

バーチャルリアリティのためのモデリング

長谷川 晶一*

1. はじめに

ディスプレイ・インタフェースの研究が進み、表現力が増すにつれて、バーチャルリアリティの中身であるバーチャル世界のモデリングの重要性が改めて認識されてきている。本稿では、バーチャルリアリティのためのモデリングとその特徴について解説し、レンダリング、シミュレーションの手法とともに概要と最近の研究を紹介する。

1.1 モデリングとバーチャルリアリティ

モデルとは、物や現象のある側面、一つの解釈を表現したものであり、物や現象が持つ情報の一部だけを持つ。たとえば力学モデルは、質量や跳ね返り係数といった情報を持つが、物の色、匂いのような情報は切り捨ててしまう。もとより、物が持つ情報すべてを記述することはできない。たとえば積み木一つを例にとっても、構成する分子の種類、位置、速度など膨大な情報を持つが、これらをすべて計測することはできない。そのため、物から情報を得るためには何らかのモデル化、モデリングをすることになる。

バーチャルリアリティは、体験者の行動に応じて映像や音などの刺激を感覚に提示することで、体験者に実質的に実世界と同等の体験をさせることをめざす。そのために、実質的な実世界のモデル（＝バーチャル世界）を計算機に保持しておき、体験者の行動に応じてディスプレイ・インタフェースを介して体験者に提示する。このように、バーチャルリアリティでは、計算機の中に体験者に提示するためのバーチャル世界を構築するために、モデリングを行う。

1.2 バーチャルリアリティのためのモデリング

1.1節で述べたとおり、モデルは物や現象のある側面を表現したものであり一部の情報だけを持つ。バーチャルリアリティは、体験者に実質的に実世界と同様

の体験をさせることを目的とするため、体験者の感覚の特性や体験内容を考慮して必要な情報をモデリングする。たとえば、物の色は、波長ごとの反射率の違いによりものだが、人間は光のスペクトルを赤緑青に対応する3種類の錐体でとらえるため、対応する3つの反射強度だけのモデルで済ませることができる。物体の反射スペクトル全体のモデルは必要ない。

また、体験内容はバーチャルリアリティを用いる目的・用途によって異なるため、これらによって必要なモデリングの範囲を絞ることができる。たとえば、都市景観の体験を目的としたバーチャルリアリティシステムであれば、建物や遠くの山や空の色のモデリングは重要になるが、街を歩く人に話しかけた時の反応のモデリングは不用であろうし、街の人々のモデリングを省略するかもしれない。しかし、もし目的が外国の習慣の学習であれば、人々の反応のモデリングが重要になる。

このように何がバーチャル（＝実質的）であるかということとは、人間の感覚特性に加えて、バーチャルリアリティ世界で何を行うかにも大きく依存する。用途を決めずに何でもできるバーチャル世界を構築することは一つの夢ではあるが、人工知能で言うフレーム問題にぶつかることになってしまい、いくらやってもモデリングし尽くせないということになる。

1.3 レンダリング、シミュレーションとモデリング

体験者にバーチャル世界を提示するためには、モデリングしたバーチャル世界の情報をディスプレイ・インタフェースの駆動に適した形式に変換する必要がある。この変換をレンダリングと呼ぶ。レンダリングは体験者の行動に応じてリアルタイムに行わなければならないので、レンダリングに適した形式でモデリングしておくことが求められる。また、バーチャル世界は、時間の経過や体験者の操作によって変化する。このため変化のモデリングが必要となり、計算機が保持している情報を時間経過や体験者の操作に応じて更新すること＝リアルタイムシミュレーションが必要となる。

† Modeling for virtual reality
Shoichi HASEGAWA

* 電気通信大学
The University of Electro-Communications

1.4 モデルの汎用性と計算量のトレードオフ

初期のバーチャルリアリティでは、計算機が遅く、レンダリングで複雑な処理を行うことができなかったため、提示する情報に近い形式のモデルを用いた。たとえば、1978年に作られた観光地紹介のためのウォークスルーシステムAspen Moviemapでは、様々な視点から見たの街の画像を大量に用意しておき、体験者の視点に合わせて画像を切り替えることで映像を提示していた。確かにこの手法でも高品質な映像を作り出すことはできるが、体験者は用意された視点だけしか移動できず、街の中を自由に歩きまわることができなくなってしまう。一方、3次元コンピュータグラフィックスを用いて建物の形状や色の情報をもとに画像をレンダリングすれば、視点を自由に移動させることができる。

これは、シミュレーションについても言えることで、たとえば、2次元の水面のモデルは、波が低い状況だけしか扱えないが計算量は少ない。一方、3次元の流体モデルを解けば水しぶきなども扱うこともできるが、リアルタイム計算は難しくなる。

このように、モデルの汎用性とレンダリングに必要な計算量はトレードオフになることが多く、モデリングとレンダリングの形式を設計では、実世界での現象と人間の感覚の特性、レンダリングのアルゴリズムと計算機の特性を考えて、最適なバランスを探ることが必要となる。

以下では、視覚ディスプレイ、力覚インタフェースのためのレンダリング手法、剛体・柔軟体・流体のシミュレーションの手法について、概要と最近の研究を紹介する。

2. レンダリングとモデリング

レンダリングは感覚特性に大きく依存する。本節では、視覚、力覚のためのレンダリング手法を見ながらそれぞれに適したモデルを紹介する。

2.1 視覚のためのレンダリング

光源からの光が物体に反射して眼球に入り網膜に結像すると視覚はその像をとらえる。視覚ディスプレイは、物体から視覚に向かう光線を再現する装置なので、ディスプレイから先がモデリングとレンダリングを行う範囲になる(図1)。

3次元コンピュータグラフィックスは、光源と物体の形状と材質の情報をもとに、任意の視点から観察した場合にディスプレイに提示すべき映像を生成する手法であり、しばしば視覚レンダリングに用いられる。

3次元コンピュータグラフィックスでは、物体形状

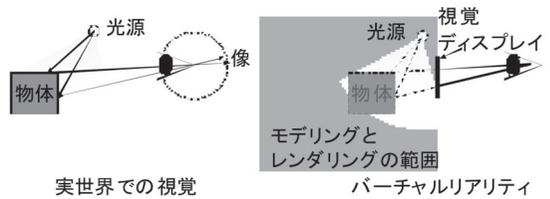


図1 視覚とモデリング・レンダリング

を、物体表面を三角形で覆う三角形メッシュという形式で表現することが多い。これは、三角形の描画を繰り返すだけで形状の描画ができるため、処理が単純で高速化しやすいためである。CTやMRIのデータのように物体表面だけでなく内部の様子を観察することが重要な場合には、3次元のビットマップであるVoxel形式でモデルを持ち、Voxelをレンダリングして視点に応じた映像を生成することもある[1]。

物体の色は、初期には入射光と視点の向きの簡単な関数でモデリングされていた。物体表面の反射率を2次元ビットマップで表し三角形に張りこむテクスチャマッピングが使われるようになり、自由に色付けした物体が表現できるようになると、3次元コンピュータグラフィックスが本格的に利用されるようになった。

近年では、物体表面の各点について、入射光の向きごとの反射率(BRDF)や、周囲の光源や物体の表面での反射光を合わせた光の強度(PRT)を保持しておくことで、物体の材質感や周囲の物体の影響を含めたリアルな映像をレンダリングできるようになっている[2]。

さらに、光が内部に侵入してから拡散する現象(サブサーフェイスキャタリング)をモデリングして透明感を表現したり[3]、光の波長以下の微細な構造による光の干渉をモデリングすることで、コンパクトディスクの虹色や蝶のリン粉の色を表現したりすることもなされており[4]、これらをリアルタイム化する研究[5]も進められている。光と物体による反射・屈折をより詳細にモデリングすれば、視点に応じて正確なレンダリングができるが、モデルの情報量とレンダリングの計算量が増すことになる。

2.2 力覚のためのレンダリング

テレオペレーションから始まった力フィードバックは、バーチャルリアリティにも利用されるようになり、手に力を返すことでバーチャル世界の物体に触れた感覚を再現する力覚インタフェースが開発、利用されている[6][7]。近年では、物体に触れたり物体をなぞったりするときに手に加わる振動が、材質感の認識に寄与していることがわかり、振動を再現して材質感

を提示することも研究されている[8][9]。また、手の皮膚を細かく刺激することで、物に触れた時の皮膚感覚の再現する分布触覚ディスプレイも研究されている[10]。

2.2.1 形状の提示と制御手法

力覚インタフェースは、体験者の手がバーチャル世界で物体内部に侵入することを防ぐことで物体形状を提示する。侵入を防ぐための方策には、押し戻す力を手に加える方法と、インタフェースを位置制御し、侵入が起こらない場合のみ体験者が加える力に応じて位置を動かす方法があり、それぞれインピーダンス型、アドミタンス型力覚インタフェースと呼ばれる(図2)。両者のレンダリングは一見別々の物に見えるが、実は同様の計算をすることになる。

インピーダンス型インタフェースの提示力は、侵入を押し戻す力なので、まず、力覚ポインタを戻す目標位置を求める必要がある。目標位置が求めれば現在のポインタの位置と目標位置の間にバネダンパモデルを考えて提示力を計算できる。もう一方のアドミタンス型インタフェースでも目標位置を求める部分は共通である。アドミタンス型では、手からインタフェースに加わった力を考慮して目標位置を調節する点と目標位置を直接インタフェースに与える点が異なるが、物体に侵入しないような目標位置を求める部分は変わらない。目標位置を考え、現在位置との間にバネダンパを仮定して提示力を計算する手法は、God Object[11]、Proxy[12]、Virtual Coupling[13]などと呼ばれている。これらは考え方が若干異なるが、本質的には同じものである。菊植ら[14]は、これらを統一的に記述し、力覚インタフェースの種類にかかわらず共通の目標位置計算を利用できる手法を提案している。

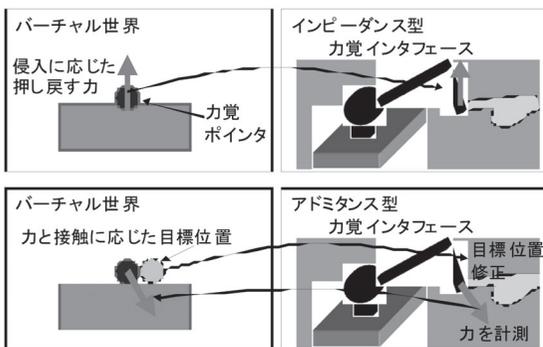


図2 力覚インタフェースによる形状提示

2.2.2 物体形状のモデリング

力覚インタフェースを用いたシステムでは、計算を簡単にするため、体験者の手を球などの単純な形状の力覚ポインタとして表現するケースが多い。一方、物体形状は、侵入距離が計算しやすい球や直方体などのプリミティブの組み合わせで表現するのが簡単だが、様々な形状を表現するために三角形メッシュを用いる手法[12]や、複雑な形状の力覚ポインタで対象を削る作業を実現するために対象をVoxelで、ポインタを形状表面に等間隔に用意した点の集合として表す手法[15]も提案されている。また、凸多面体同士の接触計算は高速化できるため、これをポインタと物体双方の形状に用いることもできる[16]。

2.2.3 物体の運動と物理パラメータの提示

体験者がバーチャル世界の物体に触れたとき、力覚インタフェースを介して提示される力の反作用が物体に加わるはずである。バーチャル世界の物体を運動の法則に従って動かすと、実世界と同様に物体が動き、自然な物体操作が実現できる[16]。体験者は物体に加わる重力や物体を加速する際の慣性を感じることができ、物体の重さなどの物理パラメータを知覚できる。

2.2.4 力覚提示と更新周期

なめらかな動画像を提示するためには、映像を60Hz~120Hz程度で更新すれば十分だとされている。しかし、力覚インタフェースで形状を提示するためには、300Hz~1kHzの更新が必要となる[17]。また、10kHz程度で更新することでより精細な力覚が提示できる[18]ことが分かっている。これは、人間の力触覚が視覚に比べて高周波の刺激にも反応すること、力覚インタフェース機構を安定に制御する必要があるためだと考えられる。更新周期に比例して計算時間も短くなるため、力触覚のレンダリングは非常に高速におこなう必要がある。

幸い、力触覚では接触しない物体は無視できるので、力覚ポインタ近傍の物体だけを考慮することで、計算量を減らすことができる。そこで、バーチャル世界全体から力覚ポインタ近傍の物体形状を抽出する処理を低速更新で行い、抽出した形状を高速に力覚レンダリングする手法が提案されている[19][20]。

2.3 感覚と滑らかさ

モデリングはどうしても誤差を含むが、レンダリングの高速化やメモリの節約のためにモデルの情報量を減らそうと思うと、誤差が大きくなることが多い。このようなときに、滑らかさを保つことが1つの指標に

なると筆者は考えている。

例えば、3次元コンピュータグラフィックスでは、ディスプレイに表示される物体の色は、物体の材質、光の向き、面の法線によって決まる。物体形状を三角形メッシュで表現する場合、三角形の境界で法線が突然変わるため色の境界が目立ってしまう。人間の感覚は変化に敏感なので、モデリングの誤差で本来なめらかな物体にこのような境目が生じてしまうと非常に不自然に感じられる。これを解消するため、三角形の頂点に法線を持たせ、面内部の色は、頂点の法線を補間したベクトルを利用して計算するフォンシェーディングが利用されている。三角形メッシュモデルを力覚提示のための形状モデルとして用いる場合、力覚でも同じことが起こる。これも視覚同様に面の法線を補間して提示力を計算することで自然に面を提示できる[12]。

また、ポインタ近傍の形状を抽出して高速に力覚レンダリングをおこなう場合にも、形状が更新されるときに、提示形状が突然変化することがないように注意する必要がある。たとえば、[20]では、現在提示している形状と更新された形状を補間するなどして急激な変化が起こらないようにしている。

光源や物体表面の反射率の精密なモデルであるPRTやBRDFの情報は半球面に張り付けたテクスチャの形式で得ることができるが、物体の姿勢ごとにテクスチャが必要となるため情報量が多く問題になる。そこで、これらの情報を圧縮する手法が提案されている[21]。この手法では、球面調和関数というなめらかな関数の重ね合わせとしてモデル化することで、滑らかさを保っている。

このような感覚特性を考慮したモデリングは、バーチャルリアリティならではの部分であり、工夫のし甲斐もある面白い部分だと思う。

3. シミュレーションとモデル

初期のバーチャルリアリティシステムでは、体験者の操作を反映させるために、バーチャルリアリティ世界の物体一つ一つについて体験者が操作した場合の動作をプログラムに作りこんでいた。しかしこれでは、体験者が取り得る行動のバリエーションを増やすためには、膨大な作りこみが必要になってしまう。また、物体に自然でリアルな動作をさせるためにも手間がかかる。3次元コンピュータグラフィックスを用いずに、2次元画像を切り替えて映像を作り出す手法と似た状況である。

3次元コンピュータグラフィックスが、画像の元となる物体と光をモデリングしているのと同様に、動き

の元をモデリングできれば、様々な運動が生成できると考えられる。実世界の物体は物理法則に従って運動するので、物理法則は運動の元だといえる。そのため、物理法則をモデリングすれば一計算機が物体の物理パラメータを持ち、物理法則のシミュレーションによって更新すれば一実世界と同様の動作が生成できる。物理法則は共通なので、物理モデルはバーチャルリアリティ世界全体の動作を自然でリアルにする。このため、計算機が高速化するにつれて、物理法則のリアルタイムシミュレーションが盛んに研究されるようになった。

ところで、シミュレーションではレンダリングほどには、感覚特性に合わせたモデリングを必要としない。物体の運動は、視覚でも力覚でもとらえることができるからかもしれない。一方、シミュレーションでは体験者が取り得る行動や入力範囲によってモデリングすべき現象の範囲が変わる。このため、バーチャルリアリティシステムの用途に応じたシミュレーション、モデリングが必要となる。

以下では、剛体・変形する物体・流体の運動のシミュレーション手法を紹介する。

3.1 剛体のシミュレーション

組立作業やスポーツのように物体を動かす作業をバーチャルリアリティ世界で行うためには、物体の運動をモデル化する必要がある。剛体は、変形しない物体の物理モデルだが、物体を変形しないとしてモデリングしても差し支えないことが多い。このため、バーチャル世界を多数の剛体としてモデリングできることが多く、特に盛んに研究されてきた。

物体の運動は、物体に働く力とその作用点に分かれれば、剛体の運動方程式を差分化した運動量、角運動量の更新式を計算することで、物体の位置、姿勢、速度を更新できる。物体に働く力にはいくつかの種類があるが、重力、バネによる力、動摩擦力など、場の力や物体の位置・速度によって決まる力は簡単な計算で求まる。しかし、抗力や静止摩擦力など複数物体の位置関係を部分的に拘束する力(拘束力)は、その値ではな

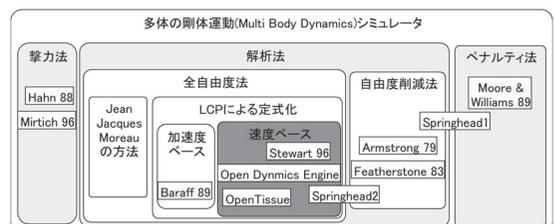


図3 拘束力計算法による物理シミュレータの分類

く、拘束の条件を満たすような力として与えられ、簡単には求まらない。このため、剛体のシミュレーションでは拘束力を求めることが主な仕事となりその手法で分類できる。図3に物理シミュレータの分類を示す。

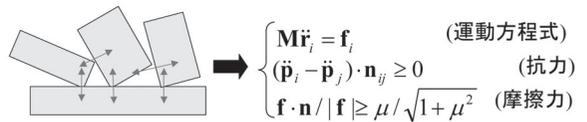


図5 拘束力の条件

3.1.1 ペナルティ法による拘束力の計算

ペナルティ法は、拘束力を直接計算せずに拘束条件を違反すると違反の量(ペナルティ)に応じた力を求め、これを拘束力の代わりに物体に加える方法である。例えば、物体間に働く抗力を求めるためには、2物体の接触点の間にバネダンパモデルを考え、バネダンパモデルが発生する力を抗力として加える(図4)。ペナルティ法では、拘束力はバネダンパモデルの状態からすぐに求まるため、計算量はO(n)と少ない。また、運動方程式と無関係に拘束力が求まるため、力覚ポイントのような質量や慣性モーメントなどの動力学特性が不明なものや物体モデルの間に働く拘束力も計算できる。

しかし、ペナルティ法で求めた拘束力は、拘束条件を満たす力ではなく、シミュレーションを繰り返すうちに条件違反が解消する(と思われる)力であり、ペナルティ量やペナルティ力が収束する保証はない。

バネダンパモデルが収束する範囲は、シミュレーションの更新周期Δtに反比例して狭くなることが知られている。硬いバネダンパモデルを用いて大きなペナルティ力を加えれば、拘束違反量を小さく抑えることができるが、収束させるために、更新周期Δtを十分小さくしなければならなくなる。結果として計算量が多くなるためあまり使われていない。しかし、もともと高速更新が必要な力覚提示には向いている[16]。

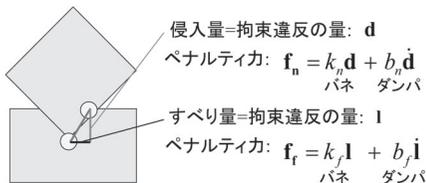


図4 ペナルティ法の拘束力

3.1.2 解析法による拘束力の計算

解析法は、拘束力の条件を図5のように式で表し、運動方程式と連立させて、条件を満たすような拘束力を求める方法である。解析法では、条件式をすべて満たすような拘束力を求める。解析法では、運動方程式と条件式を連立させるため、拘束力に関与している剛体の数が増えるとそれにつれて、連立させる式の数が

増えていく。また、抗力のように条件式が不等式になるものや、摩擦力のように他の拘束力に条件式が依存するものもあるため、計算はあまり簡単ではない。

条件式を正確に解いて拘束力を解くためには、式の数をnとしてO(n³)の計算量が必要になることが知られており、物体を積み上げた場合など多数の物体が接触する場合に多大な計算が必要になる。そのため、多くのシミュレータは繰り返し計算による近似解法を用いて拘束力を解いている。近似解法の計算量は、計算精度・安定性とのトレードオフとなるが、O(n)の計算量で打ち切れることもできる。解析法では、シミュレーションの更新周期Δtによらず、拘束条件を満たす拘束力が計算できるので、更新周期Δtを大きく取り、一定時間のシミュレーションに必要な計算回数を少なく抑えることができる。このため、ゲームのための物理エンジンなど計算量の制約が厳しい用途では解析法が用いられることが多い。

3.2 変形のシミュレーション

物体の変形をシミュレーションするためには、物体をより細かな有限個の要素に分割し、各要素の運動をシミュレーションする有限要素法がしばしば用いられる。有限要素法では、物体を有限個の要素がつながった物としてモデリングする。一つの要素はいくつかの接点と接点を結ぶ辺からなる。接点は位置・速度・質量などを持ち、それらが弾性と粘性を持つ辺で結ばれている(図6)。

物体を構成する全接点についての運動方程式は、各接点の位置を並べたベクトルをr、各接点にかかる外力を並べたベクトルをfとすると、

$$f = Mr + Br + Kr$$

のように書くことができる。ここで、M,B,Kは、質量・粘性、弾性を表す定数行列である。この式を差分

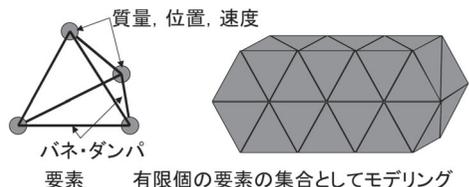


図6 有限要素法の要素とモデル

化して速度の更新式とすれば、変形のシミュレーションを行うことができる。力覚提示のように高速更新が必要な用途ではこれを思い切って簡略化し、 $f=Br+Kr$ として、力覚インタフェースの位置・速度から提示力と変形を計算することも多い[22][23]。この簡略化は動力学特性を無視することになるため、たとえばゼリーがぶるんと震える様子などは再現できない。そこで、あらかじめ振動解析をしておき、振動モードごとの運動方程式のリアルタイムシミュレーションから運動を再現する手法が提案されている[24]。一方、こういった簡略化を行わずに、専用ハードウェアを構築してリアルタイムに大規模な有限要素法をシミュレーションすることも研究されている[25]。

3.3 流体のシミュレーション

水や空気のような流体は、非常に多くの分子から構成されているが、数が多すぎるため分子1つ1つの運動を考えるのではなく、質量や応力が分布する連続体と考える。連続体をモデリングするには、連続体中に周囲の連続体を代表する点を用意し、代表点のパラメータを保持・更新する。

3.3.1 格子法

代表点の位置を固定して流体が存在する空間に整然と配置する方法を格子法と呼ぶ。代表点が移動せず整然と並んでいるので、相互作用の計算を整然と効率よく行うことができる。しかし、水しぶきのように細かな境界がある場合には、格子を水しぶきに対して十分細かくする必要があり、流体の体積が小さい場合にはとくに無駄が多くなってしまふ。また、流体が存在する格子と存在しない格子の境界が離散化による誤差によってぼやけてしまう数値拡散という問題もある。

水面のシミュレーションでは、水面から底までの角柱状の体積を1点で代表させて2次元でシミュレーションを行うことが多い[26]。事前に3次元シミュレーションを行って物体周辺の圧力を記録しておくことでリアルタイムに渦の影響を再現する手法[27]や、リアルタイム計算は難しいが境界面だけを3次元シミュレーションする手法[28]も提案されている。

3.3.2 粒子法

一方、流体とともに移動する代表点を考え、粒子のように一定の質量をもち、位置と速度を持って運動すると考えてモデリングする手法を粒子法と呼ぶ。粒子法では、近傍粒子を探し出す必要があり、粒子同士の相互作用の計算に手間がかかるが、数値拡散により境界がぼやける問題は起こらない。また、流体の体積が

小さければ粒子数も少なくよいため、水しぶきなど少量の流体が広い空間を動き回る場合には効率が良い。Smoothed Particle Hydrodynamics法やこれを改良したMoving Particle Semi-implicit法が知られており、少量の水のリアルタイムシミュレーションにも応用されている[29]。

4. おわりに

本稿では、バーチャルリアリティにおけるモデリングについて概要を説明し最近の研究を紹介した。バーチャルリアリティシステムを見ると、その見た目の特異さ、わかりやすさから、インタフェースやディスプレイの機構・仕組みに目が惹かれ、モデリングのことは忘れがちである。しかし、バーチャルリアリティを実際に役立てるためには、システムが表現するバーチャル世界が応用目的に十分な世界でなければならず、モデリングが重要になる。1.2節で述べたように万能なモデリングというのは難しいので、アプリケーションをよく分析して必要なモデルを検討することになる。このため、モデリングは、バーチャルリアリティシステムを実際に応用しようとするとき、しばしばもっとも手間がかかる部分になる。

モデリングの重要性とインタフェース、アプリケーションとの関係への理解が広まり、本当に役立つバーチャルリアリティシステムが普及することを期待する。

参考文献

- [1] J Wilhelms, A V Gelder, A Coherent Projection Approach for Direct Volume Rendering, Computer Graphics, 35(4), 275-284, July 1991.
- [2] P Sloan, J Kautz, J Snyder, Precomputed Radiance Transfer for Real-Time Rendering in Dynamic, Low-Frequency Lighting Environments, SIGGRAPH 2002.
- [3] H W Jensen, S R Marschner, M Levoy, P Hanrahan, A practical model for subsurface light transport. SIGGRAPH 2001.
- [4] H Hirayama, K Kaneda, H Yamashita, Y Monden, An accurate illumination model for objects coated with multilayer films. Eurographics 2000.
- [5] 佐伯昌彦, 井村誠孝, 安室喜弘, 眞鍋佳嗣, 千原國宏: 光路差に着目した汎用的な構造色レンダリング手法, 映像情報メディア学会誌, Vol.60, No.10, pp.1593-1598.
- [6] T H Massie, J K Salisbury, The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects, Symposium on Haptic Interfaces 1994.
- [7] 佐藤誠, 平田幸広, 河原田弘, 空間インタフェース装置 SPIDAR の提案, 電子情報通信学会 Vol.J74-D2 No.7 pp.887-894.
- [8] A M Okamura, J T Dennerlein and M R Cutkosky,

- Reality-Based Models for Vibration Feedback in Virtual Environments, ASME/IEEE Transactions on Mechatronics, Vol.6, No.3, 2001, pp.245-252.
- [9] 下条誠, 仁木亨, 高速応答が可能な可搬型ハプティクスディスプレイの開発(マルチメディア処理), 電子情報通信学会論文誌 Vol.J87-D-II, No.5, pp.1133-1141.
- [10] 梶本裕之, 川上直樹, 前田太郎, 舘暉: 皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J84-D-II, No.1, pp.120-128, 2001.
- [11] C B Zilles, J K Salisbury, A Constraint-based God-object Method For Haptic Display, Proc. IEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems Human Robot Interaction and Cooperative Robots.
- [12] D C Ruspini, K Kolarov, O Khatib, The haptic display of complex graphical environments, SIGGRAPH 97.
- [13] J E Colgate, P E Grafing, M C Stanley, G Schenkel, Implementation of Stiff Virtual Walls in Force-Reflecting Interfaces, IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, 1993, pp.202-207.
- [14] 菊植亮, 藤本英雄, 幾何学的力覚提示アルゴリズムの力学的解釈とインピーダンス型およびアドミッタンス型の実装法, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.2, pp.142-151, 2007.03.
- [15] W McNeely, K Puterbaugh, J Troy, Six degree-of-freedom haptic rendering using voxel sampling, SIGGRAPH 1999.
- [16] S. Hasegawa, M. Sato, Real-time Rigid Body Simulation for Haptic Interactions Based on Contact Volume of Polygonal Objects, Euro Graphics 2004.
- [17] L. Love, W. Book, Contact Stability Analysis of Virtual Walls, Proc. of Dynamic Systems and Control Division ASME, pp.689-694, 1995.
- [18] 赤羽克仁, 長谷川晶一, 小池康晴, 佐藤誠, 10KHzの更新周波数による高解像度ハプティックレンダリング, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.9 No.3.
- [19] Y. Adachi, T. Kumano, K. Ogino, Intermediate representation for stiff virtual objects, IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, 1995.
- [20] 長谷川晶一, 石井雅博, 小池康晴, 佐藤誠, 動的な仮想世界の力覚提示のためのプロセス間通信, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J82-D-II, No.10, pp.1758-1765, 1999.
- [21] P Gautron, J Krivanek, S Pattanaik, K Bouatouch, A Novel Hemispherical Basis for Accurate and Efficient Rendering, Rendering Techniques, Eurographics Symposium on Rendering 2004.
- [22] J Berkley, G Turkiyyah, D Berg, M Ganter, S Weghorst, Real-Time Finite Element Modeling for Surgery Simulation: An Application to Virtual Suturing. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 10(3), 1-12.
- [23] 黒田嘉宏, 中尾恵, 黒田知宏, 小山博史, 小森優, 松田哲也, 複数臓器間の接触シミュレーションを実現する弾性体間の相互作用モデル, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.8, No.2, pp.155-162, 2003.
- [24] D James, D Pai, DyRT: Dynamic Response Textures for Real Time Deformation Simulation With Graphics Hardware. SIGGRAPH 2002.
- [25] 友國誠至, 平井慎一. FPGAによる仮想レオロジー物体のリアルタイム変形シミュレーション, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.10 (2005), No.3 pp.443-452.
- [26] M. Kass, G. Miller, Rapid, Stable Fluid Dynamics for Computer Graphics, SIGGRAPH 1990.
- [27] Y. Dobashi, S. Hasegawa, M. Kato, M. Sato, T. Yamamoto, T. Nishita, "A Fluid Resistance Map Method for Real-time Haptic Interaction with Fluids, "Proc. ACM Symposium Virtual Reality Software and Technology 2006, pp.91-99.
- [28] G. Irving, E. Guendelman, F. Losasso, R. Fedkiw, Efficient Simulation of Large Bodies of Water by Coupling Two and Three Dimensional Techniques, SIGGRAPH 2006.
- [29] 天田崇, 井村誠孝, 安室喜弘, 眞鍋佳嗣, 千原國宏, 剛体との相互作用を伴う水の実時間アニメーション, 映像情報メディア学会誌, Vol.5, No.10, pp.1488-1493, 2005.

(2006年 月 日 受付)

[問い合わせ先]

〒 - 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1

筑波大学システム情報工学研究科 鬼沢研究室

長谷川 晶一

TEL :

FAX :

E-mail :

— 著者紹介 —



はせがわ しゅんいち
長谷川 晶一 [会員]