

VR から見たスーパーコンピューティング ～仮想世界の法則エンジン～

小木哲朗

通信・放送機構



1. はじめに

近年、パーソナルコンピュータがVRの実用的なレンダリングマシンとして使用されるようになってきた一方で、高性能グラフィックス・ワークステーションはマルチCPUを備える等、スーパーコンピュータ並の演算能力を持つようになってきた。またギガビットネットワーク等の高速ネットワーク環境の整備は、スーパーコンピュータ・センターとVR装置を専用回線で接続する等、新しいタイプのシミュレーション環境を構築している。そのため、従来はかなり異なる計算機の利用技術であったVRとスーパーコンピューティングが、ここ数年大きく融合を始めている。

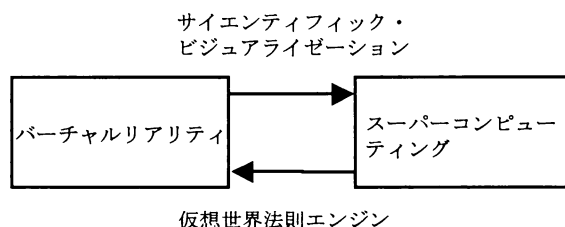


図1 VRとスーパーコンピューティングの融合

VRとスーパーコンピューティングの融合は、図1に示すように、現在大きく分けて2つのアプローチが存在する。1つは数値解析等のスーパーコンピューティングの立場からVRを利用する場合であり、サイエンティフィック・ビジュアライゼーション等の研究がこの分野の代表として挙げられる。またもう1つのアプローチは、VRの立

場からスーパーコンピュータの演算能力を利用する場合であり、仮想世界における法則エンジン等の利用がこれにあたる。

前者に関する議論は他稿に譲るとして、本稿では後者の立場から、筆者等の研究事例をまじえて、VRとスーパーコンピューティングの融合技術に関して概観する。

2. 法則エンジンとしてのスーパーコンピューティング

VRにおけるリアリティを高めるためには、映像や音響による臨場感だけではなく、仮想世界の法則に関する再現性が大きな影響を与える。例えば、仮想世界の中で物体を投げると運動法則に従って飛んで行ったり、柔らかい物体に力を加えると弾性に従った変形をするといった挙動が、現実世界と同様に再現されることである。インタラクティブなシミュレーションを基本とするVRでは、特に、このような法則に従った挙動が、リアルタイムに実現されることが重要な要素となる。

質点系等の簡単なモデルで運動を近似できる場合はシミュレーションに関する計算量も少ないが、複雑な物体の運動をシミュレーションする場合には計算量も増大する。そのため、これらの運動をリアルタイムで表現するために、より少ない計算量で運動の近似表現を行うモデルに関する研究も幾つか行われている。

例えば、物体の変形運動を表現する代表的なモデルとして、バネモデルがよく使われている[1]。これは物体をバネ、ダンパで構成される細かいメッシュのつながりで表現したモデルである。このモデルでは、バネ定数や減衰係

数の値を調整することでリアリティの高い物体の挙動を表現することがある程度可能であるが、モデル自体の物理的な根拠は少ない。

一方、物体の運動や流体の挙動を物理法則に従って計算する方法として、有限要素法や差分法等の数値解析手法がある。これらの手法では、精度の高い解を出力することができるが、一般に多くの計算時間を要するという問題点がある。そのため、リアルタイム出力が要求される VR で利用するためには、大幅な計算量の短縮化や計算の高速化が必要となる。すなわち、VR のためのスーパーコンピューティング技術という課題を考慮しなければならなくなる。

3. リアルタイム有限要素法解析

ここでは、リアルタイム計算のためのスーパーコンピューティング技術の一例として、物体の変形運動表現への利用を目指した、リアルタイム有限要素法解析に関する幾つかの研究を紹介する。

有限要素法では、複雑な対象物体を多数の有限要素に分割して近似計算を行うため、一般に多大な計算時間を必要とする。この計算時間を短縮する方法としては、これまでに領域分割等の並列化手法が提案されているが、これらは大規模な計算を対象としているため、VR のようなリアルタイム計算では必ずしも有効ではない。1 ヶ月かかる計算を数日に短縮することはできても、もともと数秒程度の小規模な計算を対象とする場合には、並列化のためのオーバーヘッドが大きく、結果としてあまり計算時間を短縮することができない場合が多い。

VR では、一般にリアルタイム映像が連続して見えるために、10Hz 以上の映像の更新が必要であると言われている。そのため、データを更新する法則エンジンに関しては、0.1 秒以下で解を出力することが要求されることになる。また力覚や触覚情報を利用する場合には、更に高速なデータの更新が必要となる。

そのため、VR で利用するリアルタイム計算を実現するためには、これまでの計算力学分野の研究とは異なる、新しい高速化の考え方が必要になる。

(1) 線形静解析

例えば、リアルタイム有限要素法解析において、線形静解析という条件が仮定できる場合には、広田等によって次のような高速計算方法が提案されている[2]。静解析の問題では、

$$Ku=f \quad (1)$$

というつり合い方程式が元になる。ここで、 f は物体に加えられる外力ベクトル、 u は変位ベクトル、 K は剛性マトリックスである。

変形形状を求めるためには、(1)のマトリックス方程式を解いて u を求めることになるため、マトリックス計算に多くの計算時間を要する。しかしながら、線形性が仮定され剛性マトリックスが状態によって変化しないという条件が成り立つ場合には、剛性マトリックスの逆行列をあらかじめ計算しておくことで、リアルタイム時の計算量を大幅に削減することができる。

(2) 非線形静解析

一方、大変形を伴うような非線形問題の場合には、状態によって剛性マトリックスが変化する。そのため、あらかじめ逆行列を計算しておくという、上記の方法を用いることはできない。このような場合に利用可能な方法として、筆者等は並列冗長予測法という考え方を提案している[3]。

これは並列計算機の CPU を効率的に使用することで、リアルタイムに解を出力させようという方法である。リアルタイムに剛性マトリックスの作成から収束計算までの全ての処理を行うのでは、どんなに速い計算機を用いても、間に合わない。そのため、並列計算機の余っている CPU を用いて、現在の近傍条件に対する計算を前もって行っておこうという訳である。

実際に境界条件が与えられると、既に計算済の解の中から最も近い計算条件のデータを取り出し、これを用いて解を出力する。実際には、予測データとして、三角分解された剛性マトリックスデータを保持しておくことで、リアルタイム時の計算量を大幅に削減している。

この方法では、予測が粗い場合は出力結果の誤差も大きいですが、シミュレーションが進むに従って予測データが密になるため、出力される解はより正確になり、変形運動も滑らかになる。図 2 は、並列冗長予測法によって、非線形のゴムの変形運動をリアルタイムに計算表示した例である。

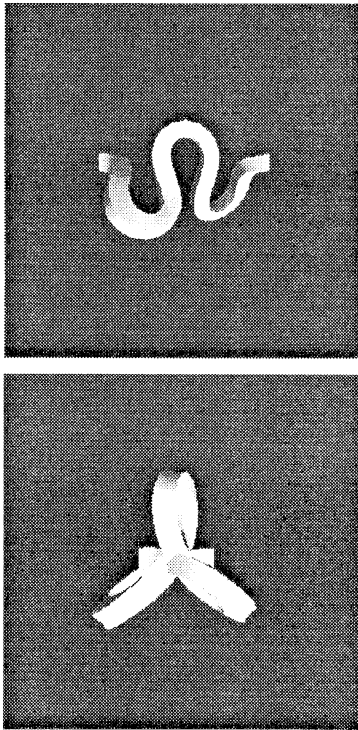


図2 並列冗長予測法によるゴムの変形運動表現

(3) 線形動解析

更に、時間経過に依存するダイナミックな物体の運動を表現したい場合には、問題を動解析として解くことが必要になる。すなわち、つり合い方程式は、

$$Ma + Ku = f \quad (2)$$

となる。ここで M は質量マトリックス、 a は加速度ベクトルである。

動解析の問題の場合、物体の状態はそれまでの時間経過の影響を受けるため、前述のような予測法では時間の経過による可能性が多すぎ、実質的な予測を実現することは困難である。このような動解析の問題をリアルタイムで実行する高速計算アルゴリズムとして、例えば iterative Newmark 法が提示されている[4]。

動解析問題では、計算時間を高速化するとともに解の安定性が確保されることが必要である。そのため、iterative Newmark 法では、陰解法である Newmark- β 法をもとにしながら、予測加速度を与えることで、逆行列計算を行わずに収束計算に持ち込み、安定かつ高速な計算を実現している。

図3は、iterative Newmark 法によって、物体が床面に衝突して変形する様子を示したものである。この場合、実際に物体の落下にかかる時間よりも計算を速く終了することができるため、変形を含む物体の運動をリアルタイ

ムで表現することができる。

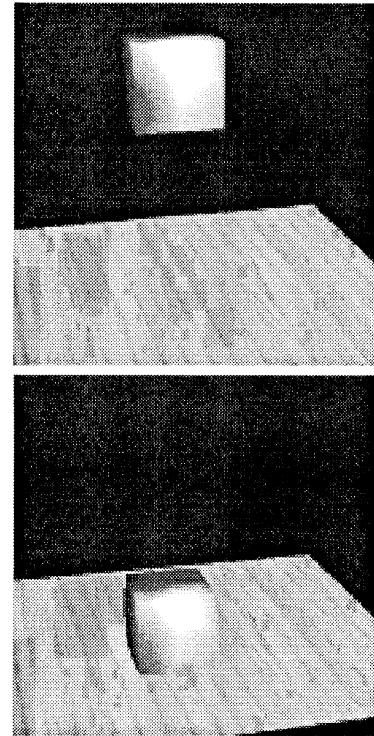


図3 iterative Newmark 法による物体の床面衝突表現

(4) 非線形動解析

また、物体の動解析において非線形の問題を対象とする場合には、剛性マトリックスを用いて表される内力が変位ベクトルの関数となるため、この項に関しても反復計算が必要になる。このような問題に対して、野口等は変位の予測値を用いて内力に関する予測を与えることで、前述の iterative Newmark 法を非線形の問題へと拡張した非線形 iterative Newmark 法を提案している[5]。これらの手法は、解の安定性を保ちつつ計算時間の短縮化を実現しており、VR への応用が可能な数値解析手法と考えられる。

以上、物体の変形計算に関して、線形、非線形あるいは静解析、動解析に分けて、これまでに提案されている種々の計算アルゴリズムについて概略を述べた。これらの手法では、ある程度の規模の問題に対しては、リアルタイム計算が実現されているものの、実行される計算時間とそこで使用されている計算モデルの間には密接な関係を有する。そのため、どのような問題に対して、どのような計算モデル、計算手法を適用するかという選択は非常に重要な課題となり、十分な検討を必要とする。

4. スーパーコンピューティング VR 環境

ここでは、VR 用のリアルタイム有限要素法解析に関する研究事例を紹介したが、これらの手法を利用するためには、VR 環境とスーパーコンピュータが密接に結びついたシミュレーション環境が必要である。特に、触覚や力覚をともなう VR 世界では、高速な法則エンジンの利用が必要である。

筆者が所属する MVL (マルチメディア・バーチャル・ラボ) リサーチセンターでは、東京大学 IML の CABIN、岐阜県テクノプラザの COSMOS 等の大型 VR 装置、あるいは PHANToM、HapticGEAR 等の力覚ディスプレイ装置と、SGI Origin2000、IBM SP2、日立 SR2201 等のスーパーコンピュータとの間をギガビットネットワーク等で接続した、スーパーコンピューティング VR 環境の構築を行っている。

このシミュレーション環境では、種々のスーパーコンピュータを法則エンジンとして用い、CABIN や PHANToM 等の VR 装置で臨場感の高い仮想世界を提示することを目的とした研究を行っている。図 4 は、並列計算機を用い、前述の並列冗長予測法に基づいたリアルタイム有限要素法解析によって、CABIN の中でゴムの変形運動表現を行っている例を示したものである。また図 5 は、リアルタイム有限要素法解析によって表現された弾性物体を PHANToM を用いて力覚表現している例である。

総務省が進める MVL のプロジェクトでは、これらの手法を適用することで、より高度でリアリティの高い仮想世界の構築が実現されることが望まれている[6]。

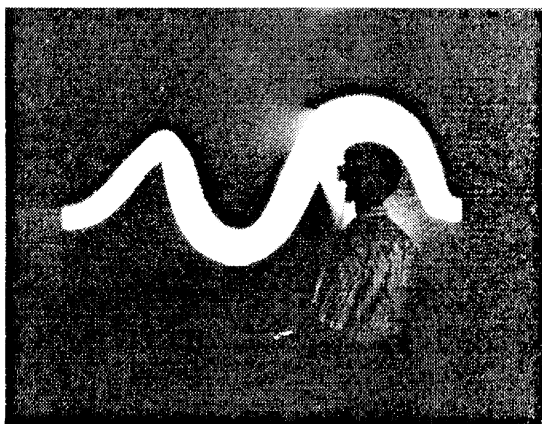


図 4 CABIN の中におけるゴムのリアルタイム変形表現

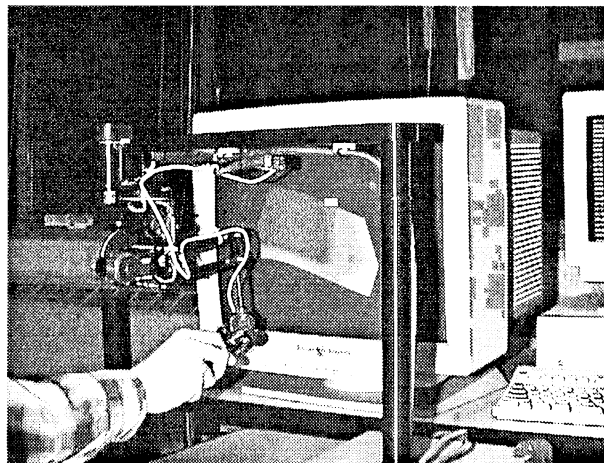


図 5 PHANToM による弾性物体の力覚表現

5. おわりに

リアリティの高い仮想世界を構築するためには、時間スケールを含め、世界の中での法則を正確に再現できることが重要である。そのためには、VR 技術が有限要素法等のスーパーコンピューティング技術と結びつくと同時に、リアルタイム計算のための VR に特化したスーパーコンピューティング技術の開発も必要になってくる。

本稿では、物体の変形運動を例に、VR に利用可能な幾つかの高速計算手法の紹介を行ったが、いずれの場合も計算精度と計算時間の間にはトレードオフの関係があり、扱える問題には限界がある。そのため、問題に対して、どのような計算モデルを用いるかという選択だけではなく、どれくらいの精度で計算を行うかという見極めも必要になってくる。リアリティの高い仮想世界を実現するためには、スーパーコンピューティングという視点からの VR へのアプローチは今後ますます重要になると思われるが、よりトータルな視点からリアリティの向上を目指していくことが必要になってくるであろう。

参考文献

[1] 矢野博明、岩田洋夫：自律的自由曲面を用いた仮想環境による協調作業、電気学会論文誌 (C 編)、Vol.115、No.2、pp215-222、1995
 [2] 広田光一、金子豊久：線形有限要素モデルによる仮想弾性物体の表現、日本機械学会 1999 年度年次大会講演論文集(I)、pp.533-534、1999
 [3] 小木哲朗、渡辺浩志、廣瀬通孝：並列冗長予測法によるインタラクティブ・ビジュアルライゼーション、日本機械学会論文誌 (C 編)、Vol.66、No.647、pp.225-232、2000

- [4] 壺内大輔、小木哲朗、野口裕久：仮想世界における動的現象の表現～有限要素法を用いたアプローチ～、第13回計算力学講演会講演論文集、pp.603-604、2000
- [5] 梅田浩紀、壺内大輔、野口裕久：VRのための動的非線形解析手法の提案、日本機械学会2001年度年次大会講演論文集、pp.5-6、2001
- [6] 小木哲朗：マルチメディア・バーチャル・ラボ(MVL) -ギガビットネットワーク上の共有仮想空間-、3次元画像コンファレンス2001講演論文集、pp.45-48、2001

【略歴】

小木哲朗 (OGI Tetsuro)

1986年東京大学工学系研究科修士課程修了。同年(株)三菱総合研究所入社。1994年東京大学工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。1996年東京大学インテリジェント・モデリング・ラボラトリー助教授。1999年通信・放送機構MVLリサーチセンター研究員。VRを用いた情報可視化、高臨場感シミュレーション、空間共有等の研究に従事。