## 有限要素法シミュレータにおける

## パラメータ値の伝播過程とその計算過程に与える影響の可視化

Visualization of Parameter Value Propagation in Finite Element Simulation

# 後藤知一<sup>1)</sup>, 梅谷征雄<sup>2)</sup>

Tomokazu GOTO<sup>1)</sup>, Yukio UMETANI<sup>2)</sup>

1)静岡大学 情報学研究科情報学専攻 (〒432-8011 浜松市城北 3-5-1, cs8028@cs.inf.shizuoka.ac.jp)
2) 工博 静岡大学教授 情報学部情報科学科 (〒432-8011 浜松市城北 3-5-1, Umetani@cs.inf.shizuoka.ac.jp)

We have developed the function of "Visual Trace" which enables us to visually grasp the process and the result of the numerical calculation using finite element method for the piano soundboad simulator. First, we visualized the variable array obtained as a result of calculation. Next, we visualized the calculation process. Finally, we have visualized the difference of two calculation results and its propagation along the calculation process for two different parameter values.

**Key Words** : visual trace, finite element method, process of calculation, difference of two calculation results, two different parameter values

1. はじめに

シミュレータを使用するときそれぞれのパラメータ 値の移り変わりが計算結果に与える影響、さらにはその 伝播の過程がわかると非常に便利である。

そこで本研究ではピアノの響板振動をシミュレート する有限要素法のシミュレータ(図 1)を対象として、 その計算過程や計算結果に影響を与える重要な値の移り 変わり、さらには異なる二つのパラメータにおける計算 結果の違いとその原因を視覚的に把握できるような "Visual Trace"の機能を開発する。



図 1 有限要素法シミュレータの画面

## 2. Visual Trace の機能

Visual Trace はピアノの響板シミュレータの計算過程、 及び異なるパラメータ値による計算結果の差を視覚的に 把握できる。そのために必要な機能を以下に示す。

ステップ実行、視点切り替え

## 計算過程の表示

ファイル(保存、読み込み)機能

二つの異なるパラメータ値による計算結果の違いの 可視化

二つの異なるパラメータ値による計算過程の違いの 可視化

ステップ実行、視点切り替え、計算過程の表示はそれ ぞれ専用のボタンを用意することで提供することができ る。また、二つの異なるパラメータ値による計算結果と その過程の違いの表示はファイル機能を用いて実現でき る。

それぞれの動作、表示は必要な状況においてのみ使用 可能となっている。その基本的な流れを図 2 に示す。



Stopボタンが押されたりファイルにデータがない場合終了

図 2 Visual Trace の動作、表示の流れ

また今回それぞれ必要な"ボタン"を追加したので図 3に示す。



3. ステップ実行、視点切り替え

- 3.1 実装目的、実装方法
- (1) ステップ実行

計算過程を表示するためには時間ステップよりも細かい特定時間ステップ内での表示が必要となる。その ためまず、ステップ実行の機能を追加することが必要 である。

実装方法は計算、表示を行う1ステップごとにフラ グをたて毎ステップごとにシミュレータの動作を一時 停止することで実装する。

(2) 視点切り替え

このシミュレータの通常画面は板の振動の様子を立 体的に示している(図 1 参照)。しかし、各節点ごと の計算課程を表示する必要があるため、立体表示だと 不適切である。そのため、全節点を把握できるような 上から見た平面的表示に視点を変える必要がある。

実装方法は状況に合わせて画面の座標を切り替え平 面的に表示し、各節点を丸で表しその計算結果の値を 色に反映させ実装する。

3.2 実装結果

シミュレータ上に「ステップ実行」ボタンと「視点切 り替え」ボタンを追加した(図 3)。

また、視点切り替えによって切り替えた画面を図 4 に示す。



図 4 視点を切り替えた画面表示

## 3.3 仕様

(1) ステップ実行

シミュレータの動作中に「ステップ実行」ボタンを押 すことでステップ実行に切り替える。ステップ実行モー ドでは「suspend」ボタン(一時停止ボタン)を押すこと により1ステップづつ進めることができる。また、もう 一度「ステップ実行」ボタンを押すことで通常動作に戻 すことができる。

(2) 視点切り替え

シミュレータが一時停止している状態で「視点切り替 え」ボタンを押すことにより画面の視点を変えることが できる。

色の指定はその時間ステップ内での各節点の計算結果 の大小を以下の式を用いて表1のように反映させている。

比率 = (値-最小値)/(最大値-最小値)...(1)

表 1 視点切り替え時の色の指定

最小値・	•••	・中間・・	・・・最大値
青・	・水色・	・緑・・す	<b>責色・・</b> 赤

### 3.4 考察

視点を切り替え平面的に表示することによって視覚的 に把握しやすくなったと考えられる。また、ステップ実 行や視点切り替えの機能は計算過程を表示するときに非 常に役に立つであろうと考えられる。

ステップ実行の機能の他に、時間ステップを戻す逆実 行や、希望するステップ数からの再実行などの機能の必 要性も考えられる。

4.計算過程の表示

4.1 実装目的

計算過程を細かく表示することでそれぞれの値の移り 変わりや、パラメータ値の与える影響を視覚的に把握す ることができる。さらにシミュレータ使用者の予期しな いシミュレート結果が生じたとき、その原因追求の手助 けとなる。

5.2 実装方法

(1)有限要素法

今回対象とした有限要素法シミュレータはピアノの響 板の振動をシミュレートしている。つまり、この有限要 素シミュレータは響板の振動の方程式を解いている。響 板振動の方程式を以下に示す。

$$D\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial^2 x \partial^2 y} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right) + \mathbf{m}\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - q_z(x, y, z) = 0 \quad \dots \quad (2)$$

上の式を

$$u = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, v = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \qquad \dots (3)$$

なる変数を導入し、有限要素法を用いて解いている。 (2)有限要素法とプログラムの対比 有限要素法とプログラム動作を対応させると図 5 の ようになる。なお、図 5 においてu<sup>t</sup>と fu、v<sup>t</sup>と fv がそれぞれ対応している。また、fw については左側のフ ローチャートの四角で囲まれた部分と対応している。ま た、式 1 は SOR 法による連立一次方程式の反復解法の基 本演算で omega は加速係数を表している。今回は omega = 1としている。



図 5 有限要素法の流れとプログラムとの対比

図 5からわかるように u<sup>t</sup>と v<sup>t</sup>を求めそれらを用い てw<sup>t+1</sup>を求めている。プログラム上ではそれら 3つの 変数は fu、fv、wに対応している。また、式1において u 1 [ i ]は収束して値が決まるのだが、そのとき変数 1 の値は以下の式 (5)で決まる。

$$l = \sum_{\substack{j=1 \ j \neq i}}^{m} a_{ij} u_{j} \dots (5)$$

## (3) 実装方法

視点の切り替えを行い特定の節点を指定し、その節点 での計算過程を表示する。その節点での計算過程を図 5 の1~4の4段階の計算の流れに沿って表示するように実 装する。また、表示にアニメーションを使用し値の移り 変わりを示し、計算の流れをわかりやすくする。

表示に必要な計算過程内の変数は毎ステップごとメ モリに保存しておき、それを参照し表示する。 5.2 実装結果とその仕様

計算過程を表示するには"ステップ実行モード"で"視 点切り替え時"において、画面上の特定の接点をダブル クリックで指定しシミュレータ上の「計算過程」ボタン を押すことにより、"計算過程表示モード"に切り替わる。 状況が満たされていないときはエラー表示が出て状況を 満たすよう指示が出る。 "計算過程表示モード"は「suspend」ボタンを押す ことにより計算過程の表示を進めることができ、その表 示が終了すると時間ステップが進む。また、通常パラメ ータ値の値が表示されている部分にフローチャートが表 示され、現在どの計算中なのかを表示する(図 7)。

もう一度「計算過程」ボタンを押すと"計算過程表示 モード"は終了する。

計算過程表示モードの流れを図 6 に、計算課程を表示した画面の例を図 7 に示す。



図 6 計算過程表示モードの流れ



図 - 7 計算過程を表示した画面

色の指定は周りの他の節点における同じ変数の値と比較し比率を出し、その比率を表 1と同様に反映させる。 5.3考察

細かい計算過程を流れに沿って表示することにより、 値の移り変わりや各パラメータ値の影響を視覚的に把握 することができた。

改善点として、それぞれの変数の最適な色の指定、計 算過程の表示に至るまでのインターフェースの改善が挙 げられる。

また、今回は大まかな計算過程の流れの表示にとどま っており、計算過程において非常に重要となってくる式 (4)の収束の様子や式(5)の計算などが表示されてい ないため、それら表示の追加が必要である。

6.ファイル機能

#### 6.1 実装目的

後の7章、8章での二つの異なるパラメータ値での計 算結果、計算過程を表示するとき、シミュレート結果を 二つ重ねて表示する必要があるため、そのうちの一つを あらかじめファイルに保存しておき読み込むという方法 をとる。そのため、ファイルの読み書きの機能を追加す る。

#### 6.2 実装結果

ファイルから読み込んだ結果を表示した画面を図 8 に示す。



図 8 ファイルから読み込んだ結果の表示

#### 6.3 仕様

シミュレータ上の「ファイル機能」ボタン(図 3)を 押すと、ファイル機能選択ダイアログボックスを開く。 (図 9)



図 9 ファイル機能選択ダイアログボックス

このダイアログボックスでそれぞれ指定することによ リファイルの読み書きを行うことができる。ファイルの 書き込み、及びファイルの読み込みを指定するとこの後 共通ファイルダイアログが開き書き込む、または読み込 むファイルを指定できる。

(1) ファイル機能なし

通常動作(デフォルト)

(2)ファイル書き込み

「start」ボタンを押す前に図 9で"ファイル書き込

み"を指定とファイル名を決定し、シミュレートを開始 するとその計算結果である変数wの値がファイルに書き 込まれる。変数wの他に必要なパラメータ値、ステップ 数が書き込まれる。

(3)ファイル読み込み

「start」ボタンを押す前に図 9で"ファイル読み込 み"を指定し、読み込むファイルを決定し「start」ボタ ンを押すとファイルから読み込まれた値を元に板の振動 の様子が表示される(図 8)。ファイルに書かれている ステップ数を超えるとと「データがありません」とメッ セージボックスが開き動作を終了する。

(4)計算+ファイル読み込み

「start」ボタンを押す前に図 9で"計算+ファイル 読み込み"を指定し、読み込むファイルを決定し「start」 ボタンを押すとシミュレート結果とファイルから読み込 まれた結果とを重ねて表示する(7章参照)。 6.4考察

今回、ファイルに書き込む計算結果wの値が double 型であったためファイルの読み書きをバイナリー形式で 行う必要があった。

今後の課題として希望するステップ数からのファイル 読み込み機能やファイルを逆に読み込み逆実行する機能 の追加などがあげられる。

7.二つの異なるパラメータ値における計算結果の違いの 可視化(通常モード)

7.1 実装目的

パラメータの変更により計算結果にどのような差が生 じてくるのかを、パラメータ変更前の結果とパラメータ 変更後の結果を重ねて表示することにより、その差の伝 播の様子を視覚的に把握できるようにする。

7.2 実装方法

6章で実装したファイル機能を用い、パラメータ変更 前のデータをファイルに保存し、パラメータ変更後のデ ータと重ねて表示する。また、視覚的にその差をわかり やすくするため各節点に小さな丸を表示し、その差を丸 の色に反映させる。

7.3 実装結果 実装結果を図 10 に示す。



図 10 計算+ファイル読み込みの差分表示

### また、視点を切り替えたものを図 11 に示す。



図 11 差分表示の視点切り替え

#### 7.4 仕様

「start」ボタンを押す前に図 9のファイル機能選択 ダイアログで"計算+ファイル読み込み"を指定し、読 み込むファイルを決定し「start」ボタンを押すとシミュ レート結果とファイル読み込みの結果とが重ねて表示さ れる。(図 10)ファイルに書かれているステップ数を超 えると「データがありません」とメッセージボックスが 開き動作を終了する。

各節点の色の指定には以下の式を用いて比率を出す。

この比率を用いて表 2のように反映させる。

表	2	視点切り替え時の色の指定	
差が	小・	・・・・中間・・・・・差が大	
ЩШ	<b>-</b>	・水色・・緑・・黄色・・赤	

7.5 考察

シミュレート結果とファイルからのデータを重ねて表 示することにより、その差がどの程度のものなのか、ま たその差がどのように広がっていくのかを視覚的に容易 に把握することができた。

また、今回計算結果である変数wの値を考慮し色の指 定に使用する制御値を「0.1e-1」に固定した。現段階で は効果的な結果が得られてはいるが、これからの状況に 応じて制御値をインタラクティブに変化できるように改 良する必要があると考えられる。

8.二つの異なるパラメータ値における計算過程の違いの 可視化(計算過程表示モード)

#### 8.1 実装目的

7章でパラメータ値の変化による時間ステップを追っ た計算結果の違いは把握することができた。ここではさ らにその計算過程まで掘り進み、そのパラメータ値が計 算にどのように影響を与えているのか、また生じた差が 計算過程においてどのように伝播されていくのかを視覚 的に把握できるようにする。

8.2 実装方法

ファイルから読み込んだw<sub>n</sub>の値をもとに計算を行い、 w<sub>n+1</sub>の値を計算する。その計算過程において表示に必 要な値をメモリに保存し表示に使用する。

また、計算過程において、前回の計算過程の結果を今回の計算過程の初期値として使用している(図 12)。



ファイルから読み込むときファイルには計算結果であ る変数w<sub>n-1</sub>の値しか保存されていない。各計算過程の反 復計算を行うためには、1時間ステップ前のuやvの値 が初期値として必要となる。そのため、必要な初期値を 作るためファイルから前回のw<sub>n-2</sub>の値を読み込み1ス テップ前の計算を行い計算過程の再現に使用する(図 13)。



図 13 ファイル読み込みの場合の計算過程の表示

また、表示方法は5章で実装した4段階の計算過程の 表示を用いて、それぞれの差を色に反映させる。

### 8.3 実装結果

実装結果の例を図 14 に示す。



図 14 シミュレートとファイル読み込みの計算過程の 差の表示

#### 8.4 仕様

計算過程を表示するための操作方法、また表示の流れ は5.2の計算過程の表示と同じである(図 6)

各変数の色の指定はシミュレートとファイル読み込み のそれぞれの対応する変数の差をとりそれを全節点と比 較し比率をとり、色に反映している。

比率 = 差分 / (全節点の最大の差 - 全節点の最小の差) …(7)

色の反映方法は表2と同じである。また、矢印の色の 指定はその差分によっての影響の大小を表している。式 (7)によって比率を出し、色に反映させる(表 3)。

表 3 影響を表す	矢印の色の指定
-----------	---------

影響小・	• • •	・中間・・・	・・影響大
青・	水色・	・緑・・黄	色・・赤

8.5 考察

二つの異なるパラメータ値による計算過程の違いを表 示することにより、細かい差の伝播の様子や、その差に よる計算結果に与える影響を視覚的に把握することがで きた。特に矢印で影響の様子を表すことにより異なるパ ラメータ値による影響の伝播の様子がわかりやすく表示 されていると考えられる。

これからの課題として5章の計算過程の表示と同様に 収束過程などのもっと細かいレベルでの表示が挙げられ る。

## 9.まとめ

計算過程やパラメータ値、変数の移り変わりを計算の 流れに沿って可視化することにより、視覚的に把握でき るようになり計算の流れを容易に理解できるようになっ た。特に、ファイル機能を用いた二つの異なるパラメー タ値による計算結果、及び計算過程の違いの可視化では 非常に興味深い結果を得ることができた。

しかし、実装するにあたってさまざまな問題点、改善 すべき点があることに気づいた。それを以下に述べる。

- 機能や表示方法が増えることにより操作が複雑になってしまい、表示方法も統一性がなくなってしまった。そのためそれぞれの操作方法や表示の整理が必要でる。
- 視覚的に重要となってくるそれぞれの色の指定について、もっと考察し、より良い色の指定方法の発見とその実装が必要である。
- 計算過程の表示においては最も重要となってくる収 束過程の表示などもっと細かいレベルでの表示が必 要である。
- パラメータ値で最も計算結果に影響を与えるメッシュ分割の違いについてこれまでほとんど触れていない。そのためメッシュ分割の違いによる計算結果、計算過程の違いの表示の実装が必要である。

## 参考文献

1) 菊池文雄:「有限要素法概説」、株式会社 サイエンス 社、1999

- 2)竹下明良,塩沢徳人,梅谷征雄:「有限要素法可視化 対 話シミュレータの試作」,日本計算工学会講演会論文集, 5巻2号, pp. 543-546, 2000
- 3)山本信雄:「Visual C++」、株式会社 翔泳社、1999