』を開発することにした。

『CREAM』の主要な要件は以下の通りである。

- 血管の三次元画像と対応する計算モデル、計算結果を格納するデータベースを備える。様々な血管走行、形状に対応した計算モデルをあらかじめ作成し、計算も行っておく。
- 新たな患者の血管画像から血管分岐のトポロジーや幾何的な特徴を抽出することができる。抽出されたパラメータにもとづいて類似モデルと計算結果をデータベースから検索し、可視化を行うことができる (図 3,4,5)。
- 必要な場合は新たな形状モデルを作成し、計算格子を生成、計算を行うことがで

きる。モデルの作成には、患者個別の画像から半自動生成されたプロトタイプを利用できる。

- 画像のインポートからトポロジー抽出、トポロジーにもとづいたモデル検索、モデル作成、メッシュ生成、計算、結果可視化までの一連のワークフローを支援する一貫したユーザーインターフェイスを備える (図 6)。
- CT や MRI など既存のモダリティと、DICOM を通じて連携する。

主要なサブシステムは、血管の三次元画像と対応する計算モデル計算結果を格納するデータベース (DB)、ユーザーの手元のワークステーションで動作しユーザーインターフェイスを提供する複数のフロントエンド (FE)、データのオブジェクト指向的な表現をフロントエンドに提供しアクセス制御などを行うアプリケーションプログラム (App)、力学シミュレーションを行う計算ソフトウェア (Com) の四種類である (図 7)。

主要なモジュールは図 8 に示す通りである。このうち、名前が “libmal” で始まるもの (libmalroom: 三次元座標、変換マトリクス、クォータニオン、OpenGL の拡張機能へのアクセス、その他種々雑多なものの実装、libmalftk: カーソル表示、グリッド表示、表示の回転拡大縮小などの機能を備えた OpenGL のビューを FLTK に付け加えるための実装、libmalgtkmm: gtk— 向けの libmalftk と同様の実装、libmalvolmm: ボリュームレンダリングの実装、libmallevelset: 二次元、三次元の fast marching 法と level set 法の実装 [7]) と malmodeler (モデル作成のプログラム) については、現時点でほぼ開発が完了している。

4. References

- [1] Tomoaki Hayasaka, Ryutaro Himeno, Hao Liu, Takami Yamaguchi, Development of Interactive Modeling System for the Computational Biomechanics Simulation using Medical Imaging Data, Clinical Application of Computational Mechanics to the Cardiovascular System, T. YAMAGUCHI (Ed.), Springer-Verlag, Tokyo, pp.39-42, 2000.
- [2] Cabral, B., Cam, N., and Foran, J., 1994, "Accelerated Volume Rendering and Tomographic Reconstruction using Texture Mapping Hardware," ACM Symp. on Vol. Vis.
- [3] Eckel, G., 1998, "OpenGL Volumizer Programmer's Guide," SGI Developer Bookshelf.
- [4] K. Engel, M. Kraus., and T. Ertl. High-quality pre-integrated volume rendering using hardware-accelerated pixel shading. In Eurographics / SIGGRAPH Workshop on Graphics Hardware '01, pages 9--16, 2001.
- [5] Loop, C., 1987, "Smooth Subdivision Surfaces Based on Triangles," Master's thesis, University of Utah, Department of Mathematics.
- [6] Zorin, D., Schroder, P., and Sweldens, W., 1998, "Interactive Multiresolution Mesh Editing," Subdivision for Modeling and Animation, SIGGRAPH 98 Course Notes.
- [7] Sethian, J.A., "Level Set Methods and Fast Marching Methods," 1999, Cambridge University Press.

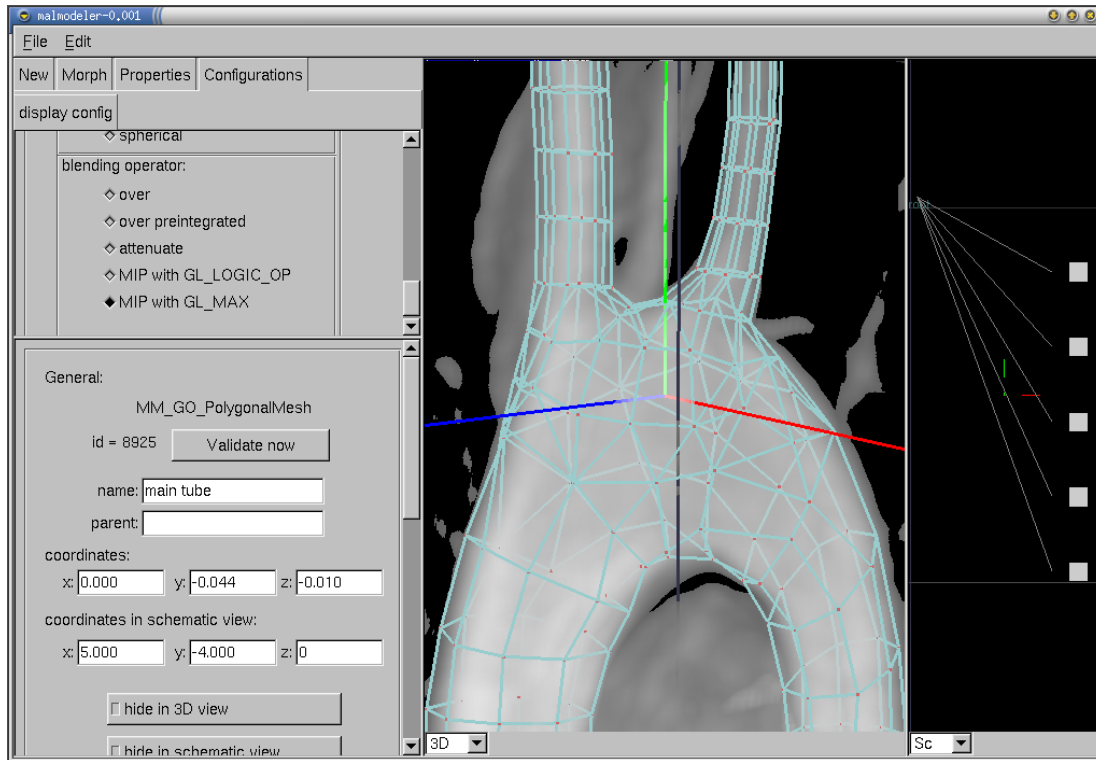


図 1 ポリゴンメッシュによる形状モデル表現と編集操作

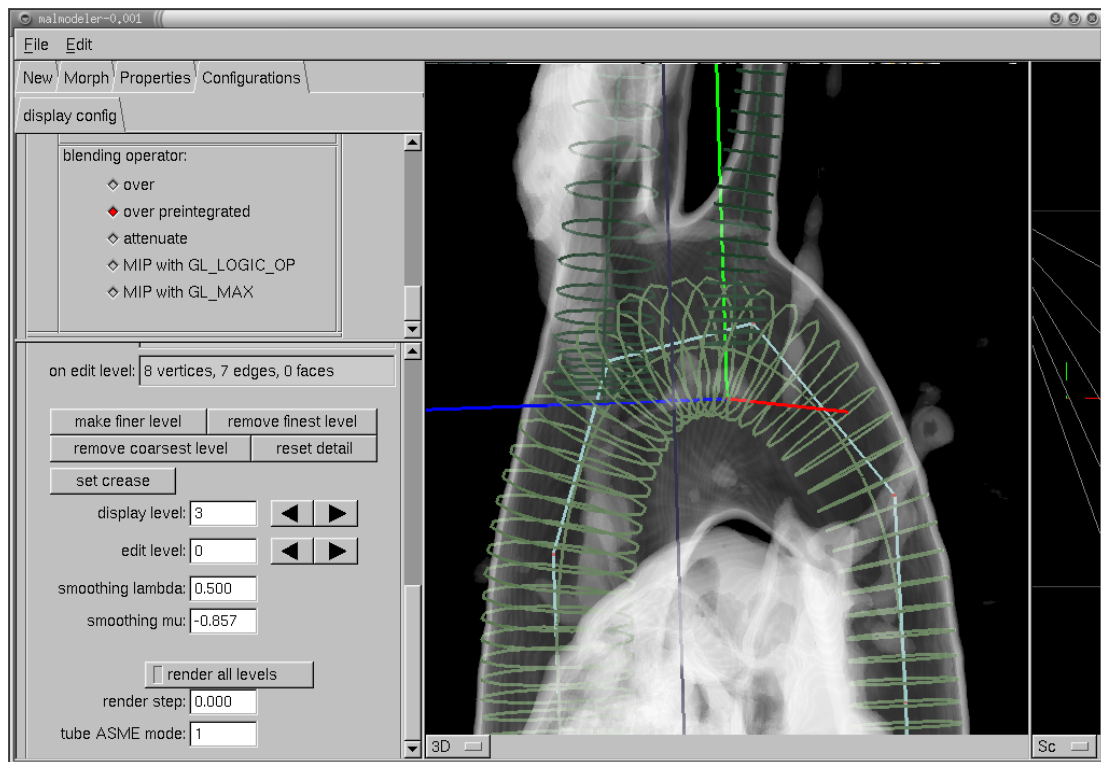


図 2 複数解像度のセンターラインによるモデル表現と編集操作



図 3 画像処理による大血管のグラフ化

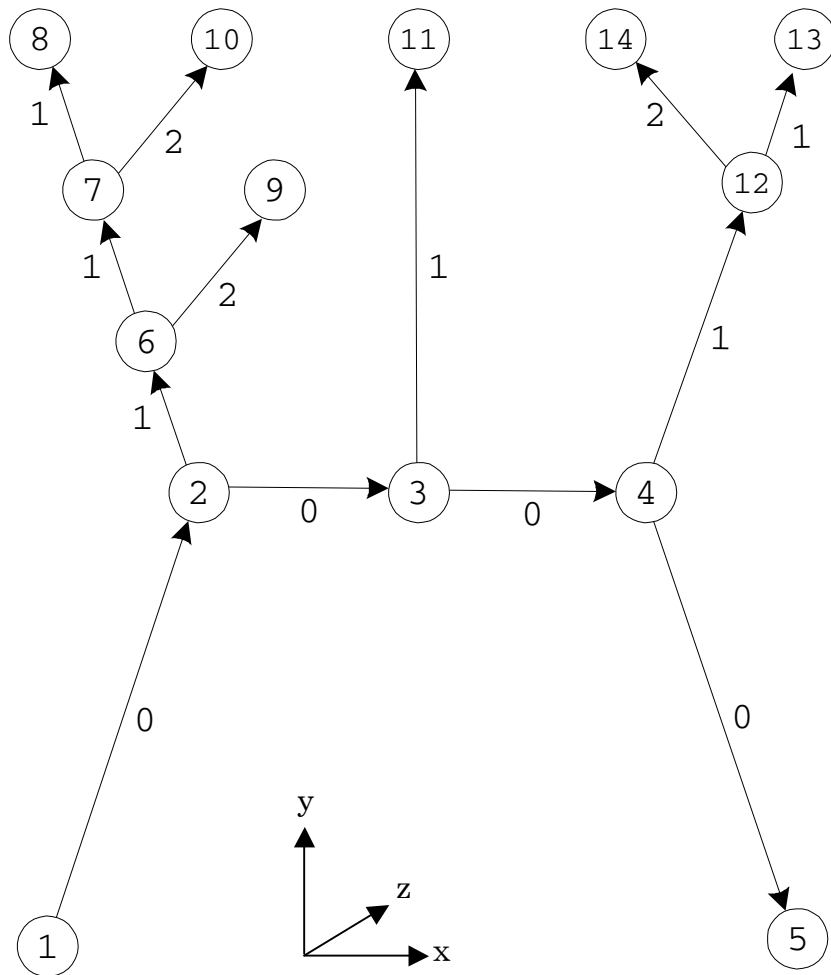


図 4 血管の分岐の有向グラフ表現

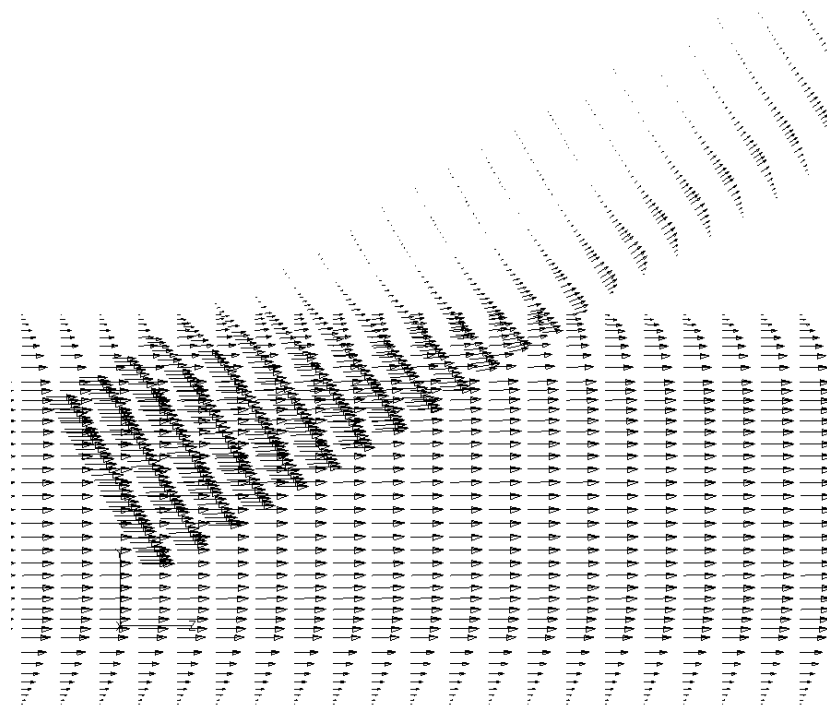


図5 三次元オーバーセットメッシュを用いた有限要素法数値流体シミュレーション

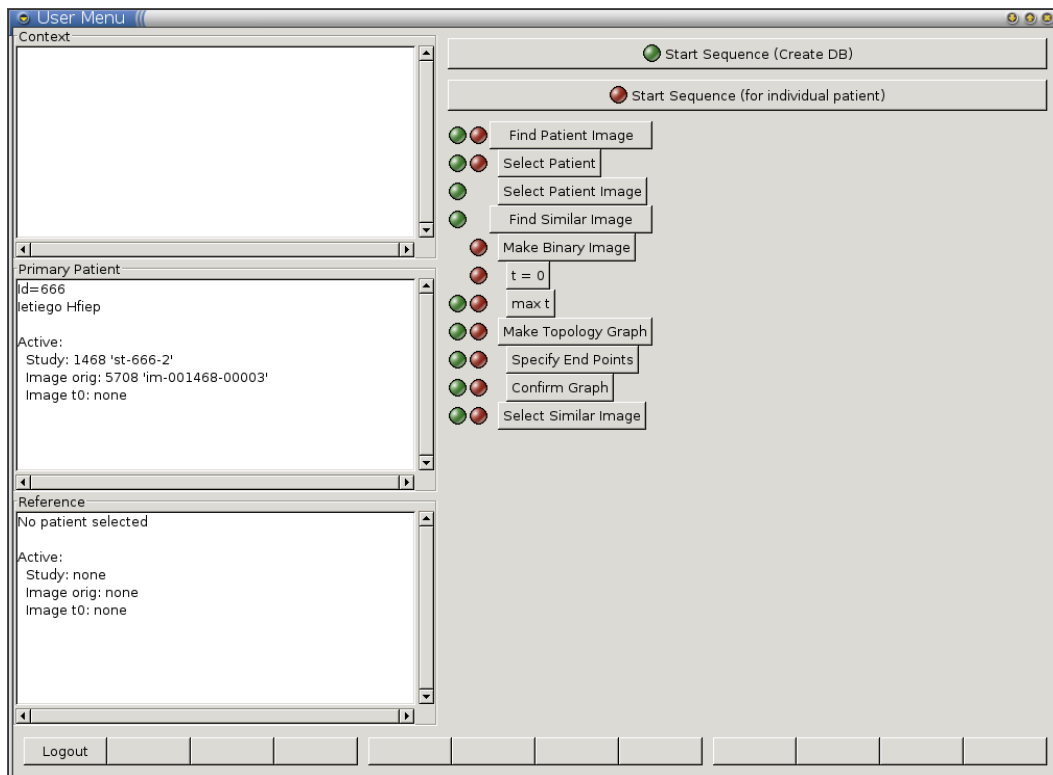


図6 CREAMのユーザーインターフェイス（開発中の画面）

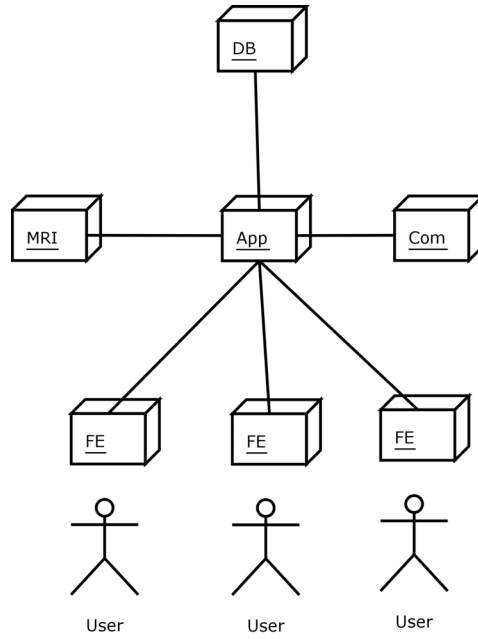


図 7 CREAM の構成

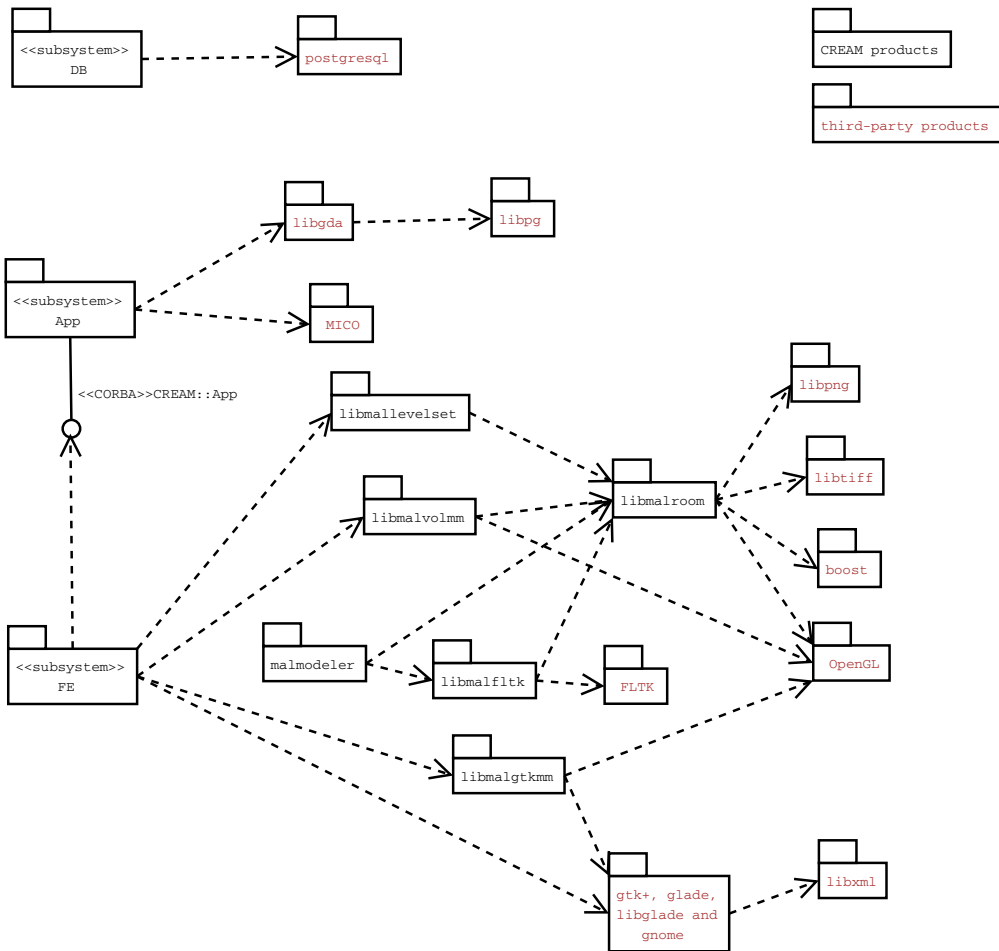


図 8 CREAM のモジュールと、コンパイル時の依存関係