

生体ボリュームデータに基づく手術手技訓練システムの開発

緒方 正人*, 寺田 尚史*, 菊川 孝明*, 本郷 新*

* 三菱プレシジョン (株) 開発部
鎌倉市上町屋 345

e-mail: {ogata,tterada,tkikukawa,shongo} @mpcnet.co.jp

要旨 筆者らは平成16年より、5年計画で、内視鏡を対象とした実用的な手術シミュレータを開発している。最終的な目標は、MRIで採取した生体データを臓器に分離し、各々に物理量を割り当てたボルメトリックなモデルデータを仮想手術の対象部位として、リアリティの高い視覚、力覚のフィードバックを操作者に返す手術手技の訓練装置を開発することである。装置の主要部はモデルデータ生成部、高速演算部、ヒューマンインタフェース部である映像・力覚呈示部からなる。本報告は、プロジェクトの目標、技術課題、現状に関して報告する。

1. はじめに

1990年代初頭、医療と工学の融合が急速に深まり、米国の有力大学では工学系教育において生物系科目が必修になった⁽¹⁾。これらの医工連携の成果として先端的计算技術を活用する手術シミュレータが米国、ドイツ等において提案され各種の実験的な試みが行われた^(7,8,9)。国内においても、慈恵医大⁽²⁾、生命研(現産総研)⁽³⁾などで手術シミュレータの研究開発が行われた。筆者らの属する三菱電機グループにおいても情報技術総合研究所を中心として旭川医大と共同で眼科シミュレータを開発した⁽⁴⁾。しかし、当時を振り返ると、一般論として、(1)到達すべき技術レベルと計算能力に大きな乖離があり、手術の種類が限られたり(当時の工学的技術レベルで達成可能な手術に限られた)、(2)医療現場において手術シミュレータが真に必要とされていなかった、などの否定的な要因があり、その課題の高さが新たに認識され、その後の景気低迷から、システムの開発熱は当初の勢いを失った感があった。

近年、半導体技術やネットワーク構成技術の著しい進歩によりPCに代表されるように、計算機の飛躍的な能力の向上が達成され、国内外において、再び手術シミュレータの研究開発が注目されている⁽⁸⁾。特に、国内においては、医師が高度な手術を訓練する有効な手段を持たず困難な手術をしなければならない状況から、医療事故が多発している。また、社会の成熟に伴い、裁判における医療側の絶対優位が崩れ、刑事事件での有罪判決さえ出る状況となった。高度な医療器具を用いた手術の訓練をどのように行うかは、医療に直接携わる者でなくても、大きな課題であると推測ができる。このような社会的な要請から、再び手術シミュレータの必要性が高まっている^(5,6,10)。

筆者らは、H16年度より独立行政法人 情報通信研究機構殿の研究助成により、実用的な手術シミュレータの開発をおこなっている。

表 1. 年度対応の目標

番号	年度	目標
(1)	初年度	・技術課題の明確化： 小実験による評価実験 ・計算実験環境整備： VG クラスタ, 力覚装置 ・対象手術の確定： 硬内視鏡下泌尿器関係手術 ・連携研究機関の確定： セグメンテーション 理化学研究所 殿 手術手法 横浜市大医学研究院 殿 ・目標性能の明確化： 512³ の表示を持つ.
(2)	3 年度の目標	・実時間力学シミュレーション技術の確立 ・生体シミュレーション用データの構築 (中間段階) 複雑なデータ構造は持たない. ・高速演算装置の開発 ・第一次プロトタイプの開発 (泌尿器関連の内視鏡下手術)
(3)	最終年度 (5 年度)	・生体シミュレーション用データ構築法の確立(データ構造保持) ・第二次プロトタイプの開発 ・2 種類目の泌尿器関係の内視鏡下手術 ・ネットワークを介しての手術環境の共有

本報告は、このプロジェクトの目標、克服すべき技術課題、および現状に関して述べる。

2. プロジェクト概要

2.1 目的および目標

先端的計算技術を活用し、実用的な手術手技訓練装置を開発することにより、高度な医療の訓練を可能にする。模擬対象は泌尿器関係とし、硬内視鏡下手術のプロトタイプを開発する。このとき、手術手技訓練コンテンツの入れ替えで、各種対象手術手技の訓練に対応できる計算プラットフォームを開発しようとしている。また、技術的ハードルは非常に高いが、最終的にはネットワークを介して、指導する医師の操作する動きを、訓練を受ける学生が視覚および力覚で体感できるように対象手術環境の共用を目指している。表 1 に年度対応の目標を示す。初年度は、基礎的な小実験により技術課題と目標を明確にした。3 年度は、第一次の試作を行い、最終年度までの期間を利用して、システムとしての問題点および連携医療機関の評価により明確にされる問題点を逐次改善していく予定である。

2.2 開発内容

図 1 は筆者らが目指している、訓練システムのブロック図である。システムは(1)生体データ作成システム、(2)手術シミュレータ本体からなる。また、表 2 に、手術手技訓練装置実装プラットフォームの構成、図 2 に外観を示す。

図 1 に示すように、手術シミュレータ本体は、(a)高速演算装置、(b)表示装置、(c)力覚提示装置、(d)対象人体模擬機構部で構成される。高速演算装置は、力学計算およびその結果である映像を表示するための計算処理を行う装置である。現在開発段階であるが、主要な機能およびその実現方法は以下である。

(1) 生体データ作成システム

MRI (CT) から得られたデータを部位毎に分離して、その部位に固有な物理定数を付与すると共に、力学的処理対象点数を削減するために、詳細度に従い、有限要素に分解する。また、接触の判定を高速に行えるように、この有限要素を球で包含するメタデータの構成を持つ。データとしては、標準データおよび患者固有のデータを生成可能なように想定している。また、物理定数等の変更

等の機能を持つ。

(2) 手術シミュレータ

力学モデル計算およびその結果である映像および力覚の元となる処理を行い、演算能力を高めるために、対象模擬空間を空間分割して、この部分空間に各演算処理を割り当てる並列処理を行う。このとき、隣接部に関しては、ネットワークを用いてデータの送受を行う。図2に、本プロジェクトでの並列処理の基本的な考えを示す。ネットワークの通信負荷を削減して並列化率を向上させるため、シミュレーションに必要なデータ通信は汎用ネットワークで行い、発生した部分映像の合成に必要な通信はイメージコンポジタと称する映像合成専用ネットワークを用いて通信の輻輳を防ぐ⁽¹¹⁾。

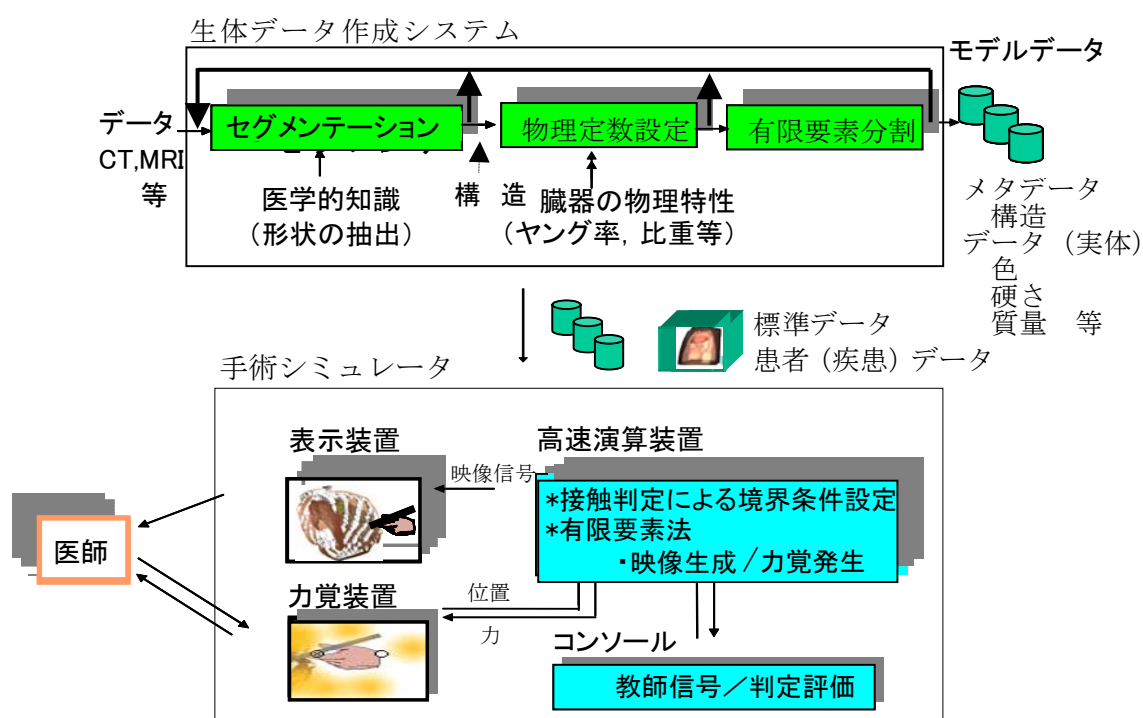


図1. 生体ボリュームデータに基づく手術手技訓練装置の構成

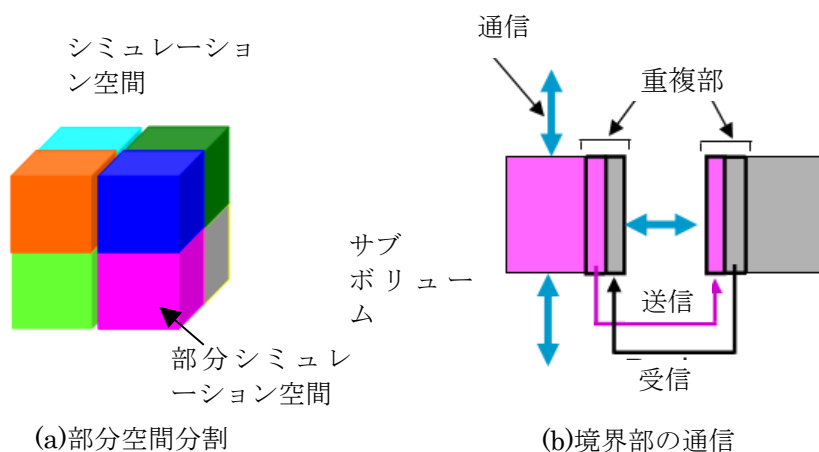


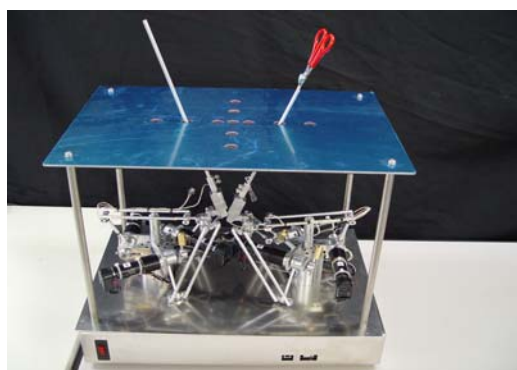
図2. シミュレーション対象空間の分割による並列処理 (シミュレーションおよび表示)

表 2. 手術手技訓練装置実装プラットフォームの構成

番号	カテゴリー	技術の概要
1	実装プラットフォーム	表 1 の番号 1, 2, 3 の研究成果を実装していくプラットフォーム
	(1) ソフトウェア	人体モデル作成プログラム
		シミュレーションプログラム ・有限要素法 グラフィックス制御 ハプティック制御
		手術シナリオ
	(2) ハードウェア	高速演算装置 ・高速演算ボード ・接続用ネットワーク回路
		視覚表示装置 ・ディスプレイ / GPU / インタフェース回路
		力覚表示装置 ・メカ / インタフェース回路



(a)高速演算装置



(b)力覚呈示装置

図 2. 手術シミュレータの主要構成品の外観

表 3 は、本プロジェクトにおける主要な研究項目である。大別すると、項目 1 は対象手術・手技で必要とされる訓練内容の研究，項目 2 は人体モデルデータの生成（標準および個別患者データに対応）研究開発，項目 3 は生体力学シミュレーション法の研究である。また，生体力学シミュレーションの研究は，(a)力学モデルおよび実装法，(b) 計算機技術を活用した高速演算装置の研究開発，(c) 映像・力覚を提示するヒューマンインタフェースの研究に分けて実施している。

項目 1 の手術手技に関しては，医療機関との連携が必要であるので，横浜市立大学医学研究院 窪田先生のチームと共同研究を開始した。手術に必要な訓練内容に関するご指導および，一次プロトタイプシステムを手術手技の訓練・教育の観点から，評価をして頂く予定である。

項目 2 の生体モデルデータ生成に関して，我々のグループにセグメンテーション関係の技術蓄積が無いので先行技術を持つ理化学研究所 生体力学シミュレーションチームの横田先生と共同研究をさせて頂いている。この臓器に分離したデータを元に，詳細度を付けた多面体要素への分割および，接触判定を高速に行う凸包を付与したデータ構造を付与する。

項目 3 に関しては，大きな技術課題である実時間性を要求されるため，モデルおよび計算の簡略化は当然のこととして，計算プラットフォーム自体の演算能力の向上を計算工学的に行う高速演算装置の開発を行っている。項目 3 - (3) の映像発生は，変形に対応が容易で処理がレギュラーなスプラッティング法 (Splating)

表 3. 手術手技訓練装置開発に必要な要素技術および開発項目

番号	要素技術		技術の概要
1	対象手術・手技の運用要求解析		医師が実際に必要とする手技訓練の評価を行い、何を模擬するか取舍選択および模擬程度の評価を行いプログラムとして実装するものを決定。
	(1)	シミュレーション内容決定	対象手術手順の理解
	(2)	訓練としてのシナリオ作成	対象手術の手順等のシナリオ
	(3)	評価の提示法	実施した模擬手技の効果的な提示法
2	人体モデルデータ生成		高速演算可能なデータ構造を持つ人体モデルの生成技術
	(1)	3D セグメンテーション	半自動でのセグメンテーション
	(2)	物理量の付与	計測データ (CT/MRI 等) からのデータマイニング技術
	(3)	データ構造	*有限要素分割(メッシュ) *ボリュームデータ(質量, 剛性, 色等) *メタデータ ・合成マトリクス / LOD / トポロジー
	(4)	モデルデータ編集	マニュアルモードでのモデルデータの選択/修正
3	生体力学シミュレーション技術		医師を操作者としてシミュレーションの系へ組み込むマンインザループシミュレータの方式研究・設計
	(1)	人体モデルの振舞いの模擬	実時間計算モデル
			実時間 視覚/力覚の生成方式
			モデルへの操作の種類模擬方法 ・切断, 切開, 縫合等による系への境界条件付与
			コリジョンデテクション/リアクションの方式 (臓器および手術器具) ・自⇄他, 自⇄自
			視覚/力覚の生成方法
	(2)	高速演算方式	並列処理 (データ通信の削減)
			ハードウェア化のアーキテクチャ
			大規模連立方程式計算の実装 (有限要素法/境界要素法等)
	(3)	マンマシンインタフェース	画像表示呈示方式 (視界)
			力覚表示呈示方式

を基にして GPU での高速化を図っている。また、術具操作部は、並進 3 自由度力覚提示装置を左右 2 台用いて実現している。図 2-(b)に示すように術具は人体を模擬したプレートに設けられたポート (穴) を通して、力覚提示装置の 3 自由度 (回転) ジンバル部に取り付けられている。これにより、実際の術具操作と同様の動作と操作感覚を提示することが可能となっている。

2.3 開発の課題

(1)モデルデータの構造化

臓器の切開、摘出などを実現する場合、モデルデータが構造を持つ必要があると考えている。これらを高速に実現するためには、凸包、詳細度分割情報等、をデータに予め与えてデータを構造化しておくことが必要である。しかし、現時点では、モデルデータの構造化は大きな技術課題である。

(a)高速接触判定のための構造化

内視鏡の操作により外力を与える部位を高速に特定するには、探索回数を削減することができるようなデータの構造化が必須である。現在開発している第一次プロトタイプに関しては、構造を持たない単一ボリュームで実施している。

(b)詳細度を考慮した分割

力学計算では、対象とする偏微分方程式を時間方向に関しては、積分形に直して計算している。また、空間方向に関しては、現在の計算対象点を考えた場合、この計算が、影響を与える隣接する計算対象点は、有限要素で分割された辺で接続されるものに限ることで、計算量を削減している。従って、切断、除去時には、トポロジーの変更を伴い、有限要素への再分割が必要になる。現在想定している方法では、高速に有限要素への分割を行うことが課

題である。この状況は、接触判定でも同様であり、トポロジーの変更が発生した場合この凸包等を再構築する必要がある。

(2)評価手法

全てのシミュレータおよびシミュレーションにいえることであるが、模擬対象の実際の振る舞いとシミュレーション結果との比較が困難である。特に、生体に関する場合、実験値と、シミュレーションの定量的な比較は何を比較するかも含めて、未開拓な部分が多い。本質的に重要な、これらの基礎科学的な研究に関しては、公的研究機関に期待するところ大である。

3. まとめ

筆者らが実施している実用的手術手技シミュレータのプロジェクト概要に関して報告した。報告のように、実用的なシミュレータを開発するにはクリアすべき大きな技術課題が山積している。手術手技訓練においては、何が医療現場で必要とされているかが最重要であり、今後、使用者である側の医師の要求と、工学的限界との間で妥協点を探ることにより、問題の解決を図りたい。

また、個々の小実験では、矛盾がなくてもシステムとしてどのような問題があるかの予測が困難であるので、第一次プロトタイプを開発しこのプロトタイプをリファインメントしていくアプローチで、何とか実用的な手術手技訓練装置を開発したい。

本プロジェクトの成果による手術手技の訓練装置が、社会的に大きな問題である医療事故の削減と新たなスキームでの装置の創出に若干でも寄与できれば大きな喜びである。

謝辞

本研究でご指導頂いている、横浜国大名誉教授 土肥 康孝氏、梶原技術事務所 梶原 景範氏、プサイ 藤野 勝氏および本研究に参加している研究員諸氏に深謝する。なお、本研究は、(独) 情報通信研究機構の研究助成による。

参考文献

- [1] 朝日新聞夕刊,「生物学は必修だ(米国の大学で試み広がる)」1998年9月25日付
- [2] 鈴木直樹, 服部麻木, 江積剛, 熊野宣弘, 池本明夫, 足立吉隆, 高津光洋, 「触覚を伴った手術作業が可能なバーチャル手術システムの開発」, 日本VR学会論文誌, 3-4(1998), pp.237-243
- [3] 山内康司, 山下樹里, 持丸正明, 福井幸男, 横山和則, 「内視鏡下副鼻腔手術のためのナビゲーションシステムにおける操作性の比較評価」, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.3 No.4 pp.221-227 (1998)
- [4] 向井信彦, 原田雅之, 室井克信, 宮本裕仁, 浦谷明宏, 矢野徹: 「PC ベースリアルタイム手術シミュレータの開発」, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-D-II, No.6, pp.1213-1221 (平成 13 年 6 月)
- [5] 黒田知宏, 原田雅之, 寺田尚史, 小山博史, 「共有 VR 型手術シミュレータの医学体験教育への適用」, VR 医学, Vol.3, No.1, pp.38-43, 2004
- [6] 山村直人, 姫野龍太郎, 牧野内昭武, 「カテーテルシミュレータの開発」-ガイドワイヤーのシミュレーションに関する検討-, 理研シンポジウム「生体力学シミュレーション研究」予稿集 6-2, pp.785-788, 2003
- [7] M. Sagar, D. Bullivant, G. Mallions, P. Hunter, A Virtual Environment and Model of the Eye for Surgical Simulation, SIGGRAPH 94, July, 1994, pp.205-212
- [8] K.H. Hohne, B. Pflesser, A. Pommert, M. Riemer, T. Schiemann, R. Scubert, U. Tiede, "A 'Virtual body' model for surgical Education and rehearsal", IEEE Computer 29(1):、1996, pp.25-31
- [9] S. Gibson, C. Fyock, E. Grimson, T. Kanade, R. Kikinis, H. Lauer, N. McKenzie, "Simulating Surgery Using Volumetric Object Representations, Real-time Volume Rendering, and Haptic Feedback", Medical Image Analysis, 2 (2), 1998, pp. 121-132.
- [10] M. Nakao, T. Kuroda, M. Komon, H. Oyama, "Evaluation and User Study of Haptic Simulation for Learning Palpation in Cardiovascular Surgery", ICAT 2003, pp.203-208
- [11] M. Ogata, K. Kajihara, T. Kikukawa, T. Terada, "An Evaluation of Communications Cost for Simultaneous Processing with Simulation and Visualization using an Image-Composition Device", HPSC 2006, pp.63-70.

