

# 実時間固有値解析による対話的な鉄琴のデザイン

Designing Custommade Metallophone with Concurrent Eigenanalysis

梅谷 信行 高山 健志 三谷 純 五十嵐 健夫\*

**Summary.** 本稿では自由な形状の鉄琴をデザインするための対話的なシステムを提案する。通常、鉄琴を構成する個々の音板は、それらをバチで叩くまではどのような音を出すか知ることができない。そのため、任意の形の音板をデザインすることは難しく、ほとんどの鉄琴の音板の形状は音高を解析的に求めることができる長方形に限られてきた。本研究では対話的な形状編集の最中に、その形状をした音板の固有値解析を実時間で行うことで、音板を叩いたときの音をリアルタイムにフィードバックするシステムの開発を行った。このシステムを用いることで、目的の音の出る音板の形を自由に設計することができる。ユーザテストによって、鉄琴に関する知識を持たないユーザでも、本システムを使うことで、正しい音階をもった音板を自由にデザインできることが確認された。本稿で提案する実時間の固有値解析と対話的な形状編集の融合という概念は、鉄琴以外にも様々な楽器のデザインに応用できる可能性がある。

## 1 はじめに

近年、有限要素法などの物理シミュレーションは人工物の設計に欠かすことができないものとなっている。しかしながら Computer Aided Engineering(CAE) と呼ばれる設計用途の数値解析システムの多くは与えられた設計をオフラインで評価するツールに過ぎない。一般的にそれらは設計が要求仕様を満たすかどうかを調べるのみに使われ、設計の改善を支援するものではなかった。そこで我々のグループではモデリングの作業中にオンラインの数値計算により、対話的かつリアルタイムにフィードバックを返すことで、これまでに難しかったデザインを可能にする研究を行っている [17]。本稿ではその考え方を特に楽器のデザインに応用した例を紹介する。

アコースティック楽器はそれぞれ典型的な形や外見があり、外見に僅かな違いを持たせることは出来ても、基本的な形を大きく変えることはできない(例えば、ほとんどの鉄琴の音板は長方形である)。それらの形は長年の間に洗練されてきたものであるが、楽器自体をありふれた個性の無いものにしがちである。アコースティック楽器の形と音は互いに密接に関係しあっているため、デザインを大きく変更することは難しい。アーティストごとにオリジナルなデザインが使われることが多いエレキギターのように、個性やメッセージをその外見を通じて伝えることはアコースティック楽器を制作する上で大きな課題の

一つである。

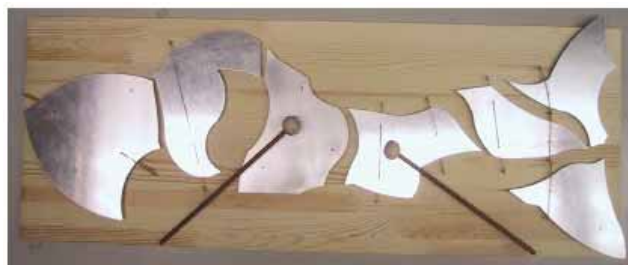


図 1. 魚型にデザインされた鉄琴

本稿では計算機の支援によりオリジナルの楽器をデザインするシステムを紹介する [15, 16]。楽器の発する音の予測に関する既存の研究と同じく、鉄琴の音は有限要素法 (FEM) を使って計算される。しかしながら、本研究のアプローチが画期的なのは、既存の研究では前もって決められた形状の上で FEM がなされるのに対し、本研究では連続的に FEM の計算を行いながらユーザが形状を編集できるようにした点である。オフラインのシミュレーションでは、形状を試作しては改善するループを何周も繰り返す必要であるが、形状編集集中の実時間のフィードバックにより、ユーザはより良いデザインを素早く簡単に模索することができる。このようなシミュレーションからの即座の応答は、形状とそれに起因して起こる現象との相関関係が直感的に理解できるという点で教育目的にも有用だと考えられる。

本稿では鉄琴の自由形状のデザインを題材として、我々の概念の有効性を実証する。ここで鉄琴とは金属の板 (音板) がバチで叩かれた際の振動によって、あらかじめ決められた音階の音の高さ (音高) を持つ音を発生させる楽器のことを指す。音板は通常四角

Copyright is held by the author(s).

\* Nobuyuki Umetani, 東京大学大学院, 五十嵐デザインインターフェースプロジェクト Kenshi Takayama, 東京大学大学院, 五十嵐デザインインターフェースプロジェクト Mitani Jun, 筑波大学, 五十嵐デザインインターフェースプロジェクト Igarashi Takeo, 東京大学大学院, 五十嵐デザインインターフェースプロジェクト

形であり、このような至極単純な形状に対しては目標とする音階に対して解析的に音板の寸法を決めることができる [4]。しかしながら、任意の形の鉄琴をデザインすることは形状と音との関係が直感的には理解できないので難しい。そこで対話的な形状編集と実時間の数値解析の融合というアプローチによって、このように物理的制約によって大きく拘束された形状のデザインを可能にした。図 1 に我々のシステムでデザインされた鉄琴の一例を示す。

本稿では、まずこの分野の既存研究を紹介し、次にユーザインタフェースと実装の詳細を説明する。その後、システムの数値解析とユーザスタディの結果を示し、最後にまとめと今後の課題について述べる。

## 2 関連研究

FEM による楽器の解析は既に確立した研究分野であり、例えばピアノ [8] やギター [1] や木琴 [2] などの様々な楽器の発音機構について多くの研究がなされている。Schoof [14] はカリヨンの最適な形状を求めるために有限要素法による固有値解析を用い、楽器のシミュレーションとデザインを結び付けている。しかしながら、ほとんどの固有値解析はオフラインの評価ツールとしてのみ使われ、形状編集との融合はされてこなかった。

本研究の目的は数値計算を使って設計プロセスを補助することである。本システムは細部の設計に入る前に数値解析を行うという点で、First Order Analysis(FOA) [11] と似たコンセプトを持っている。また、Masry と Lipson は FEM 解析機能を備えたスケッチベースの三次元モデリングシステムを開発し [9]、設計の初期段階で簡単に試行錯誤ができるシステムを開発した。しかしながら FOA も Masry らのシステムもモデリングした後解析するという意味で既存の CAD/CAE システムとあまり変わらない。これらとは対照的に、提案するシステムでは、数値解析はデザインの最中に行われる。

最後に本グループで行われている、専門的知識を持たないユーザによる実世界物体のデザインをシミュレーションを用いて支援するシステムについて研究の一部を紹介したい。Mori らは簡易の布のシミュレーションを用いたインタラクティブな縫いぐるみのモデリングソフトウェアを提案した [10]。Furuta らは薄肉シェル要素のシミュレーションに簡易な形状最適化を組み合わせたバルーンのデザインシステムを開発した [6]。また、Furuta らはモビールのようなキネティックアートが簡単にデザインできるシステムについても研究を行っている [5]。Saul らはインタラクティブな剛体のシミュレーションにより、座り方を簡単に試行錯誤できる椅子のデザインシステムを提案している [13]。

## 3 ユーザインタフェース

この章では鉄琴のデザインシステムをユーザの視点から記述する。図 2 に提案するシステムの概観を示す。システムは基本的には二次元の形状編集ツールであり、音板の形状をクリックとドラッグにより直接操作する。FEM の固有値解析はユーザの形状操作の最中に連続的になされ、予測された音高は数値やスピーカーからの音で視覚的・聴覚的にユーザにフィードバックされる。システムは音板の振動時の変形についても三次元 CG で表示する。このようにして、ユーザは目的の音が出ているかを確認しながら、インスピレーションの赴くままに形状を模索することができる。

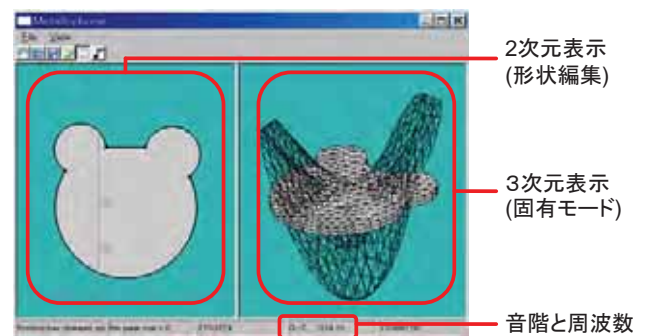


図 2. 鉄琴のデザインシステム。左は音板の輪郭形状で、右は振動モードを三次元的に示している。音高は数値と音の両方でユーザにフィードバックされる。

図 3 に本システムが提供するモデリングの機能を示す。音板の二次元形状は頂点によって接続された弧や直線の内側の領域として表現される。ユーザは頂点をドラッグしたり、弧をドラッグして半径を変えたりする。また、ユーザは頂点の追加や削除をすることができる。



図 3. 提案システムでの形状編集：点の追加・削除，円のドラッグ

システムは音板がバチで叩かれたときに発する音の高さを形状編集の最中に連続的に予測する。予測された音の周波数は画面上に数値として視覚的に表示され、また同じ周波数を持つ正弦波をスピーカーから鳴らすことで聴覚的にもフィードバックされる。ユーザが形状を編集するにつれて、スピーカーからの音や周波数の数値は連続して変化する。大きな鉄琴の音板は低い音を生み出し、逆に小さな板は高い音を生み出す傾向があるが、ユーザはこのよう一

一般的な性質を形状編集をしている最中に対話的に観察し学習することができる

システムは鉄琴の音板が振動する変形の様子を予測し、三次元CGを用いてユーザに表示する。実際の音板の変形は目に見えないほど小さいので、システムはこれを拡大表示する。実際に制作した音板を台に配置する際は、音板の変位が小さい箇所を台座に固定する必要があるため、変形の様子を表示することでユーザがどのようにして音板を固定するかを決める際に役に立つ。

システムは個々の音板のデザインのみを支援し、実物の制作はユーザが行う。図4に鉄琴の制作過程を示す。ユーザはファイルに板の輪郭形状情報を出し、ワイヤ放電加工機に読み込ませて板をデザインどおりに切断する。音板はバンドソーを使って手動でも切断することができる。実際の音板の加工には必ず誤差が生じるので、デザインした形を切り出しても予測された音が生じないことがある。このような場合は音板の縁をヤスリがけして調律する。システム内で形状を実際変えることで、どの辺を削るとどの程度音高が変わるのかを調べることができ、調律にも本システムは効果的である。最後にユーザは、システムが提示する音板の三次元的変形を参考に音板の固定箇所を決め、フェルトや輪ゴムなどを用いて、振動を邪魔しないように緩く台に固定する。

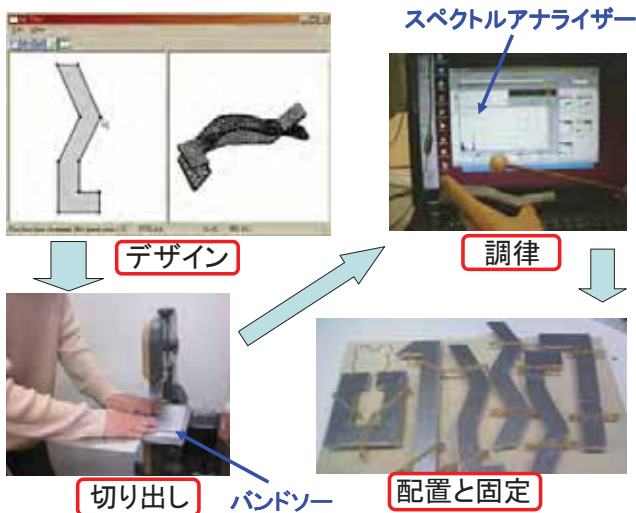


図4. 鉄琴を製作する過程：音板を切り、調律し、音板を木の板に固定する。

## 4 実装

### 4.1 FEMモデル

本システムの現在の実装では、音板は二次元の形状を垂直方向に押し出した三次元の線形弾性体としてモデル化されている。図5に本研究で用いられた

音板の有限要素法固有値解析のためのメッシュの様子を示す。三次元形状の内部にメッシュを生成するために、まず二次元形状の内部を三角形分割し、個々の三角形を法線方向に押し出したプリズムを分割することで四面体に分割した。生成されたメッシュ上でFEMの固有値計算を行い、音板の音高を予測した。固有値計算では音高が固有値として、振動による変形が固有モードとして計算される。シミュレーションのパラメータは異なる材料ごとに細かくキャリブレーションする必要があった。本研究では4ミリ厚のアルミの板を用いて鉄琴を作成した。

板の曲げに線形四面体要素を用いており、“Shear Locking”[18]と呼ばれる精度の悪化には注意が必要である。解析精度を保つために、四面体メッシュの過剰な歪を避けねばならない。音板は四面体で分割された二つの層に分割され、四面体要素の最も長い辺が、最も短い辺の二倍以内の長さに収まるように分割した。四面体の代わりに厚肉板要素を用いる方が適切だと思われるが、四面体要素は実装が簡単であり、十分な精度を持っていたので四面体要素を用いた。厚肉板要素を用いることは今後の課題である。

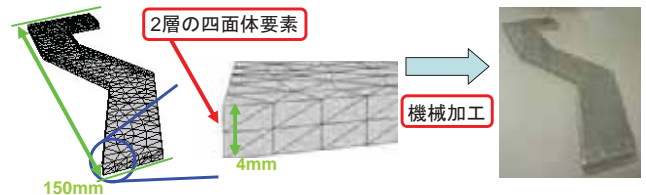


図5. FEMの離散化に用いられたメッシュ。二次元の三角形要素を突き出して作った四面体要素を2段に重ねたものを用いている。

### 4.2 メッシュの変形

ユーザが形状を編集している間、連続して音高をシミュレートするために、メッシュを形状に沿うように変形させる。メッシュをユーザが定める形に変形するために、システムは辺上の点をまず初めに移動させる(図6b)。辺上の頂点の移動のみでは、付近のメッシュに変形が集中してしまうために、なるべく三角形の辺が同じ長さになり、三角形が正三角形に近くなるように領域内部の節点の位置を動かす(図6c)。この辺の長さの均一化には、メッシュの変形が小さい場合はLaplace Smoothingを用い、ユーザによる境界の変更が大きく、メッシュが歪んでしまった場合はDelaunay Smoothingを適用して、節点同士の接続関係を変更することで歪をできるだけ小さくした。

### 4.3 音板の固有値解析

音板の振動を固有値解析する際には、音板が無重力空間中に外から力を受けずに何処にも固定されず

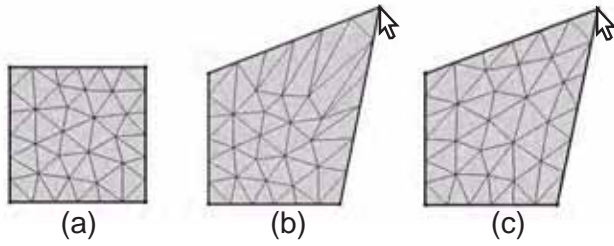


図 6. メッシュが均一になるように Laplace Smoothing を用いて頂点を動かす様子

に浮かんでいるとして境界条件を定めた (これによって剛性行列は特異になる) . 特異な行列に対する一般化固有値問題は航空宇宙分野でよく研究されている [3, 7] . 典型的なこの問題の解法は剛性行列を質量行列を用いてシフトし, ランチョス法やヤコビ法を使って固有値分布を求め, 個々の固有値に対して逆反復法を適用する方法である [12] が, 本研究では最も低い固有値のみを求めればよく, 固有値分布は不要なので計算の負荷を下げるができる . また, 剛性行列のカーネルが並進と回転のみであることに加え, 逆反復法の初期値として前回の計算結果を再利用できるという利点も加味して, 以下に詳しく示すような固有値解析アルゴリズムを採用した .

有限要素法離散化された固有値問題は次のように行列形式で書くことができる

$$\bar{M}\ddot{u} + Ku = 0 \quad (1)$$

ここで  $u$  は節点の変位ベクトルで,  $\bar{M}$  は集中質量行列であり,  $K$  は半正定値の剛性行列である . 変位  $u$  を空間的分布をもつ  $\phi$  と角速度  $\omega$  の調和振動子の積  $u(x, t) = \phi(x)e^{i\omega t}$  に分離することで次のような一般化固有値問題として表すことができる .

$$K\phi = \lambda\bar{M}\phi \quad (2)$$

ここで固有振動数  $f$  は  $f = \omega/(2\pi) = \sqrt{\lambda}/(2\pi)$  となる . 式 (2) の最も小さな固有値  $\lambda$  とそれに対応する固有ベクトル  $\phi$  を次に求める .

集中質量行列は  $\bar{M} = LL^T$  のように Cholesky 分解され, 式 (2) の両辺の左側から  $L^{-1}$  を掛けると, 次の標準固有値問題に帰着させることができる .

$$A\psi = \lambda\psi \quad (3)$$

ここで  $A = L^{-1}KL^T$  であり,  $\psi = L^T\phi$  である . この固有値問題は一般的な逆反復法に固有値 0 のモードを避ける手続きを加えた方法で解かれている . 問題設定により,  $A$  のカーネルは既知であり, 並進 3 自由度と回転 3 自由度である .  $L^T\phi_0^i (i = 1 \dots 6)$  に修正 Gram-Schmit 法を適用することにより  $A$  のカーネルを張る  $\psi_0^i (i = 1 \dots 6)$  の正規直交基底を得る . 次にカーネルの補空間に射影する次の射影演算

子  $P(v) = v - \sum \psi_0^i(\psi_0^i \cdot v)$  を定義し, これを用いて反復の各ステップにおいて解のベクトルを射影した後, 正規化を行う .  $A$  は特異な行列であるが, 小さな正の値  $\epsilon$  を  $A$  の対角に加えることで条件数を改善する . この逆反復法を用いて最小の非ゼロ固有値とそれに対応する固有ベクトルが計算されると, 式 (2) の固有値は  $\lambda_1 = \lambda' - \epsilon$  のようになり, 固有ベクトルは  $\phi_1 = L^T\psi_1$  のように計算される . 前回の計算結果を再利用することで解の収束は劇的に良くなる . 各反復ごとに処理はメインループにもどり, システムが収束計算を行っている間に, ユーザの入力を受け付けなくなることを防ぐ .

## 5 結果

### 5.1 システムの速度

表 1 に本システムの性能をまとめた . 計算速度はユーザの操作に依存するために, 一秒間あたりのフレーム数を形状の連続的な編集の最中の数秒間を平均して求めた . 4 章で説明したように, 歪んだ要素を避けるために辺の長さに上限を設けているので, 現在の実装では要素の数は板の面積に比例する . このために形状が大きいとシステムの色度が低下するが, 現在の計算速度は許容範囲の中だと考えられる .

Size (mm)	#Tetrahedra	FPS	Frequency (Hz)
100 × 30	2196	10.7	1931
150 × 30	3192	4.2	860
200 × 30	4524	3.3	494

表 1. 形状操作中のシステムの性能 . 2.5GHz の CPU で 2.0GB の RAM の PC でテストされた . 左から順に四角形の音板の寸法, 四面体要素の数, 一秒あたりの画面の更新頻度, 周波数 (Hz) .

### 5.2 アーティストによる試用

本研究ではプロのアーティストに依頼して, 開発されたソフトウェアを使って鉄琴をデザインしてもらった . アーティストは時間の制限なくこの作業を行い, もし要求されればソフトウェアの使い方に関する指示も自由に与えられた . 金属の板は, アーティストがデザインした形に従い, 放電加工機を使って切断された . 図 7 に C から B の音階に対応する音板の形を示す . 図 1 に個々の音板をデザインした後音階を調整して鉄琴を組み上げた様子を示す .

表 2 の上 3 行はそれぞれ, 目標とした音階の周波数, シミュレーションによって求められた周波数, 計測された固有振動数であり, 互いによく一致していることが分かる . さらに音板の音を目標に近づけるために手動で音板の縁を削ることで調整した (F のピースは十分に目標に近かった) のでこの作業が必要

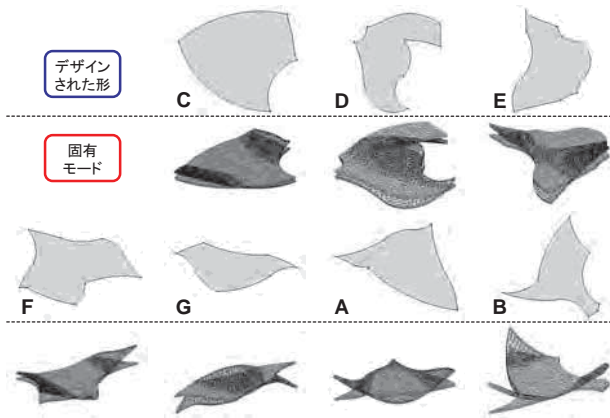


図 7. アーティストによってデザインされた鉄琴．上段は二次元の形状で，下段は三次元の固有モードを示している．

なかった)．表 2 の一番下の行は調整後の実際の固有振動数である．和音にならない倍音成分が音色を不明瞭にしてしまうが，趣味の範囲で使う分には問題ない程度の音質であることを確認した．

Scale	C	D	E	F	G	A	B
Targeted	523	587	659	698	783	880	987
Simulated	525	588	661	699	786	880	989
Measured	506	604	621	698	787	860	993
Adjusted	523	587	659	698	783	881	987

表 2. 本システムによる音高予測精度．表の行はそれぞれ，目標とした音階の周波数，調整前の音板の周波数，調整後の音板の周波数 (Hz) である．

主観的な意見を得るために，製作の後でアーティストにインタビューを行った．アーティストはデザインに約 5 時間かかり，ほとんどの時間が C と D の音板をデザインするのにかかったと報告した．これは低い音階は高い音階よりも大きな面積が必要であり，システムの反応速度を下げたからである．また，アーティストはデザインする上で最も難しかった事は，一つの音板をデザインする時に全体のデザインに注意せねばならなかったことであると報告した．全体のデザインを一貫した物にしつつ音高を目標の音階に一致させることは，個々の音板のデザインに対する大きな制約であり，本システムが無ければ鉄琴をデザインすることは不可能だったとアーティストは述べた．最後にアーティストは形状と音高の関係は，ユーザスタディを終えた後でも依然として理解が難しいと述べた．しかしながらアーティストは，実験前は小さい音板ほど低い音を出すと思込んでいたが，実験後には小さい鉄琴の音板は高い音を生

成する傾向があると正しく学習できていた．

## 6 まとめ

本稿では，実時間の固有値計算を対話的な二次元のモデリングツールと組み合わせ，シミュレーションからのフィードバックを元に鉄琴の形状をデザインするシステムを開発した．アーティストによる試用を行い，このような難しいデザインが本システムにより簡単にできることが示された．

## 7 今後の課題

現在の提案したシステムは最小の非ゼロ固有値と対応する固有ベクトルのみを計算している．これは基底音を予測するには十分であるが，より正確に音色を再現するには高次の固有振動数の計算が必要である．音色の解析については今後の課題である．高次の固有振動数を解析するもう一つの興味深い応用として，異なる場所を叩くと異なる音階の音が鳴るスチールドラムのような鉄琴のデザインが挙げられる．

実時間の固有値解析による鉄琴の対話的デザインは，他の楽器のデザインにも応用できる．我々は今後の課題として，オカリナのような吹奏楽器のデザインへの応用することを考えている．この場合は音波の伝達に関する方程式の固有値解析が必要になるだろう．最後に実時間の FEM 解析による対話的デザインはより一般的な設計の問題に役に立つ可能性があり，楽器以外への応用も試みる予定である．

## 謝辞

本研究の一部は情報処理推進機構 (IPA) の末踏ユース 2008 年上期 (PM: 竹内郁雄) の補助のもとでなされた．アニメーターの辻田幸廣氏には魚型の鉄琴をデザインして頂いた．ここに感謝の意を表す．

## 参考文献

- [1] E. Bécache, A. Chaigne, G. Derveaux, and P. Joly. Numerical simulation of a guitar. *Computers and Structures*, 83(2-3):107–126, 2005.
- [2] J. Bretos and C. Santamara. Finite element analysis and experimental measurements of natural eigenmodes and random responses of wooden bars used in musical instruments. *Applied Acoustics*, 56(3):141–156, 1999.
- [3] H. Cox. Vibration of Missiles: Matric Formulation of the Problem Involving Free and Harmonically Forced Flexural Vibrations. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 33, 1961.
- [4] N. H. Fletcher and T. D. Rossing. *The Physics of Musical Instruments*. 6 1998.
- [5] Y. Furuta, J. Mitani, T. Igarashi, and Y. Fukui. Kinetic Art Design System Comprising Rigid Body Simulation. 2010.

- [6] Y. Furuta, N. Umetani, J. Mitani, T. Igarashi, and Y. Fukui. A Film Balloon Design System Integrated with Shell Element Simulation.
- [7] A. Jennings. Natural Vibrations of a Free Structure. *Aircraft Engng*, 34:81–83, 1962.
- [8] J. Kindel and I. Wang. Vibrations of a piano soundboard: Modal analysis and finite element analysis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 81:S61, 1987.
- [9] M. Masry and H. Lipson. A sketch-based interface for iterative design and analysis of 3D objects. In *Proceedings of Eurographics workshop on Sketch-Based Interfaces*, pp. 109–118, Dublin, Ireland, Aug 2005.
- [10] Y. Mori and T. Igarashi. Plushie: an interactive design system for plush toys. *ACM Trans. Graph.*, 26(3):45, 2007.
- [11] H. Nishigaki, S. Nishiwaki, T. Amago, and N. Kikuchi. First Order Analysis for Automotive Body Structure Design. In *ASME DETC*, 2000.
- [12] Y. Saad. *Numerical Methods for Large Eigenvalue Problems (Algorithms and Architectures for Advanced Scientific Computing)*. Manchester Univ Pr, 4 1995.
- [13] G. Saul, M. Lau, J. Mitani, and T. Igarashi. SketchChair: An All-in-one Chair Design System for End-users. *Fifth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, 2010(to appear).
- [14] A. Schoofs, F. Van Asperen, P. Maas, and A. Lehr. A Carillon of Major-Third Bells. I. Computation of Bell Profiles using Structural Optimization. *Music Perception*, 4(3):255–266, 1987.
- [15] N. Umetani, J. Mitani, and T. Igarashi. Designing Custom-made Metallophone with Concurrent Eigenanalysis. In *Proceedings of the Conference on New Interfaces for Musical Expression(NIME)*, 2010.
- [16] N. Umetani, J. Mitani, and T. Igarashi. 実時間固有値解析による対話的な鉄琴のデザイン. 情報処理学会論文誌「インタラクションの基盤技術、デザインおよび応用」特集, 2010年6月11日投稿済、現在投稿中.
- [17] N. Umetani, K. Takayama, J. Mitani, and T. Igarashi. Responsive FEM for Aiding Interactive Geometric Modeling. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 99(PrePrints), 2010.
- [18] O. Zienkiewicz, R. Taylor, and J. Zhu. *The finite element method: its basis and fundamentals*. Butterworth-Heinemann, 2005.

## 未来ビジョン

本研究を通じて我々が目指すのは、それぞれ好みにあったオリジナルな物を個人が自由にデザインできる社会である。私たちが普段手にする物は、大量生産された画一的な工業製品が大半である。消費者は、生産者が一般向けにデザインした物の中から、最も満足のできる商品を探して買うしかすべがない。我々の個々の要求はそれぞれ異なっており、それらを満たすことが未来のモノづくりに要求されている。

本稿では、専門知識のない初心者のために、コンピュータが賢く設計を支援するシステムを提案している。一般的に消費者はデザインする対象について知識や経験を持たないので、消費者がデザインに参加することは難しい。デザインに必要な知識や経験とは、平たく言えば、どのような設計をするとどのような結果が得られるのかという対応関係を把握することである。これらの対応関係は、様々な試作品を沢山作ってそれを試すことでしか身につけることが出来なかった。本研究では、設計の評価、検証目的で設計の後処理としてしか使われなかった数値解析技術を、設計プロセス自体の中に組み込むことで、何も知らないユー

ザーでも、インタラクションの中で設計とその結果に対する対応を学習し、設計することを可能にした。

デザインの対象が鉄琴である本研究は、応用できる範囲が狭いと思う人も多いかもしれない。しかし、シミュレーションからの実時間フィードバックを元に設計を改善するという概念は極めて一般的であり、あらゆる人工物の設計に役に立てることができる。本研究で特に鉄琴を用いているのは、音高を音階に合わせるといったデザインのゴールが明確な点や、シミュレーションが比較的容易である点や直感ではどのような結果が得られるのかが分からない点など、我々の概念を示すのに都合が良いであるからである。

鉄琴を対象として本概念の有効性が検証できたので、今後はもっと一般的な対象への応用を進めていきたい。光造形などの Rapid Prototyping 技術など近年の生産技術の発達は目覚しく、個別に違う物を安く作ることは可能になってきている。本稿で述べられたシミュレーションを元にしたインタラクティブな設計技術は、誰もがデザインに参加できる創造的な社会の実現の中心的な技術の一つとなるだろう。