

実時間固有値解析による対話的な鉄琴のデザイン

梅谷 信行^{†1,†3} 高山 健志^{†1,†3}
三谷 純^{†2,†3} 五十嵐 健夫^{†1,†3}

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実時間の固有値解析を行うことで、音板の形を自由に設計できるシステムの開発を行った。このシステムは、ユーザがデザインした音板が出す音をディスプレイ上の数値とスピーカからの音によって対話的に提示する。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、正しい音階を持った音板を自由にデザインできることが確認された。また、我々は科学博物館での展示も行い、教育用途としても有用であることを確認した。

Designing Custommade Metallophone with Real Time Eigenanalysis

NOBUYUKI UMETANI,^{†1,†3} KENSHI TAKAYAMA,^{†1,†3}
JUN MITANI^{†2,†3} and TAKEO IGARASHI^{†1,†3}

This paper introduces a method for the integration of real-time finite element eigenanalysis into interactive geometric editing. This facilitates the design of custom-made metallophones. The design of metallophones with arbitrary bar shapes is difficult due to the uncertainty involved in predicting the tone a shape will produce when struck with a mallet. Our method addresses this problem by running a real time numerical eigenanalysis during interactive geometry editing. It continuously presents predicted tones interactively to the user with both visual and audio feedback, thus making it possible to design a plate with any desired shape and tone. An informal study demonstrated the ability of a technically unsophisticated user to apply the system to complex metallophone design. We demonstrated the system in a science museum exhibition and observed that it is also useful for educational purposes.

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) と呼ばれる設計のため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すぎない。一般的にそれらは設計が要求仕様を満たしている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計算結果をフィードバックとして提示することで、形状とその形状の持つ特性の相関関係が把握し難いような人工物を対象にした、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¹⁾。本稿では、我々の概念を特に楽器のデザインについて適応した例について、楽器を作成する過程、システムのユーザインタフェース、科学博物館での展示も含めてさらに詳しく紹介する。

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、外見にわずかな違いを持たせることはできても、基本的な形を大きく変えることはできない(たとえば、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な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ので、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うえで大きな課題の1つである。

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提案する。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

†1 東京大学
The University of Tokyo

†2 筑波大学
University of Tsukuba

†3 JST ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクト
JST ERATO Igarashi Design Interface Project

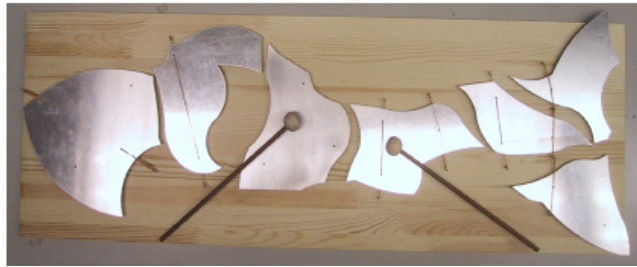


図1 魚型にデザインされた鉄琴

Fig. 1 A custom designed metallophone in the shape of a fish.

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。

本稿では我々の概念が、鉄琴の自由形状のデザインに応用できることを実証する。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高に対して解析的に音板の寸法を決めることができる²⁾。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）。

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すでに確立した研究分野であり、たとえばピアノ³⁾やギター⁴⁾や木琴⁵⁾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ら⁶⁾はカリヨンの最適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。

物理的な制約がある物のデザインに形状最適化手法が使われることがある。たとえばSmithらは最適化手法をトラス構造物のデザインに用いている⁷⁾。しかしながら、自動的な最適化手法には多くの課題が存在し、ユーザが望むデザインを得ることが難しい。問題の1つの例として、パラメータ空間が大きい場合には制約や評価関数を明確に数式で定義するのは困難であるという問題があげられる。本稿で提案する対話的な方法では、デザインする人が各自の好みをデザインに反映することができ、美的感覚などの数式で表現できない量も考慮できる点で優れている。

物理計算を対話的にするために、多くの手法が提案されてきた。1つの方法は前処理計算を使うことである。Jamesらは参照配置における行列を前処理計算することで対話的な物理計算を可能にした⁸⁾。彼らは前処理計算で求めたモードを用いた高速な弾性体のアニメーション生成についても提案している⁹⁾。もう1つの主要な研究として大変形を高速でロバストに計算するために非線形計算を近似する方法¹⁰⁾があげられる。しかし、これらの手法ではユーザは外力や固定方法などの境界条件を操作し、元になる初期形状は操作しない。本システムではユーザが初期形状を直接編集し、システムは新しい条件下での解を計算する。

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らは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¹²⁾、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には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。

本研究は、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ことを目的としたものである。同様の考え方に基づいて行われる研究がほかにもいくつか存在している。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¹³⁾。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¹⁴⁾。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¹⁵⁾。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¹⁶⁾。

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。現時点では音板に穴を開けることはできない。また、Bézier曲線などのより複雑な曲線を用いて、より多様な形状を扱えるようにすることは、将来に実装を試みたい。

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、スピーカからの音や周波数の数値は連続して変化する。聴覚的なフィードバックによってユーザが形状の編集操作にともなう音の変化を確認でき、視覚的なフィードバックにより、ユーザは正確な音の周波数を確認することができる。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、ユーザはこのような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、鉄琴の形状をより簡単にデザインすることができる。

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。実際の演奏において音板がバチで叩かれた際に発生する振動は音板に対して垂直な振動であり、音板に対して平行な振動は演奏の最中に支配的ではないと考えられる。しかし、しばしばシステムは最も低い周波数を持つモードとしてこのような水平な振動を計算することがあるので、ユーザは板に垂直な振動を得るようにつねに注意しながら音板の形状をデザインをしなければならない(図4)。

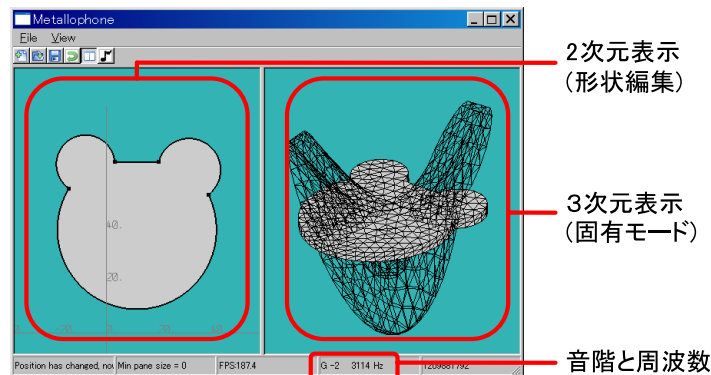


図2 鉄琴のデザインシステム。左は音板の輪郭形状で、右は振動モードを三次元的に示している。音高は数値と音の両方でユーザにフィードバックされる

Fig.2 Metallophone design software. The left window is used for the original 2D design, whereas the right window shows the analyzed eigenmode as 3D graphic. The tone is updated in real time with both audio and visual feedback for the user.

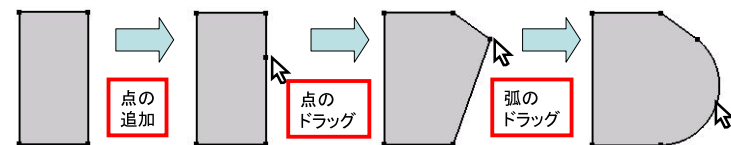


図3 提案システムでの形状編集：点の追加・削除、円弧のドラッグ

Fig.3 The modeling operations of our software: adding and deleting a point, dragging an arc and a point.

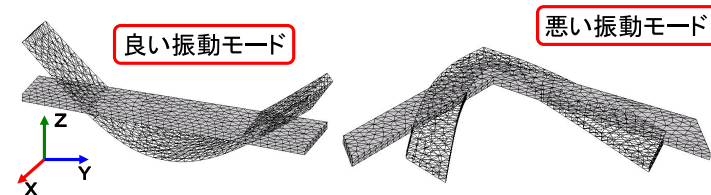


図4 変位が板の法線(z軸)に平行な垂直振動モード(左)、変位が板面(xy平面)上にある水平振動モード(右)
Fig.4 Perpendicular vibration mode is desirable (left), whereas in plane vibration mode is undesirable (right).

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5に鉄琴を制作する過程を示す。ユーザはファイルに板の輪郭形状情報を出力し、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。実物の音板を加工する際に必ず誤差が生じるので、デザインした形を切り出してもシミュレーションどおりの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。本システムは、どの辺をヤスリがけすると、どの程度音高が変わるのかを予測することができるので、調律する際にも有効である。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。

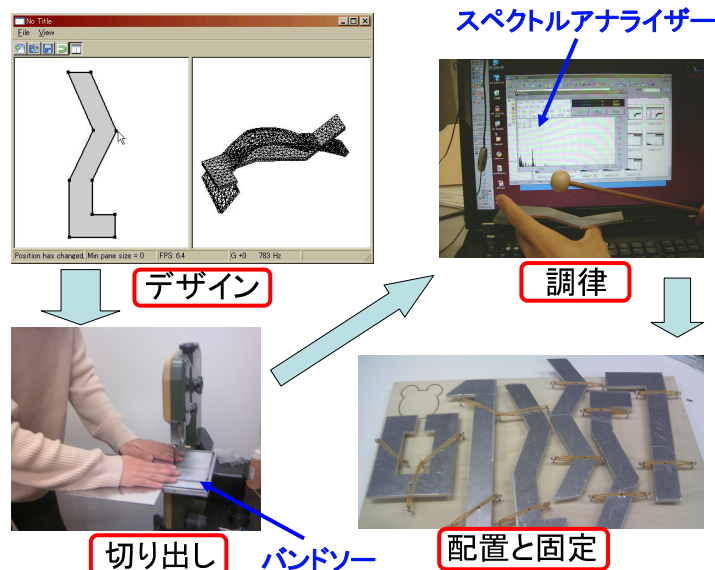


図5 鉄琴を製作する過程：音板を切り、調律し、音板を木の板に固定する

Fig. 5 The process of producing a metallophone: first, cutting the metal plate; second, adjusting the tone by rasping; finally, attaching the plate to a wooden board.

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6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いるので、“Shear Locking”¹⁷⁾と呼ばれる精度の悪化には注意が必要であり、解析精度を保つためには四面体メッシュの過剰な歪を避けなければならない。そこで音板は四面体で分割された2つの層に分割され、四面体要素の最も長い辺が、最も短い辺の長さの2倍以内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。

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

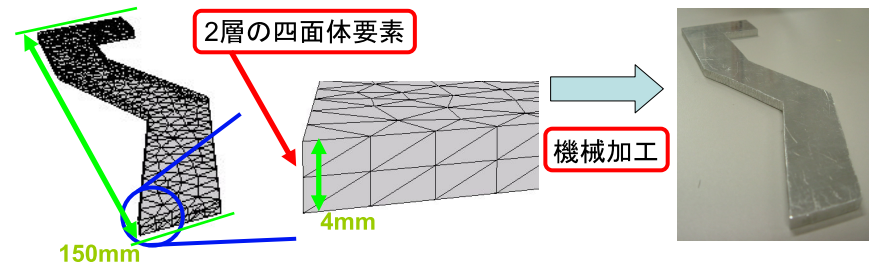


図6 FEMの離散化に用いられたメッシュ。二次元の三角形要素を突き出して作った四面体要素を2段に重ねたものを用いている

Fig. 6 The mesh used in FEM discretization. We use double-layered tetrahedral elements extruded from a triangular 2D mesh.

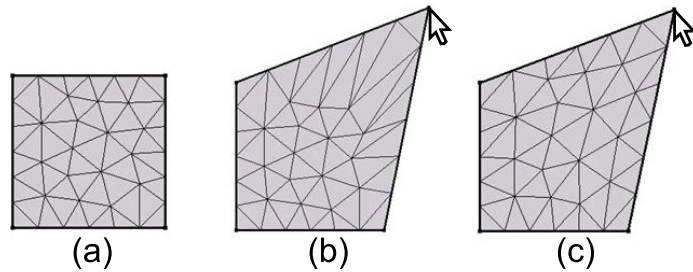


図7 メッシュが均一になるように Laplace Smoothing を用いて頂点を動かす様子
Fig. 7 The smoothing of mesh using Laplacian smoothing.

辺上の点をまず初めに移動させる(図7(b)). 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7(c)). 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頂点の位置を変えずに Delaunay 条件(各三角形要素の外接円の中に他の頂点が含まれない)が満たされるように辺の接続関係を切り替える操作を適用して, メッシュの歪みをできるだけ小さくした.

4.3 鉄琴の固有値解析

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どこにも固定されず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の分野でよく研究されている^{18),19)}. 典型的なこの問題の一般的な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²⁰⁾. これらの研究では固有値の分布を求める必要があるが, 本研究では最も低い固有値のみを求めればよく, 計算の負荷を下げる事ができる. 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 を空間的分布を持つ ϕ と角速度 ω 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 λ とそれに対応する固有ベクトル ϕ 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 ψ_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 $\mathcal{P}(v) = v - \sum \psi_0^i(\psi_0^i \cdot v)$ 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 ϵ 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, 1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. 現在の実装では要素の数は板の面積に比例する. なぜなら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からである. このために形状が大きいとシステムのを低下させるが, 現在の計算速度は許容範囲の中だと考えられる.

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. このアーティストはアニメーションを作ることを専門としており, 特に二次元のデザインに習熟しているために本システムの試用にふさわしいと考えた. アーティ

表 1 形状操作中のシステムの性能. 2.5 GHz の CPU で 2.0 GB の RAM の PC でテストされた. 第 1 の列は四角形の音板の寸法, 第 2 の列は四面体要素の数, 第 3 の列は 1 秒あたりの画面の更新頻度, 第 4 の列は周波数 (Hz) を示している

Table 1 The performance of our system during interactive manipulation, tested with a 2.5 GHz CPU and 2.0 GB RAM. The first column shows the size of the rectangular metallophone plates, the second shows the number of tetrahedral elements, the third shows the frame per second, the fourth shows the frequencies (Hz).

Size (mm)	#Tetrahedra	FPS	Frequency (Hz)
100 × 30	2,196	10.7	1,931
150 × 30	3,192	4.2	860
200 × 30	4,524	3.3	494

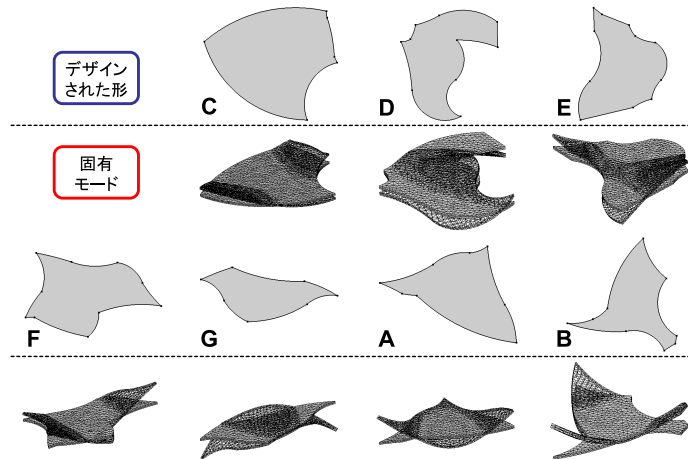


図 8 アーティストによってデザインされた鉄琴. 上段は二次元の形状で, 下段は三次元の固有モードを示している
Fig. 8 Metallophone shapes designed by an artist. The upper row shows the designed 2D shapes, whereas the lower row shows their analyzed eigenmodes in 3D.

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 8 に C から B の音高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に音高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

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

Table 2 Target, simulated, measured, and adjusted frequencies (Hz) of the metallophone for each note in the scale, illustrating the accuracy of our analysis.

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

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なかった). 3 章で述べたように本システムは, 辺を削ったときの音の変化を予測できるので, この調整の段階でも有効である. 表 2 の一番下の行は調整後の実際の固有振動数である.

このように音板が複雑な形状をしている場合, 基底音より高い成分の固有振動数は, 基底音の周波数の整数倍であるような規則を持たず互いに調和して聞こえない. しかしながら, 前記のとおり基底振動モードの節で台と固定することによって基底音を妨げることなく高周波成分を極力減衰させている. 結果として実際の鉄琴には, 音質の点では及ばないものの, 楽器としての演奏には問題のない範囲内であることを確認した.

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. これは低い音高は高い音高よりも大きな面積の音板が必要であり, 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うえで最も難しかったことは, 1 つの音板をデザインするときに全体のデザインに注意しなけれ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ものにしつつ音高を目標の値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, 本システムがな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. もう 1 つの難しかった点は, 形状を少し変更しただけで音高が大きく変化することであり, より高い解析の即応性が望まれていることが分かる. 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っていたが, 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.



図 9 未来館のイベントにおいて鉄琴がデザインされている様子

Fig.9 Exhibition in the Miraikan.

5.3 科学未来館における展示

日本科学未来館で行われた 2 回のイベント「友の会ウィーク」と「予感研究所 3」において本システムを出展し、述べ 15 日間の間、大勢の一般人の来館者に本システムを体験してもらった(図 9)。多くの来展者が本システムに触れたが、本システムは始終安定して動作していた。来展者は、普段は長方形である鉄琴の音板が、いろいろな形にデザインできることに驚いていた。また、普段は小さすぎて見られない音板の振動の様子が観察できて興味深いとの意見も聞かれた。また、形状を操作したときの音の反応が面白く長時間システムを触っている子供が多く見られた。問題点としては普通ではない形を試そうとするあまり、実際には加工できない極端に細い部分がある形状を作ってしまうことが多かった点があげられる。また、早くドラッグしたときに反応が遅れて止まってしまったように見えることや、音板を大きくすると遅くなってしまふなどの問題も見られた。

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もと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. 展 望

提案したシステムは最も小さい非ゼロの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 1 つの興味深い応用として、異なる場所を叩くと異なる音高の音が鳴るスチールドラムのような鉄琴のデザインがあげられる。

音板をモデル化するのに、現在の実装では四面体ソリッド要素を用いている。しかしながら、MITC²¹⁾のようなロッキングしない厚肉板要素はこの目的により即している。音色の予測はより多くの計算を必要とするので、厚肉板要素を用いたより良いモデル化が必要となるであろう。しかしながらソリッド要素には彫像のように三次元形状の影響が大きい鉄琴もデザインすることができるという利点もある。三次元形状を持つ鉄琴をデザインすることは今後の研究課題の 1 つである。

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に本研究を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 解析による対話的な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。

本システムそのものでデザインされた鉄琴は、5 章で述べたとおり、基底音のみしか考慮されておらず、通常の鉄琴を超える音質を持つ鉄琴をデザインすることは困難である。よって、本システムでデザインされた鉄琴を楽曲の音声収録用に使うことは、現状では不適當であろう。しかし、それにも増して自由な形状にデザインされた鉄琴が演奏されることの、視覚的なインパクトは大きいと考えられる。よって我々は、聴衆が演奏者を直接見ることができる生演奏で使われる鉄琴が、楽器デザイナーが演奏者の要望を汲んでデザインされることなどに、本システムを応用できるのではないかと考えている。

謝辞 このプロジェクトの一部は情報処理推進機構 (IPA) の未踏コース 2008 年上期 (PM: 竹内郁雄) の補助のもとでなされた。アニメータの辻田幸廣氏には魚型の鉄琴をデザインしていただいた。ここに感謝の意を表する。

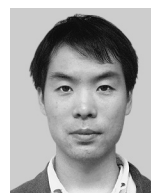
参 考 文 献

- 1) Umetani, N., Takayama, K., Mitani, J. and Igarashi, T.: Responsive FEM for Aiding Interactive Geometric Modeling, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.99, No.PrePrints (2010).
- 2) Fletcher, N.H. and Rossing, T.D.: *The Physics of Musical Instruments* (1998).
- 3) Kindel, J. and Wang, I.: Vibrations of a piano soundboard: Modal analysis and

- finite element analysis, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.81, p.S61 (1987).
- 4) Bécache, E., Chaigne, A., Derveaux, G. and Joly, P.: Numerical simulation of a guitar, *Computers and Structures*, Vol.83, No.2-3, pp.107–126 (2005).
 - 5) Bretos, J. and Santamara, C.: Finite element analysis and experimental measurements of natural eigenmodes and random responses of wooden bars used in musical instruments, *Applied Acoustics*, Vol.56, No.3, pp.141–156 (1999).
 - 6) Schoofs, A., Van Asperen, F., Maas, P. and Lehr, A.: A Carillon of Major-Third Bells. I. Computation of Bell Profiles using Structural Optimization, *Music Perception*, Vol.4, No.3, pp.255–266 (1987).
 - 7) Smith, J., Hodgins, J., Oppenheim, I. and Witkin, A.: Creating models of truss structures with optimization, *ACM Trans. Graph.*, Vol.21, No.3, pp.295–301 (2002).
 - 8) James, D.L. and Pai, D.K.: ArtDefo: Accurate real time deformable objects, *Proc. SIGGRAPH '99*, pp.65–72 (1999).
 - 9) James, D.L. and Pai, D.K.: DyRT: Dynamic response textures for real time deformation simulation with graphics hardware, *ACM Trans. Graph.*, Vol.21, No.3, pp.582–585 (2002).
 - 10) Müller, M., Dorsey, J., McMillan, L., Jagnow, R. and Cutler, B.: Stable real-time deformations, *Proc. 2002 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pp.49–54 (2002).
 - 11) Nishigaki, H., Nishiwaki, S., Amago, T. and Kikuchi, N.: First Order Analysis for Automotive Body Structure Design, *ASME DETC* (2000).
 - 12) Masry, M. and Lipson, H.: A sketch-based interface for iterative design and analysis of 3D objects, *Proc. Eurographics Workshop on Sketch-Based Interfaces*, Dublin, Ireland, pp.109–118 (2005).
 - 13) Mori, Y. and Igarashi, T.: Plushie: An interactive design system for plush toys, *ACM Trans. Graph.*, Vol.26, No.3, p.45 (2007).
 - 14) Furuta, Y., Umetani, N., Mitani, J., Igarashi, T. and Fukui, Y.: A Film Balloon Design System Integrated with Shell Element Simulation, *Proc. 31st Annual Conference of the European Association for Computer Graphics (EUROGRAPHICS)* (2010).
 - 15) Furuta, Y., Mitani, J., Igarashi, T. and Fukui, Y.: Kinetic Art Design System Comprising Rigid Body Simulation, *Computer-Aided Design and Applications (Special Issue on CAD in the Arts)*, Vol.7, No.4, pp.533–546 (2010).
 - 16) Saul, G., Lau, M., Mitani, J. and Igarashi, T.: SketchChair: An All-in-one Chair Design System for End-users, *5th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction* (2010). (to appear)
 - 17) Zienkiewicz, O., Taylor, R. and Zhu, J.: *The finite element method: Its basis and fundamentals*, Butterworth-Heinemann (2005).
 - 18) Cox, H.: Vibration of Missiles: Matrix Formulation of the Problem Involving Free and Harmonically Forced Flexural Vibrations, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol.33 (1961).
 - 19) Jennings, A.: Natural Vibrations of a Free Structure, *Aircraft Engng*, Vol.34, pp.81–83 (1962).
 - 20) 矢川元基, 青山裕司: 有限要素固有値解析—大規模並列計算手法, 森北出版 (2001).
 - 21) Bathe, K. and Dvorkin, E.: A formulation of general shell elements- the use of mixed interpolation of tensorial components, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.22, pp.697–722 (1986).

(平成 22 年 6 月 11 日受付)

(平成 23 年 1 月 14 日採録)



梅谷 信行

2009 年東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻修士課程修了。同年同大学院情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻博士課程入学。専門は数値シミュレーションとユーザインタフェース。



高山 健志

2009 年東京大学大学院情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻修士課程修了, 同年同専攻博士課程入学。専門はグラフィクスおよびユーザインタフェース。



三谷 純 (正会員)

2004年東京大学大学院工学系研究科博士(工学)。同年理化学研究所基礎科学特別研究員, 2005年筑波大学大学院システム情報工学研究科講師, 2009年同准教授。専門はコンピュータグラフィックスおよび形状モデリング。



五十嵐健夫 (正会員)

2000年東京大学大学院工学系研究科博士(工学)。2002年同大学院情報理工学系研究科講師, 2005年助教授。2007年よりJST ERATO研究総括。学術振興会賞, SIGGRAPH若手科学者賞等受賞。専門はユーザインタフェースおよびグラフィクス。