

# 実時間インタラクティブシミュレーションのための遅延隠蔽手法

## Latency Hiding for Interactive Real Time Simulation

丸山 悠樹† 高山 征大† 木下 純† 津邑 公暁‡ 五島 正裕† 中島 康彦‡ 森 眞一郎† 富田 眞治†  
Y.Maruyama† M.Takayama† J.Kinoshita† T.Tsumura‡ M.Goshima† Y.Nakashima‡ S.Mori† S.Tomita†

### 1. はじめに

近年の計算機性能の急速な向上に伴い、大規模かつ高精度な数値シミュレーションへの期待が高まっている。これまでも、PC クラスタ等の並列計算機環境を利用した高精度なシミュレーションシステムが開発されてきたが、次世代のシミュレーション技術として、従来の実験の代替手段となり得る「仮想実験型/仮想体験型のシミュレーション環境」の構築が望まれている。ここでは、オペレータによるシミュレーション対象へのインタラクティブな操作(ステアリング)に対応して実時間でシミュレーションを行うとともに、即刻その結果を視覚その他の手段により提示することが求められる。

我々はこのようなインタラクティブな数値シミュレーション及び、その可視化を実時間並列処理する環境についての研究を行っている[1][2]。本稿では、現在我々が検討を行っている実時間インタラクティブシミュレーション環境の構想と、シミュレーションにおける計算遅延の隠蔽手法について述べる。

### 2. 実時間インタラクティブシミュレーション

実時間インタラクティブシミュレーション環境とは手術シミュレーションのような仮想実験を支援できる環境である。ここではオペレータに対して仮想現実感を提供するために、ステアリングに対応したリアルタイムな応答と、高精度なシミュレーションが必要とされる。

高精度なシミュレーションを行う場合、計算規模は精度とともに大きくなるが、計算規模を大きくすれば、それだけオペレータのステアリングに対してレスポンスを返す時間は遅くなる。このステアリングに対するレスポンスの遅延を隠蔽するために、シミュレーション結果を何らかの方法で予測して提示するという方法が考えられる。また、インタラクティブ性の要求されるシミュレーションでは従来のシミュレーションと違い、シミュレーション対象に境界条件を与えて解いてしまえば終了というわけではなく、オペレータによるステアリングの続く間はシミュレーションが何度も連続して繰り返される。つまり、ステアリングが連続に変化する可能性が高く、この特性を利用して、計算時間を短縮する方法が考えられる。

次章ではシミュレーション結果の予測方法、ステアリングの連続性を利用した計算時間を短縮方法について述べた後、我々の提案する手法について述べる。

### 3. 計算遅延の隠蔽手法

#### 3.1 方針

#### シミュレーション結果の予測

シミュレーション結果の予測方法としては、精度の粗いシミュレーションを行い、所望する精度の細かいシミュレーションの結果が提示される前に提示する方法が考えられるが、粗いシミュレーションと細かいシミュレーションの二つのプロセスを処理するだけでは細かい方のシミュレーション結果の提示が遅くなってしまふ。そこで、マルチグリッド法を利用して、粗いシミュレーションの結果を細かいシミュレーションの結果に利用することを考える。マルチグリッド法は複数の粗いグリッドを用いて、反復法において収束率の悪い低周波成分の誤差の収束を加速させる方法である(図 1)。一般的なマルチグリッド法では  $v$  サイクルは  $w$  サイクルといった、細かいグリッドと粗いグリッドでの計算を交互に行う方法が一般的である。これに対し、我々はシミュレーション結果を予測し、計算時間の遅延を隠蔽することが目的であるので、一番粗いグリッドから順に細かいグリッドまで計算するという方法をとる。この方法を用いることにより、粗いシミュレーションの結果による詳細度制御を行うことができるだけでなく、シミュレーションの計算時間を短縮できると考えられる。

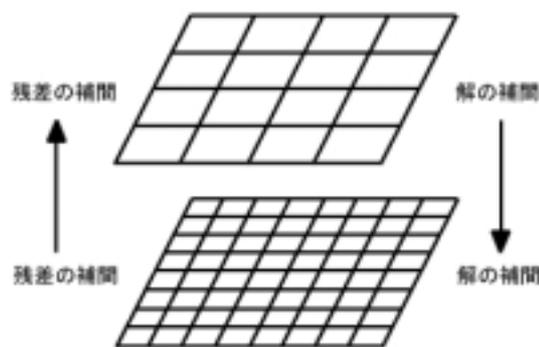


図 1: マルチグリッド法

#### 連続性を利用した計算時間の短縮

シミュレーションにおいて、オペレータが境界条件などのパラメータを連続的に変化させるとき、シミュレーションの結果も連続的に変化し、前ステップでの解に近い値になると考えられる。反復法における収束率は初期値の選定にも依存しており、収束値に近い値を初期値として用いた方が計算時間を短縮できると考えられる。つまり、境界条件の変化が連続である場合は、反復解法における初期解として前ステップで計算されていた、もしくは途中まで計算

†京都大学情報学研究科

‡京都大学経済学研究科

されていた解を利用することで、収束を早めることができると考えられる。

### 3.2 提案手法

以上の二つの性質を利用した数値計算時間の遅延の隠蔽手法を提案する(図 2)。システムはオペレータがシミュレーションを操作する端末としてのホストと、複数の計算機による計算サーバから構成される。まず、一番粗く設定したグリッドはリアルタイム性を確保する必要があり、通信時間のオーバーヘッドを削減するためにも、ホストで計算を行い、グリッドの粗さはリアルタイム性を確保できるレベルまで粗くしておく。このグリッドのレベルを  $n$  とする。オペレータからのステアリングがあった場合、その情報はただちにホストと計算サーバの両方に送られ、ホストでは一番粗いグリッドの計算が、計算サーバでは次に粗いグリッドの計算が実行される。ホストでの計算が終了したら、シミュレーション結果を計算サーバに送り、解を更新する。その後は一つ細かいグリッドへ解を渡して順に計算していき、各グリッドのシミュレーションが終了するたびにシミュレーション結果をホストで提示する。そして、最終的に一番細かいグリッドでの計算が終了すると、最終結果が得られる。

各レベルのグリッドにおける計算が終了した段階で、シミュレーション結果の提示を更新することにより、解の精度を段階的に上げることができる。さらに、境界条件が変化するような場合、シミュレーションの対象は変化している可能性が大きい。一般的に人間の感覚が動作する物体を追いかける時は静止している物体の場合に比べて解像度が粗くなると言われる。このため、粗い解でシミュレーション時間の遅延隠蔽を行ったとしても、境界条件が刻々と変わるような場合はシミュレーションの対象も刻々と変化しており、視覚上の解像度の低下がある程度隠蔽されることが考えられる。

また、境界条件の変化が微小であった場合は、前の反復計算で計算されていた解、もしくは途中まで計算されていた解を初期解として、各グリッドの計算を行う。このようにすることにより、境界条件の連続性を利用した計算時間の短縮を行い、かつリアルタイム性を確保できると考えられる。

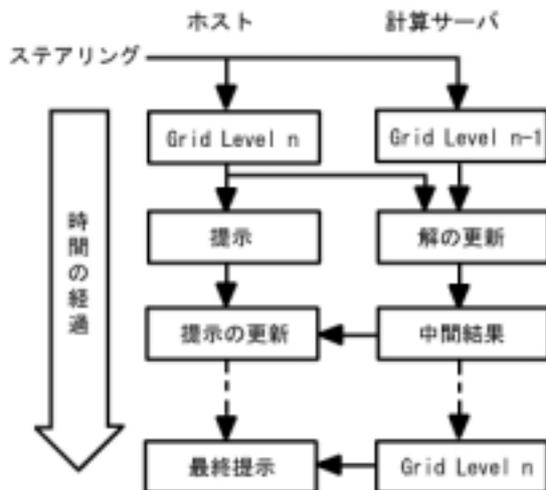


図 2: 提案手法

### 4. 予備評価 .

逐次計算による予備評価を行った。解析対象は 3 次元のポアソン方程式

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = Q$$

の差分法である。解析領域は  $1.0 \times 1.0 \times 1.0$  の立方体で  $64 \times 64 \times 64$  分割した。境界条件はディリクレ境界条件とし、粗いグリッドとして  $16 \times 16 \times 16$ 、 $32 \times 32 \times 32$  の 2 つを用意し、3 レベルで解の補間を行いながら解を収束させる。各グリッドにおける反復解法には CG 法を用いた。各レベルのグリッドでの収束時間を表 1 に示す。

表 1: 各レベルにおける収束

	収束時間(sec)	反復回数
$16 \times 16 \times 16$	0.036	51
$32 \times 32 \times 32$	0.64	79
$64 \times 64 \times 64$	10.9	155

最終結果を得られるまでの計算時間は 11.6 秒かかっているが、 $16 \times 16 \times 16$  のシミュレーションに関しては 0.039 秒であり、視覚的にはほぼリアルタイムなシミュレーションが可能としており、 $16 \times 16 \times 16$  を一番粗いグリッドとして使用することにより、シミュレーションの遅延隠蔽が可能であると考えられる。また、 $64 \times 64 \times 64$  の 1 レベルのみで解いた場合の計算時間は 15.2 秒、反復回数は 208 回であることから、解の収束性能も向上していることがわかる。

### 5. まとめ .

本稿では、実時間インタラクティブシミュレーション環境の構想と述べ、シミュレーション結果の可視化に際しての計算時間の隠蔽手法を提案した。このシステムにおけるリアルタイムな処理時間に対する計算時間の遅延を隠蔽する手法として、複数のグリッドを用いてマルチグリッド的に解いていくことにより、計算遅延の隠蔽方法と、反復法の初期解として直前の解を利用することにより、境界条件が連続的に変化する場合に計算時間を短縮する方法を提案した。

今回は逐次計算しか行っていないが、今後は並列化を行い、今回提案した手法の実装を行っていく予定である。

### 6. 謝辞 .

日頃より御議論いただく京都大学大学院情報学研究科富田研究室の諸氏に感謝します。

本研究の一部は文部省科学研究費補助金(基盤研究(B)(2)課題番号 13480083 ならびに 特定領域研究(C)(2)「情報学」課題番号 13224050)による。

### 参考文献

- [1] 山内聡, 他 “アクティブボリュームレンダリングに基づくシミュレーションステアリング”, 信学技報 CPSY2001-35, pp.1-8, 2001 年 8 月.
- [2] 生雲公啓, 他 “実時間インタラクティブシミュレーションのための並列ボリュームレンダリング環境”, 平成 14 年度情報処理学会関西支部大会, pp.121-124, Nov. (2002).