

楽器研究 PSE(Problem Solving Environment)の開発に向けて

梅谷 征雄¹⁾ 柘植 敦司²⁾ 澤嶋 友輔²⁾ 後藤 知一²⁾

1) 静岡大学情報学部 2) 静岡大学情報学研究科

Toward the Development of Musical Instruments PSE(Problem Solving Environment)

Yukio Umetani¹⁾ Atsushi Tsuge²⁾ Yuhsuke Sawashima²⁾ Tomokazu Gotoh²⁾

1) Faculty of Information, Shizuoka Univ. 2) Graduate School of Informatics, Shizuoka Univ.

1. はじめに

世界の楽器製造の中心地である浜松に相応しいテーマとして、楽器研究 PSE の開発を提案する。PSE(Problem Solving Environment)とはユーザの利便性を考慮した研究開発基盤を指し、近年の情報処理技術の成果を専門知識なしに活用できるものを意味する。近年の情報処理技術の成果としては、多数のプロセッサエレメント(PE)を容る高性能サーバ[1]や GRID[2]に代表されるような世界規模の情報基盤の出現が挙げられる。

楽器もまた工業製品であることから設計のための CAD(Computer Aided Design)技術は多用されており、品質向上のために CAE(Computer Aided Engineering)技術も適用されているが、製作した実機の評価解析が中心であり[3]、仮想試作などの上流工程には及んでいないように見受けられる。これは同じく浜松を発祥の地とする自動車産業とは著しい対比をなす。その理由としては以下のような点が挙げられる。

- (1) 音楽を奏する道具としての感性的な評価(音色、演奏性など)を可能にするモデリング技術の不足
- (2) 特別な大型楽器を除いて、実機試作コストが余り大きくないこと
- (3) 中庸な産業規模(生産台数で自動車の 10 分の 1 以下)から来る投資余力の不足
- (4) 工芸品的な製造文化と技術伝承形態

楽器の物理モデリングとそれに基づくシミュレーションは、発音機構の解明を目指して学術関係者の間でむしろ盛んに行われている[4]。しかし一方では、中進国の追い上げに対応する高品質化への要求、消音性などの社会的要求、自然材の涸渇に伴う代替材料への要求、遠隔合奏や遠隔レッスンなど通信技術が可能にする新しい演奏形態の要求、電子楽器の触発された新楽器への要求など楽器を巡る新しい状況が生じつつあり、それに伴い CAE に期待される役割が強まっているのも事実である。

これらの状況を踏まえ、CAE を中心とする楽器研究のための PSE の構築を検討し提案する。

2. 楽器研究 PSE の狙い

本 PSE においては次の 2 点を開発の狙いとする。

- (1) 最新の情報処理資源の活用
高性能の並列サーバが提供する計算能力、大容量ファイル、高性能ネットワークなどの潤沢な資源を活用して、新時代の楽器研究に対応できる CAE システムを開発する。
- (2) シミュレーション要素技術の蓄積と共用化の促進
本 PSE を核とする共同利用センタを構想し、基幹アプリケーション、部品モデル、材料情報などの蓄積と共用化を促進する。

3. PSE システムの構成

上記の狙いから、本研究の PSE システムを高性能並列サーバとデスクトップまたは実験室のパソコンを接続したクライアント/サーバ型のシステムとして構想する(図 1)。クライアントには演奏装置からのインターフェースと計測装置からのインターフェースを用意する。高性能サーバには大容量ファイルを用意して、計測データ、シミュレーションデータ、楽器モデルを累積する。クライアントとサーバは LAN または通信回線で接続する。ソフトウェア構成は、OS の上にクライアントとサーバの連携のための基盤ミドルウェアを置き、その上に解析用のアプリケーションを用意する。基盤ミドルウェアはファイルデータの共用と転送、アプリケーションの起動、プロセス間通信、認証とセキュリティ管理などを行うものである。アプリケーションとしては、中心となる物理シミュレータの他、演奏シミュレータ、計測器からのデータ収集ソフトウェア等を用意する。以下、物理シミュレータと演奏シミュレータについて少し詳しく述べる。

(1) 物理シミュレータ

音楽を演奏する道具である楽器のシミュレーションには次の 3 つの時間モードが必要と考える。

- (a) 可聴化モード：シミュレーションの結果を音として聴くためのモードである。200Hz の音を聴くには 1 秒間に 200 周期分の波形が得られなければならない。特に演奏系と接続する場合は実時間のシミュレーションが要求される。
- (b) 可視化モード：結果を視覚的に把握するモードである。1 秒間に 200 回の振動は目にも止らぬ早さなので、可聴域の振動を適正な動きとして認識するためには、実時間から 100 分の 1 から 1000 分の 1 のスピードダウンが要求される。
- (c) 解析モード：これは脳内思考に同期するモードなので時間性は薄い。リプレイ等の対話性と解析機能の豊富さが重要である。

理想的には、この 3 つのモードを自在に切り替えられることが望ましい。

(2) 演奏シミュレータ

操作性や表現性などいわゆる演奏性の評価のためには、通常の楽器と同じインターフェース(鍵盤楽器であればキーボード、管楽器であればマウスピースとキーやピストンバルブ)を持ち、実時間で応答が得られるシミュレータが必要である。通常は、楽器インターフェースを可聴化モードの物理シミュレータに接続して構成するが、概念的には実楽器をシームレスに取り込めるものが望ましい。

4. 物理シミュレータの要求性能

上記の 3 つのモードを実現するために物理シミュレータが必要とする性能を見積もり、その実現性を明らかにする。

ピアノのシミュレーションを例にとる。

4.1 ピアノの物理シミュレーション

ピアノは、鍵盤とアクション機構を介して接続されたハンマー、ピアノ弦、それに接続する駒と響板を主要な部品とし[5]、その他ピアノ弦を止める金属製のフレームやピアノを囲う側板、上板などからなる。鍵盤とアクション機構は演奏者とのインターフェースとして、ピアノ弦は音源として、響板は発音体としてそれぞれに重要である。ピアノの個性を示す基本的な音色は響板によって作られ、また2段減衰として知られるピアノに特有な粒のある音は、弦の垂直、水平2方向の振動と駒・響板の複雑な相互作用によるものであることが言われ様々に解析がなされている。これに対し、鍵盤・アクション・ハンマー系は機構が複雑すぎるため解析事例が少ない[6]。

3つの主要部品のうち最もシミュレーション負荷が大きいのは駒・響板系である。駒・響板系の役割は、駒を通じて弦から伝えられる振動を板振動に変え、板表面から空気振動として音を放射することにあるが、縦横ともに1mを超える大きな部材であり、板の振動状態は空間的な広がりを抜きに計算できないのでシミュレーション負荷が大きくなる。駒・響板の物理モデルは連続体の構造解析モデルとして、応力-ひずみ関係、ひずみ-変位関係をもとに定式化される[7]。たとえば厚さが薄いとして平板のモデルで近似するときには次のような偏微分方程式であらわされる。

$$m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) - R \frac{\partial w}{\partial t} - q_z(x, y)$$
$$D = \frac{E h^3}{12(1 - \nu^2)}$$

ここで、 w は板各部の垂直方向の変位、 μ は板の密度、 E はヤング率、 ν はポアソン比と呼ばれるもの、 h は板の厚さ、 R は摩擦係数、 q_z は弦からの外力である。

実際の響板は単なる平板ではなく“クラウン”と呼ぶ反りを持っており、上面に駒、下面に響棒を有する複雑な構造物である。したがってこれより複雑な3次元の方程式を解く必要がある。物理シミュレータはこの方程式を、有限要素法[8]の手法により空間領域を要素と呼ぶ小さな部分に分割し、要素間の相互作用の式に変換して数値的に解く。要素の数は少なくとも数万個が必要である。図3にグランドピアノの要素分割例を示す。

4.2 演算量の見積もり

有限要素法で近似された駒・響板モデルの数値計算方法は、直接過渡解析、モード重ね合わせ法、インパルス応答合成法の3種類に大別される。

直接過渡解析は時間の流れを細かなステップに区切り、各時間ステップごとの計算を積み重ねて行くものである。各時間ステップごとに要素数(正確には要素を構成する節点数)分の連立一次方程式を解くために、反復系の効率の良い解法を用いても要素数に比例する演算を行う必要がある。その比例係数はかなり大きい。直接過渡解析の利点は前準備の処理を必要としないことで、パラメータ値の変更の結果を即座に計算に反映できる。

モード重ね合わせ法は、時間進行解を固有モード関数の重ね合わせで近似する方法であり、各時間ステップでは要素数と重ねあわせるモード数に比例する演算を必要とする。この方法はまた予め固有値解析を行ってモード関数を求めておく必要があり、要素数の2乗とモード数に比例する準備演算を

要する。一方でこの方法は板の振動状態を直感的に把握するのに優れている。

インパルス応答合成法は、弦からのインパルス入力に対する板上の特定位置の時系列的な応答を予め計算しておき、時系列的な弦入力に対しては、それとインパルス応答の合成積を取ることによって特定位置の時系列変化を求めるものである。この方法は特定位置を選択してその動きを計算するのに適している。各時間ステップでは応答時系列の長さとして特定位置の数に比例する演算を必要とする。また予め直接過渡解析などにより特定位置のインパルス応答を求めておく必要がある。

これらの各方式の演算数と、可聴化・可視化に必要な単位時間あたりのデータ転送数の見積りを表1に纏めて示す。

4.3 要求性能と必要資源の見積もり

表1の式に適当な値を仮定して、3万要素の駒・響板系の時系列シミュレーションに要求される性能と必要なプロセッサ台数、ネットワーク能力を粗く見積もった結果を表2に示す。計算と可聴化のための時間サンプリング間隔は22.7マイクロ秒(44kHz)を、可視化のフレーム数は20フレーム/秒を仮定した。可聴化モードでは実時間シミュレーションを、可視化モードでは実時間の100分の1のスピードを仮定した。プロセッサ1台の性能は 0.28×10^9 演算/秒(2.8GHz, 10クロック/演算)を仮定した。プロセッサの利用率は台数により変化させた。

表2から、可聴化モードで直接過渡解析を行うには1000台規模のプロセッサエレメント(PE)を備えた並列サーバが必要であることが判る。可聴化モードで当面実用的なのはインパルス応答合成法で、これは数台分のプロセッサ能力でまかなえるのでクライアント側で実施することも出来る。可視化モードは直接過渡解析が数台のプロセッサで実現できるが、モード重ね合わせ法は300台程度のプロセッサを必要とする。これをモード数の節約と可視化スピードの調整により数十台程度に減らすことは可能である。可視化モードではデータ転送能力の要求から当面クライアントとサーバをLANで接続する必要があるが、Gigabit/秒クラスの高速回線が導入されれば遠隔からの接続も可能である。

5. 開発の現状

(1) 可視化モード物理シミュレータ[9]

図2に物理シミュレータのクライアント画面の例を示す。

弦、駒、響板などのシミュレーション部品を組み合わせモデルを構築し、対話的に実行を制御することが出来るものを試作済みである。直接過渡解析によりシミュレーションを実行する。パラメータの調整は各部品に対して行う。実行結果は可視化モードで動画表示される。シミュレータはWindowsシステム上にVisual C++を用いて実装しており、各部品はCOM(Component Object Model)の規約により作成されている。一部の部品の実行を遠隔サーバで行わせることが出来、分散実行はDCOM(Distributed COM)の規約に従う。

(2) 解析モード物理シミュレータ([10], [11])

解析モードの機能を幾つか試作している。可視化モードから解析モードへはシームレスに移行することが出来る。図4はVisual Traceと呼ぶもので、シミュレーション過程での値の変化を微細なレベルで隈なく表示する機能である。異なるパラメータ値による結果の差も表示できることから、感度解析や実験値との対比解析に威力を発揮するこ

とが期待される。図5は固有値補正のために有限要素法の節点に対応する剛性行列の値を調整する機能画面である。固有値に対して感度(寄与度)の高い節点がマークされるので、その分布から物理モデルレベルの調整法を推測できる。この例では周辺近くの節点がマークされていることから、境界条件の調整が有効であることが示唆される。

可聴化モードについては、可視化モードで蓄積した特定部位の振動を音にする簡単な機能があるだけで、インパルス応答を使った本格的なシミュレータの開発はこれからである。それと連動する演奏シミュレータやデータ収集系の開発も未着手である。

6. 結 言

楽器研究用PSEの必要性を分析し、その構想を提案した。

そこで中心的な役割を占める物理シミュレータの演算量を見積もり、システムへの要求性能を明らかにした。また開発の現状について述べた。

今後の課題としては以下のものが挙げられる。

- ・高性能サーバの入手
- ・高性能サーバを使った可視化モードシミュレータの高性能化と可聴化モードシミュレータの開発
- ・演奏シミュレータの開発と可聴化モードシミュレータとの結合
- ・計測データ収集系の開発
- ・物理モデル部品を短期に作成するための支援ツール開発
- ・認証やセキュリティ管理など共同利用のための基盤機能整備

地域の協力を得て、これらを鋭意推進して行きたい。

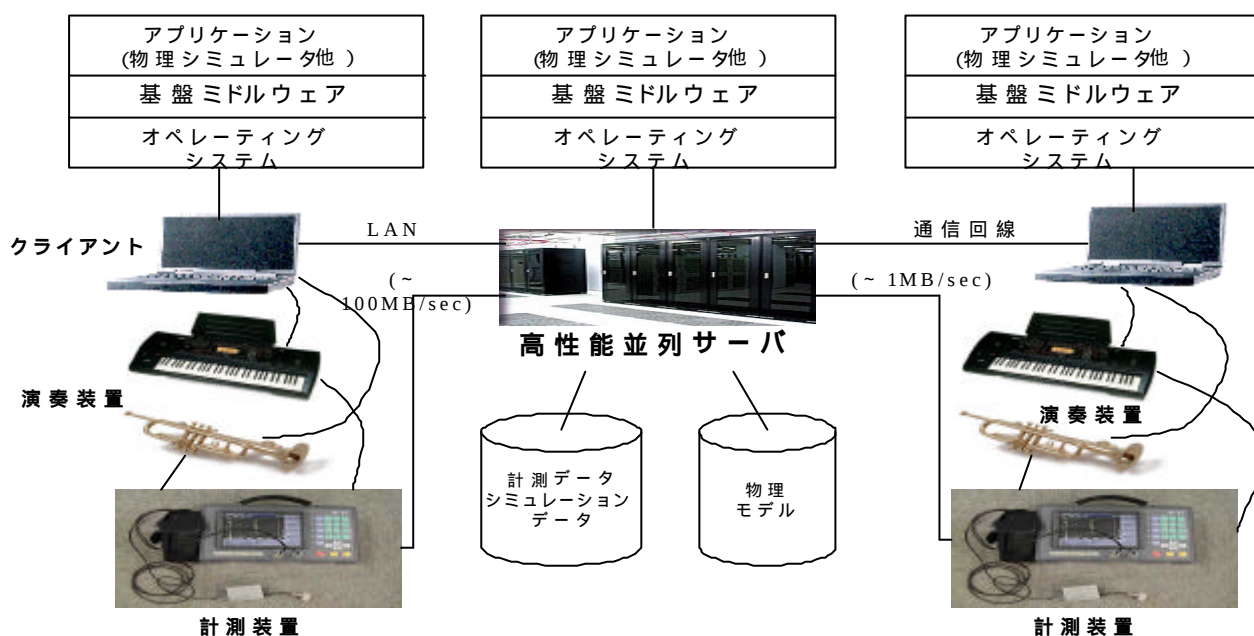


図1．楽器研究用PSEシステムの構成

参考文献

- [1] <http://www.top500.org/>
- [2] <http://www.jpgrid.org/>
- [3] 村上和男：“楽器の設計・製作過程と音色形成”，日本音響学会講演論文集 2-7-3, pp.807-810, 2003.3
- [4] たとえば日本音響学会音楽音響研究会の諸資料集
- [5] G. Weinreich：“The Coupled Motions of Piano Strings”，Scientific American, 240, No.1, pp.94-102, 1979
- [6] N. Fletcher, T. Rossing：“The Physics of Musical Instruments”，Springer, 1998
- [7] 小林繁夫：“振動学”，丸善株式会社, 1994
- [8] 菊池文雄：“有限要素法概説[新訂版]”，サイエンス社, 1999
- [9] 澤嶋友輔, 梅谷征雄：“コンポーネント指向可視化対話シミュレータの分散実行”，第5回問題解決環境ワークショップ論文集 pp.14-19, 2002
- [10] 後藤知一, 梅谷征雄：“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”，第6回問題解決環境ワークショップ論文集, pp.143-148, 2003
- [11] 柘植敦司, 梅谷征雄：“有限要素法アクリル板シミュレーションにおける固有値補正の試み”，第6回問題解決環境ワークショップ論文集, pp.149-154, 2003

表 1 . 物理シミュレーションにおける演算数とデータ転送数の見積り ($O()$ はオーダー)

計算法	時間ステップ あたり 演算数	初期演算数	単位時間あたり データ転送数
直接過渡解析	$O(n)$ $C1 \times n$	—	可聴化 $n \times fs$ 可視化 $n \times fv$
モード重ね 合わせ法	$O(n) \times m$ $(C2 \times n \times m)$	モード求解 $O(n^2) \times m$ $C4 \times n^2 \times m$	
インパルス応 答合成法	$O(l) \times ch$ $(C3 \times l \times ch)$	インパルス応答計算 $O(n) \times l$ $(C5 \times n \times l)$	可聴化 $ch \times fs$ 可視化 $ch \times fv$

n : 有限要素数、 m : モード数、 l : インパルス応答の長さ
 ch : インパルス応答の数、 fs : 可聴化サンプリング周波数、
 fv : 可視化サンプリングフレーム数、 $C1 - C5$: 比例定数

表 2 . 駒響板シミュレーションの要求能力と必要資源

モード	計算法	要求能力		必要資源	
		演算 / 秒	データ転送 (B / 秒)	プロセッサ台数	ネットワーク種別
可聴化モード	直接過渡解析	1.32×10^{11}	10.6×10^9	~ 1000	(NA)
	モード重ね合わせ法	5.28×10^{12}		~ 10000	
	インパルス応答合成法	1.05×10^9	0.1×10^6	4	LAN/通信回線
可視化モード	直接過渡解析	1.32×10^9	4.8×10^6	6	LAN
	モード重ね合わせ法	5.28×10^{10}		~ 300	
	インパルス応答合成法	1.05×10^7	0.5×10^3	1	LAN/通信回線

プロセッサ : 2.8GHz , 10 クロック / 演算 , データ : 8B / データ ,
 $n = 30000$, $m = 400$, $l = 4000$, $ch = 3$, $fs = 44\text{KHz}$, $fv = 20$,
 計算時間ステップ = $1 / fs$,
 $C1 = 100$, $C2 = 10$, $C3 = 2$, $C4 = 0.1$, $C5 = C1 = 100$

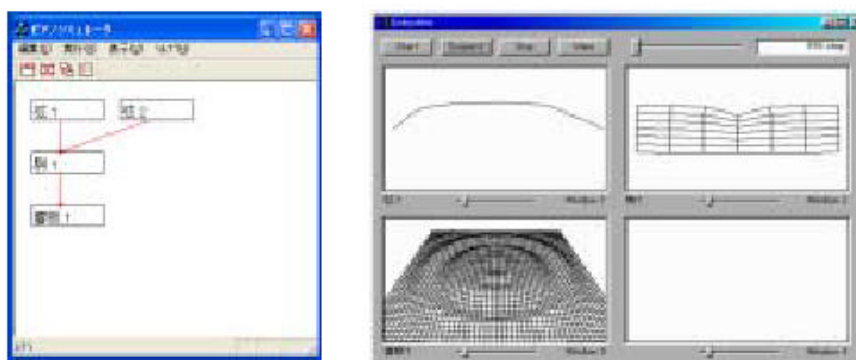


図 2 物理シミュレータのモデル構築・実効制御画面



図 3 駒・響板の要素分割例

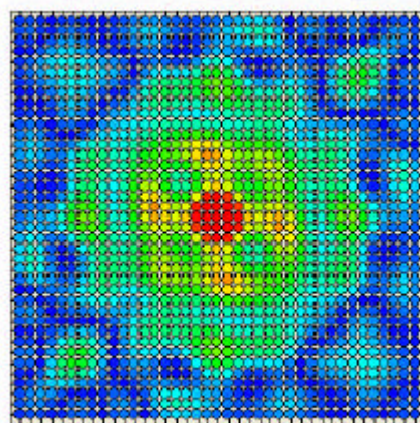


図 4 . Visual Trace 例

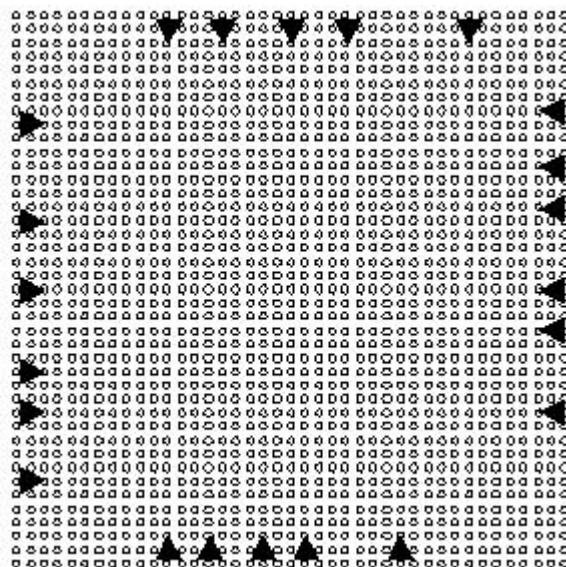


図 5 固有値補正に使用する節点位置の表示例