

平成 21 年 5 月 16 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19500112
 研究課題名（和文） 手術シミュレータを対象とした血管の変形と出血の同時処理における高速化に関する研究
 研究課題名（英文） Fast Algorithm on Simultaneous Process of Blood Vessel Deformation and Bleeding for Surgical Simulators
 研究代表者
 向井 信彦（MUKAI NOBUHIKO）
 武蔵工業大学・知識工学部・教授
 研究者番号：20350233

研究成果の概要：

本研究では、血管の変形と血管を傷つけた際に発生する出血を同時に実現して性能評価を行うと共に、単体の計算機だけではなく複数の計算機をネットワーク結合した手術シミュレータシステムを構築して、処理の高速化に関する検討を行った。さらに、従来の血管モデルでは血管径を一定とした変形にしか対応できないため、血管径の変化も考慮したモデルを考案し、大動脈手術のような血管そのものの手術にも対応できるモデルと変形手法を構築した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,400,000	420,000	1,820,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：バーチャルリアリティ、シミュレーション工学、医療・福祉、可視化、情報システム

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、コンピュータグラフィックスやバーチャルリアリティ技術を利用した様々なシステムが開発されており、医療分野での利用も盛んに行われている。手術シミュレータもその一つであり、コンピュータグラフィックスを用いて構築した仮想人体を対象に、ハプティックデバイスと呼ばれる装置を用いることにより、実手術と同じ体験ができる医用システムである。既に様々な研究機関が数

多くの手術シミュレータを開発しており、脳、目、鼻、歯、心臓、肺、肝臓、骨などの部位における手術練習が可能となりつつある。例えば、京都大学医学部附属病院では、心臓の拍動を実現したり、様々な臓器に適用できるライブラリの整備を行ったりしている。あるいは、東京慈恵会医科大学では、肝臓の手術練習を遠隔操作で行ったり、大画面で立体視することにより実手術に近い仮想手術環境を提供したりしている。さらに、名古屋大学

では仮想内視鏡の研究を、大阪大学では股関節手術の術前計画が行える実用システムを開発している。

(2) 一方、人間の体には数多くの血管があり、全ての部位における手術に対して血管の処理は必ず必要となる。つまり、血管を切断した際に生ずる出血や、血管を切断しないように血管を変形させる処理などは手術シミュレータにとって必要不可欠である。しかしながら、現在様々な研究機関で研究開発されている手術シミュレータは特定部位のシミュレータであり、全ての手術シミュレータに共通する血管の変形と出血に関する研究例は少ない。そこで、我々は他の研究機関では研究が進められていない血管の変形と出血についての研究を行うことにより、研究の成果を他のシミュレータに組み込み、さらに高度なシステムへと発展させるという研究構想を持っている。

(3) この研究構想を実現するために、主として眼科用と脳神経外科用の2つの手術シミュレータを構築してきた。この中で眼科用手術シミュレータでは、黄斑前膜症と加齢変性黄斑症という網膜に関する手術練習を、一方、脳神経外科用手術シミュレータでは、クモ膜下出血などの原因となる脳動脈瘤のクリップ手術に関する手術練習を実現してきた。但し、眼科用手術シミュレータでは血管の変形は考慮せず、2次元的な円盤を描くことにより出血表現の研究を、また、脳神経外科手術シミュレータでは出血を考慮せず、血管変形の研究を行ってきた。

(4) 従来の研究成果を考慮し、新たな手術シミュレータの研究開発に際しては、まず、体内に多数存在する血管の高速変形に主眼をおいて研究することにした。計算量を削減するために、一般的に用いられている有限要素法ではなく、敢えて質点バネモデルを用いて高速化を図った。しかしながら、計算の高速化を図るために質点数を削減すると安定的な変形が行えなくなる。そこで、高速かつ安定的な血管の変形を行うために、必要最小限の質点を追加する手法を考案した。また、眼科用手術シミュレータで実現したような、2次元的な円盤による出血表現ではなく、血液を構成する数多くの粒子を考慮した3次元的な出血表現を、流体力学の手法を適用することにより実現した。この場合も高速化を図るためには粒子数を削減する必要があるが、粒子数を削減すると血液の滑らかな表現が

困難となる。そこで、コンピュータグラフィックスで用いられているZバッファと呼ばれる奥行き情報を格納するバッファを利用することにより滑らかな血液面の生成手法を考案した。

2. 研究の目的

(1) 現在までの研究成果により、血管の変形に関しては、最小限の質点数を用いることにより高速で、かつ安定的な血管の変形手法を構築することができた。また、出血に関しては、高速化のために少ない粒子数を用いても滑らかな血液面を高速に生成する手法を考案し、血管の変形と出血に関しては、それぞれ単独で、一定の成果をあげることができた。しかしながら、血管の変形と出血を同時に行う処理についての研究は未だ行っていないため、各部位対応の手術シミュレータを考えた場合、手術の練習として十分な応答性が確保できるのか、あるいは、実際の手術において存在する多数の血管を変形させた場合、リアルタイムな応答性を保証することができるのかを、本研究で行う必要がある。

(2) また、最新の計算機環境を用いたとしても十分な性能が得られない場合、複数のコンピュータをネットワーク接続して、分散処理を行うことにより高速化を検討する必要がある。さらに、現在における血管の変形は血管の中心線を軸としたボーンモデルを用いているため、血管径が変化しないという条件での変形となり、血管径の変化には対応することができない。

(3) そこで本研究では、血管の変形と血管を傷つけた際に発生する出血を同時に実現し、性能評価を行うと共に、単体の計算機だけではなく、ネットワーク化されたシステムを導入することにより、高速化処理の方式を提案する。さらに、従来の血管モデルでは血管径を一定とした変形にしか対応できないため、血管径の変化も考慮したモデルを考案し、大動脈手術のような、血管そのものの手術にも対応可能なモデルの構築を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 本研究は従来研究における成果を基に行う必要がある。特に、血管の変形と出血に関しては、単独での研究を進めてきたので、各研究の成果を組合せて、血管の変形と出血に関する同時処理を実現する必要がある。また、本研究の目的は手術シミュレータを対象としているため、手術シミュレータとして要求

されているリアルタイム応答を実現しなければならない。そのため、研究の第1段階として、

「血管変形と出血の同時処理における性能評価」

を行った。血管変形や出血の方式を再検討することにより、高速化は達成できたものの、一般的なPCを用いた場合に十分な応答性能が確保できないことも判った。そこで、高速化の手段として、複数のPCをネットワーク結合したシステムを構築し、ネットワーク化システムにおける性能評価を行うこととした。

(2) そこで次の方法として、

「ネットワーク化手術シミュレータシステムの構築」

を行った。複数のPCを対象とし、クライアント/サーバ方式を用いてネットワーク化手術シミュレータシステムを構築することにより、通信性能などが明らかになった。また、複数人の医師による血管変形が可能であることから、複数人での血管変形方式についても検討した。

(3) 上記方法で血管の変形と出血の同時処理における高速化に関しては一定の成果を上げることができた。しかしながら、上記手法では血管の変形は可能であるが、血管モデルは血管の中心線を軸としたボーンモデルであるため、血管径は変化しない。そこで、血管径の変化も考慮した血管モデルを考案した。但し、従来手法をそのまま適用すると血管径の変化は可能となっても、血管の体積が一定に保たれないという結果になる。そこで、血管の体積を一定に保ったまま、血管径の変化が可能なる、

「血管径を考慮した血管の変形方式」

について検討することにした。研究成果については、各項目に分けて記述する。

4. 研究成果

(1) 血管変形と出血の同時処理における性能評価

従来研究における出血表現の結果を図1に示す。図1に示すように、出血の初期段階では出血の飛沫を表現するために、粒子をそのまま描画するが、出血後、血溜まりが生成

されるため血液面の生成処理を施す。但し、血液面（血液粒子を包含する包絡面）の生成処理は粒子数と包絡面の解像度（メッシュ分割数）に依存し、粒子数に対して2乗に比例した処理時間を要する。そこで、本研究では粒子法において最も処理時間を要する、粒子探索の手法を工夫することにより、包絡面生成処理の高速化を図った。性能評価結果を図2に示す。

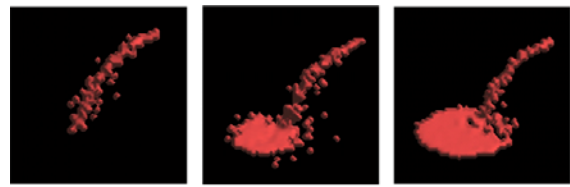


図1 出血表現

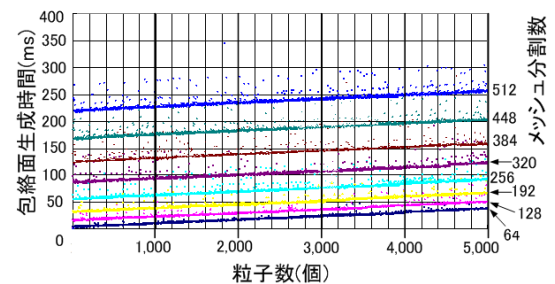


図2 粒子数と包絡面生成時間の関係

図2より、包絡面生成時間は粒子数に対し、線形に変化していることが判る。本手法により大幅な性能向上を実現することができた。しかしながら、手術シミュレータではリアルタイム応答が要求されるため、図2から判断すると33ms以内で包絡面を生成するためには、粒子数を500程度に抑えなければならない。さらに、メッシュ分割数も64程度に抑える必要がある。但し、メッシュ分割数を64に抑えると、血液面の表現が非常に粗くなるため、今回は血液面を生成せずに、血管の変形と出血の同時処理をシミュレーションした。その結果を図3に示す。図3は質点数20、粒子数500の結果である。

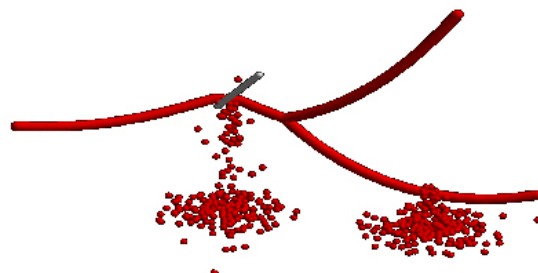


図3 血管の変形と出血の同時処理

(2) ネットワーク化手術シミュレータシステムの構築

図2の性能評価はPentiumIV 2.2GHzのCPU、512MBの主記憶、NVIDIA GeForce4 Ti 4600のグラフィックスボードを搭載した標準的なPCを用いて行った結果である。従って、スーパーコンピュータなど超高性能の計算機を使用すればリアルタイム処理は可能であるが、スーパーコンピュータは非常に高価であるため、一般に普及させることは困難である。そこで、手術シミュレータをネットワーク結合し、複数の術者が共同で作業するシステムを構築した。

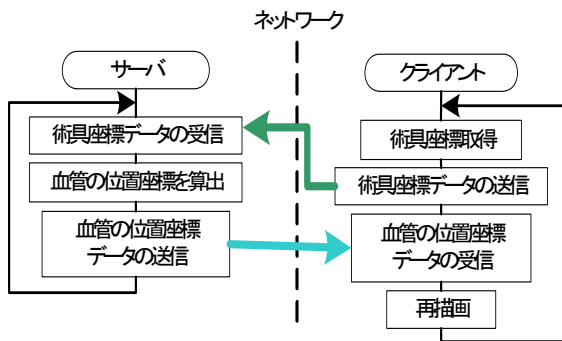


図4 ネットワーク化システムの構成

図4にネットワーク化システムの構成を示す。ネットワーク通信はUDP(User Datagram Protocol)を用いて、クライアント/サーバ方式で実現した。クライアントは複数設定可能であり、サーバのPC上にクライアントを構築することもできる。3台のPCを用いて構築したネットワーク化システムの操作風景を図5に示す。但し、1台はサーバとクライアントが共に搭載されている。



図5 システムの操作風景

次に、図5のシステムに対して性能評価を行った。PCの仕様を表1に、ネットワーク化システムの性能を表2に示す。

表1 PCの仕様

PCNo	CPU		Memory
PC1	Pentium4	1.9GHz	512MB
PC2	Core2 Quad Q9300	2.5GHzx2	4,000MB
PC3	Pentium4	3.0GHz	512MB

表2 ネットワーク化システムの性能 (ms)

Pt	PC1			PC2			PC3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
14	60	18	21	50	10	13	54	14	17
16	69	25	29	59	16	20	62	20	24
18	80	35	39	65	21	25	69	26	30
20	90	42	47	68	23	28	76	31	36
22	---	51	55	75	28	33	88	41	46
24	---	72	76	83	33	40	96	47	53

表1に示すように、仕様の異なる3種類のPCを使用した。PC2が最も高速なPCである。表2はサーバ対応に性能を記述している。最上段のPCにサーバを搭載した場合、各PCに搭載されたクライアントとの通信時間を血管モデルの質点数(Pt)に応じて、ms単位で表記している。例えば、PC1にサーバを搭載し、PC1に搭載されたクライアントとの通信時間は質点数が14の場合60ms、16の場合69msであり、PC2に搭載されたクライアントとの通信時間は質点数14の場合18ms、16の場合25msとなる。最も高速なのはPC2にサーバを搭載した場合で、このとき同じくPC2に搭載されたクライアントとの通信時間は血管を構成する質点数が24でも33msとなり、リアルタイム処理が可能である。また、サーバをPC2に搭載すれば、PC3にクライアントを搭載しても質点数が22までならリアルタイム(33ms)処理が可能となる。本ネットワーク化手術シミュレータシステムは全て同じ処理を施した場合の性能評価であるから、クライアント単位に処理内容を変更すれば、さらなる性能向上が期待できる。

一方、複数人の医師による血管変形が可能のため、血管の複数点に対して同時に力を加えて変形する場合を考える。図6に複数人による血管変形の手順を示す。図6(a)は質点バネで構成された血管の初期状態を示す。(a)の初期状態に対し、質点Aを移動して血管変形を行った結果が図6(b)である。一方、図6(c)は(a)の初期状態に対し、質点Bを移動して血管変形を行った結果である。2人の医師が質点AとBを同時に移動した場合、図6の(b)と(c)の結果を合成する。この結果が図6(d)であり、実物のバネを用いた実験の結果、変形形状が正しいことを確認した。

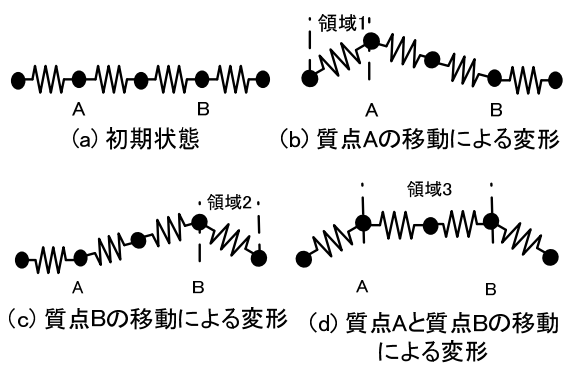


図6 複数人による血管変形の手順

(3) 血管径を考慮した血管の変形方式

最後に、血管径を考慮した血管の変形方式について検討した。血管径を考慮するためには、血管の中心線を軸としたボーンモデルではなく、血管表面にも質点を配置した血管モデルが必要である。本方式で採用した血管表面モデルを図7に示す。

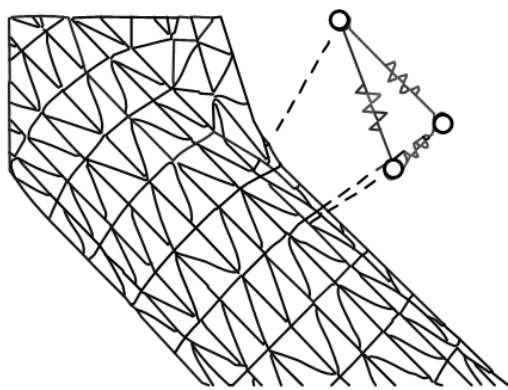


図7 血管表面モデル

図7のモデルを用いれば血管表面の形状変形が可能であり、血管径を考慮した変形が行える。しかしながら、血管表面モデルを構成する質点数は非常に多く、従来手法を適用すると、手術シミュレータ向けリアルタイム応答を実現することは困難である。一方、血管内部には血流が存在するため、この血流を粒子法でモデル化し、シミュレーションすることも可能であるが、出血表現での研究成果より粒子法を用いた手法では高速な変形が期待できない。そこで、血管内部には理想気体が充満していると考え、理想気体の状態方程式を解くことにより、血管の体積を保存したまま、血管径を考慮した変形を行う。内部圧力を考慮した血管の変形アルゴリズムを図8に示す。

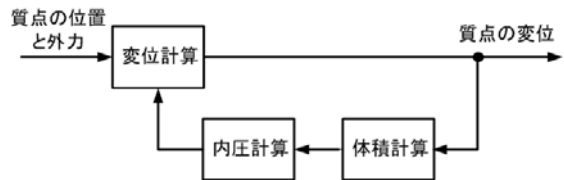
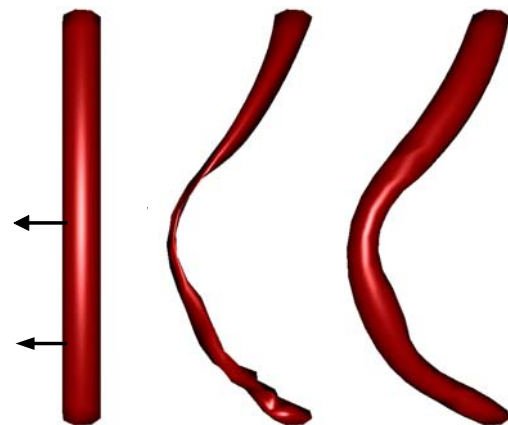


図8 内部圧力を考慮した血管の変形

図8は質点の変位を基に血管の体積計算を行い、変化した体積から内部圧力を計算して再度、血管を構成する質点の変位計算を行うという繰り返し処理である。繰り返し回数に応じて処理時間はかかるが、シミュレーションの結果、1回の繰り返しで血管径はほぼ収束することが判った。本手法を用いた血管変形の結果を図9に示す。図9(a)は初期形状であり、血管径が一定で直線形状にある一本の血管の端点を固定し、矢印で示す2ヶ所を引っ張る。図9(b)は本手法による体積補正を施さない場合の結果である。外部からの力で血管が引っ張られたため、血管形状が変形するだけでなく、血管径も変化している。しかしながら、体積補正を施していないため、引っ張られた部分が極端に細くなり、体積が一定に保たれていない。通常は、血管内部にある血流により、体積はほぼ一定に保たれるはずである。図9(c)は本手法による体積補正を施した結果である。外部力による血管変形だけでなく、血管径も変化しているが、血管内部の体積は一定に保たれているため、血管は極端に細くなっていない。本手法は血流を粒子法によりミクロ的に解くのではなく、理想気体の状態方程式を用いてマクロ的に解くことにより高速処理を実現している。血管の変形処理時間は約0.8msであり、他の処理を合わせても充分、リアルタイム処理が可能である。



(a) 初期形状 (b) 体積補正無 (c) 体積補正有

図9 血管の変形結果

(4) 本研究では、手術シミュレータを対象とした血管の変形と出血の同時処理における高速化を行うために、最初に、従来研究の成果を用いて、血管変形と出血の同時処理に対する性能測定を行った。この結果、血管の変形と出血をリアルタイムに行うための、血管モデルの質点数や粒子法に基づく粒子数を算出することができた。同時に、安定的な血管の変形手法や、出血表現の高速化を検討したものの、一般的な PC を用いると、手術シミュレータとして十分な性能を得ることができないことが判った。そこで次に、複数の PC をネットワーク結合した手術シミュレータシステムを構築し、性能測定を行った。ネットワーク化システムは複数台の PC を用いることにより、複数のクライアントが同時に実行される。このため、複数人の医師による血管の同時変形についても検討した。最後に、本研究における血管モデルは血管の中心線を軸としたボーンモデルであるため、基本的には血管径が変化しない。そこで、血管の中心だけでなく、血管の表面にも質点とバネを配置したモデルを用いて、血管径の変化を伴う血管の変形を検討した。但し、従来手法をそのまま適用すると血管径は変化するが、血管の体積が保存されず、血管径が極端に細くなる部分が生ずる。そこで、血管内には理想気体が充満しているものと考えて、理想気体の状態方程式を解くことにより、血管径の変化を考慮した高速な血管の変形手法を考案した。

従来の手術シミュレータでは、脳や心臓のような主となる臓器を対象としていたのに対し、本研究は血管の変形と出血という全ての手術シミュレータに共通の課題を扱うために、その成果は様々な手術シミュレータに適用可能である。また、血管の変形と出血だけでなく、血管径の変化についても考慮した。これは、血管内における血流を粒子法によりミクロ的に解くのではなく、理想気体の状態方程式を用いてマクロ的に解法することにより、血管の体積を保存したまま血管径の変化を高速に行うことが可能となった。この結果、全ての部位に共通となる血管の変形と出血の表現だけでなく、血管そのものが手術の対象となる大動脈手術への適用も可能となった。

今後は、大動脈手術にも適用可能となるように、血管の正確でかつ高速な変形方式とネットワーク化による分散処理環境での性能測定を行い、さらに現実的で応答性能の高い手術シミュレータを構築する予定である。また、実患者を対象とした医療データを基に、

手術の術前計画ができるシステムの構築についても検討する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 中川真志、向井信彦、小杉信、内部圧力を考慮した血管の高速変形手法、映像情報メディア学会誌、Vol.63、No.3、371-375、平成 21 年(2009 年)3 月、査読有

[学会発表] (計 5 件)

- ① 大縄嵩、中川真志、向井信彦、小杉信、血管変形を対象としたネットワーク化手術シミュレータ、映像情報メディア学会研究会、Vol. 33、No. 14、1-4、平成 21 年(2009 年)3 月、東京、査読無
- ② 中川真志、向井信彦、小杉信、内部圧力とエネルギー保存に基づいた血管の変形、計測自動制御学会学術講演会、SI2008、625-626、平成 20 年(2008 年)12 月、岐阜、査読無
- ③ N. Mukai, R. Sato, M. Nakagawa, M. Kosugi, A Networked Surgical Simulator System for Cooperative Surgery, SMIT(Society for Medical Innovation and Technology), SMIT2008, 179-184, August, 2008, Vienna, Austria, 査読有
- ④ N. Mukai, M. Nakagawa, M. Kosugi, Real-time Blood Vessel Deformation with Bleeding Based on Particle Method, MMVR(Medicine Meets Virtual Reality), MMVR2008, 313-315, Jan. 2008, California, USA, 査読有
- ⑤ 中川真志、向井信彦、小杉信、気体の状態方程式を基にした血管径の変形手法、計測自動制御学会学術講演会、SI2007、1168-1169、平成 19 年(2007 年)12 月、広島、査読無

6. 研究組織

(1) 研究代表者

向井 信彦 (MUKAI NOBUHIKO)
武蔵工業大学・知識工学部・教授
研究者番号：20350233

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

中川 真志 (NAKAGAWA MASASHI)
武蔵工業大学大学院・工学研究科・博士前期課程