

物理法則に基づく聴覚と力覚の融合に関する研究

矢野 博明^{*1} 亀田 敏弘^{*1} 水谷 孝一^{*1} 岩田 洋夫^{*1}

Synthesis of Haptic and Auditory Senses Based on Physical Model

Hiroaki Yano ^{*1}, Toshihiro Kameda ^{*1}, Koichi Mizutani ^{*1} and Hiroo Iwata ^{*1}

Abstract – Currently most of virtual reality system with auditory feedback can produce good feel of presence to the users. In VR (Virtual Reality) environment, interactions with virtual objects are common events. Some systems provide sounds generated by interactions between virtual objects, although they are generated using modulation technique of prerecorded sounds. There is a limitation in that method. We should consider the sound generation method based on physical models. In this paper, we propose a method of synthesis haptic and auditory senses that is based on physical model. We have developed an auditory environment with haptic sensation. We equipped a speaker at the end effector of the HapticMaster. The FEM (Finite Element Method) is used to calculate the vibration of the virtual object. And the sound pressure data at the speaker position are calculated based on the vibration in real time. The effectiveness of our method is tested through the experiments by users.

Keywords : haptic interface, sound simulation, audio rendering, FEM

1. はじめに

私達は普段、足音や車の音などから人や車の移動状態を知ったり、音の反響で建物などの大きさを感じたり、会話によって情報伝達をおこなったりと、目から入ってくる視覚情報だけではなくさまざまな聴覚情報を利用して生活している。VR(Virtual Reality)空間においても音は視覚情報を補い、臨場感を作り出すための欠かせない要素である。すでに3次元音場の生成技術は建築、都市設計やゲームやカラオケなどのアミューズメントなどさまざまな分野で使われており、リアルタイムの3次元音場生成の研究も進められている [1] [2]。

ところで、私達は音源から単に聞こえてくる音だけでなく、物体とのインタラクションの結果生じた音を積極的に利用して世界を認識している。物の素材がプラスチックなのか金属なのかを知るためにそれをたたいて音を聞く。壁や物をたたいて空洞があるかなど内部構造を把握しようとするなど、よい例である。このような物体とのインタラクションの結果生じる音の呈示は、VR空間での臨場感の向上に重要な要素といえる。

また、物体とのインタラクションには力覚呈示が有効であるが、力覚と聴覚を積極的に利用した研究例はほとんどない。物体をたたいたときに手ごたえがあるのに、その場所から音がしないのは不自然である。こ

れらの点から、力覚と聴覚を同時に呈示することは、物体の認識やVR空間の臨場感の向上に非常に有効な手段であるといえる。

しかしながら、現在の3次元音場生成システムでは、実物体から実際に放射された音を録音し、周囲の環境に応じた効果を加えるなどしてそれを再生する機会が多い。このようなシステムではサンプリング音が用意されていない物体の音の呈示は困難である。さらに、音場そのものについても、インタラクションが頻繁に起こるユーザの手元の音源定位を固定のスピーカによっておこなうことは難しい。

そこで本研究では、バーチャルな物体とのインタラクションの結果生じる音を、物理法則に基づいて計算することで、任意の形状、物性の物体からの聴覚と力覚情報を呈示する手法を提案する。具体的にはバーチャルな物体とのインタラクションに力覚デバイスを用い、物理法則計算の手法として有限要素法により変形および振動を計算し、物体の微小振動によって発生する音を計算する。その音を力覚デバイスの効果器に取り付けた小型スピーカで再生することで、ユーザの手元のバーチャルな物体からの音を発生させたのと同様の効果を作り出している。このシステムを用いて実物体との比較、被験者による主観評価により、本手法の有効性を検証した。

*1: 筑波大学

*1: University of Tsukuba

2. 従来の研究

3次元立体音場生成システムはさまざまなもの [1] [2] がすでに開発されている。早稲田大学では、3次元音空間伝送システムが開発されている [3]。これは複数の音源の位置情報と音源の数の伝送路をもちいて遠隔地の音空間情報を収集し、キルヒホッフ積分に基づく波面合成手法によって遠隔地で3次元音空間を再生するものである。音源の定位や壁や床などによる反射音等が考慮された高い臨場感が得られる優れたシステムであるが、VR空間でのバーチャルな物体とユーザとの相互作用により発生する音は対象になっていない。

電子楽器では物理音源モデルと呼ばれる楽器の物理特性を元に楽器音を計算する手法 [4] の研究が始まっている。たとえばピアノやフルートの振動方程式や筐体の共鳴等を考慮して音を計算により生成する。しかしながら個々の楽器に特化された定式化がおこなわれており、さまざまな形状やたたく場所による変化については考慮されていない。

ブリティッシュコロムビア大 [5] では、このようなたたいた場所による音の変化を考慮したシステムが構築されている。これはポリゴンと同じようにバーチャルな物体の面を膜の集合として近似し、物体同士の衝突などで膜に加わった衝撃力による膜の振動パターンを計算し、音を発生させるものである。ここでは、膜という物理モデルに基づいた計算をおこなっているが、物体がサーフェースモデルとして扱われており、ポリウムモデルは対象になっていない。そのため、物体の内部構造（空洞がある等）の考慮や大変形への対応が困難である。また、力覚呈示はサポートされていない。

力覚と聴覚を組み合わせた研究例としては東京理科大学の聴覚情報と力覚情報の呈示の間に時間的な遅延がある場合の影響を定量的に測定したものがある [6]。VR空間においてバスケットボールのドリブルを行う際に、あらかじめ録音しておいた床でのボールのバウンド音とボールと手の接触音を呈示する。聴覚呈示に 120ms の遅延があるとユーザが遅延を知覚できるという有用な知見が得られている。しかしながら音の発生機構については特に言及されていない。

本研究は、バーチャルな物体からの反力を呈示しながら同時に接触したときの音を計算する。物体の微小振動を有限要素法により求めているため、任意の形状および物性を有するバーチャルな物体に対応できる。変形に対しても有効である。また、フォースディスプレイの先端に小型スピーカを設置し、スピーカを音源のすぐそばに持っていくことで定位の問題もクリアしている。これらの点で本研究は新規性があるといえる。

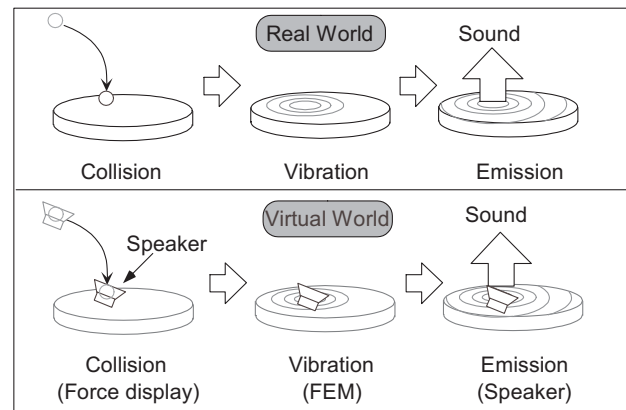


図1 AudioHapticsの基本構成
Fig. 1 basic configuration of AudioHaptics

3. システム構成

3.1 基本概念

音は空気の圧力変動のことで、その発生原因は物体同士の衝突や摩擦等の「物体の振動によるもの」と、風切り音や排気音、爆発音などの「空気力学的な気流の特殊な効果」がある [7]。本論文では特に物体とのインタラクションで頻繁に起こる振動による音の発生を取り扱う。物体の振動による音の発生では、「物体同士の接触」「物体の変形、振動」「振動による空気の圧力変動（放射音）の発生」という過程をとる（図1）。

本研究では、音の発生を物理法則モデルを用いて忠実に再現するため、変形や振動の計算に有限要素法を用いる。さらに物体表面の振動が減衰せずに空気の粒子速度になると仮定して、スピーカの位置の速度ポテンシャルを求め、音圧の計算をおこなう。

しかしながら現在の小型計算機の能力ではリアルタイムで挙動計算をすることは不可能であるため、物体をたたいた時の挙動をあらかじめ計算し、物体をたたいた位置ごとに、各時間ステップでの各点の速度をファイルに保存する。フォースディスプレイによってバーチャルな物体とインタラクションが発生した場合には、この速度データとスピーカの位置情報から出力すべき音を計算する。VR空間と実空間の座標が一一対応している場合、インタラクションによる音が再生されている間、スピーカはその物体近傍にある。ここでは、発音体でもあるバーチャルな物体が人間の頭に比べて同等以下のサイズの場合は、実質的にスピーカによりその物体からの音を再現されているものと考えた。

3.2 ハードウェア構成

本システムのハードウェア構成を図2に示す。フォースディスプレイは日商エレクトロニクス社製 Haptic-Master を用いることとした。これは私達が物を叩く場合手だけでなくペンやハンマーなど道具を使って叩

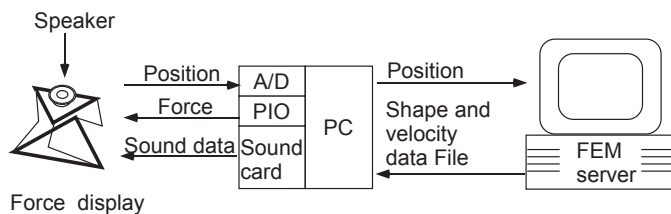


図2 AudioHapticsのハードウェア構成
Fig.2 hardware configuration of AudioHaptics

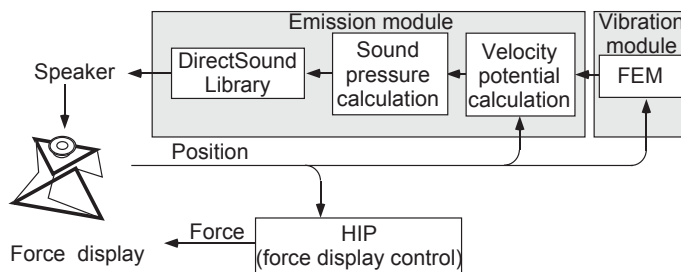


図3 AudioHapticsのソフトウェア構成
Fig.3 software configuration of AudioHaptics

くことが多い。指や手は複雑な変形をしながら物体と接触するため衝突シミュレーションの場合わけの数も爆発的に増加する。そこで本論文では、ペン先など道具を媒介としてバーチャルな物体と接触することを前提としたためである。PCはPentium -533EBMHz, メモリ128MB, DirectSound アクセラレータボードとしてSP401F YAMAHA 724 PCI サウンドカードを使用した。スピーカにはフルレンジ対応の3.2 4.5W, 直径38mmのものを使用し, HapticMasterのグリップを取り外してスピーカをグリップの位置に取り付けた。

3.3 ソフトウェア構成

本システムのソフトウェア構成を図3に示す。振動の計算にはSolaris7上で動作するLivermore Software Technology社のLS-DYNA [8]という商用ソフトウェアを用いて物体の挙動を計算する。PCのOSはWindows2000で, DIRECTSOUNDを用いてPCM方式で音声信号を発生させアンプを通してスピーカを駆動している。フォースディスプレイの駆動にはHIP [9]をWindows2000に移植したものを利用した。

3.4 シミュレーション手法

本研究では、シミュレーションを物体の挙動計算をおこなう有限要素モジュールと、放射音を計算する放射音計算モジュールとに分けて考えることができる。

有限要素モジュールでは、次のような計算をおこなっている。有限要素法では、収束計算を行う陰的解法と時間刻みを微小にして収束計算を行わない陽的解法がある。本研究のような振動による音を計算する場合に

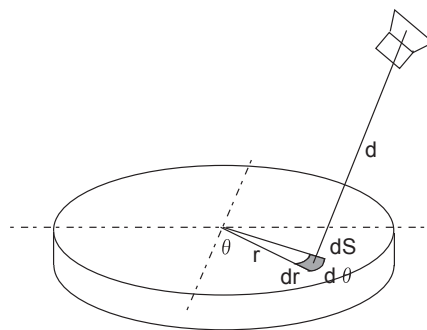


図4 速度ポテンシャルの計算手法
Fig.4 calculation method of velocity potential

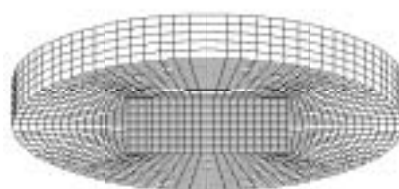


図5 使用したメッシュデータ(裏側から見たもの)
Fig.5 backside of mesh data of the thin plate

は、0.1ミリ秒以下の細かい時間ステップで解を求める必要がある。したがって陽的解法を用いた衝突計算ソフトウェアLS-DYNAを使用した。LS-DYNAでは物体形状、物性および衝突場所を指定し、各時間ステップでの物体の各点の速度データをファイルに出力させる。

放射音計算モジュールでは、ファイルから各時間ステップの各点の速度データを読み込み、スピーカから出すべき音をリアルタイムで計算する。

物体の振動がそのまま空気の振動に変換されると仮定し、物体の各微小領域の速度を全領域にわたって積分し、スピーカ位置での速度ポテンシャルを計算する(図4)。これを時間微分して、音圧を求める[7]。

ここで、中央が固定された半径50mm, 厚さ12mmのアルミニウム製ディスクの中心から25mmの点をたたいた時の計算を例に考える。これは、計算簡略化の都合上形状の対称性を考慮して中央一点固定とし、一個の小型スピーカで放射音を呈示するために人間の頭と同等以下の大きさにする必要があることと、有限要素法が金属の変形計算を得意としていること、次章の比較実験の際に実物を製作しやすいことを考慮して決定した。図5に示すメッシュデータとして有限要素解

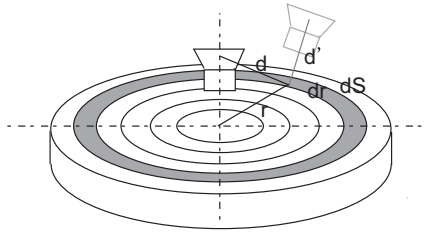


図6 アルミディスクの場合の計算手法
Fig.6 example of aluminum disk

析(アルミのヤング率は 7.03×10^{10} Pa, ポアソン比 0.33)をおこない, 各時間の各点の速度データをファイルに出力する. PC のプログラム起動時にそのファイルを読み込み, 物体をたたいたと判断されると, スピーカの位置での速度ポテンシャル ϕ を計算する. ϕ は,

$$\begin{aligned}\phi(t) &= \int d\phi \\ &= \sum_S \frac{v(t - \frac{d}{c}, r, \theta)}{2\pi d} \Delta S \\ &= \sum_r \frac{v(t - \frac{d}{c}, r) \pi((r + \Delta r)^2 - r^2)}{2\pi d}\end{aligned}\quad (1)$$

となる. ここで ϕ は速度ポテンシャル, v は微小面積 dS の速度, d は微小面積 dS とスピーカの距離, r はディスク中心からの距離, θ は中心から見た dS の方向を表す. 式 (1) で計算された ϕ から, スピーカ位置での音圧を求めると

$$\begin{aligned}p(t) &= \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \\ &= \rho \frac{\phi(t) - \phi(t-1)}{\Delta t}\end{aligned}\quad (2)$$

となる. p は音圧, ρ は空気の密度で $1.184 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (25°C のとき [10]), Δt は $\frac{1}{44100}$ (s), $0 \text{ mm} < r < 50 \text{ mm}$ である.

アルミの場合は, 放射音の周波数が数 kHz になるのでサンプリングレートは 44.1 kHz とする. ただし, 本来ならばディスク上の各微小面積からの距離を求めて速度ポテンシャルを計算する必要があるが, 膨大な計算量になりリアルタイムで計算が終了しない. また使用メモリ量も増えるため図 6 ように同一円周上では v は同一とする簡略化をおこなった. 呈示データの更新は, 力覚呈示はおよそ 1ms 毎, 聴覚呈示は 63ms 毎に行なっている. なお, この計算では周りの環境による反射音等は考慮に入れていない.

4. 実物体とシミュレーションの比較実験

シミュレーションの妥当性を示すために, 半径 50mm 厚さ 12mm の実物のアルミニウムディスクを用いて衝突音の収集, 比較実験を行った. 図 7 はその概略図である. シミュレーションと同じ形状のアルミニウムディスクを中央で支持し, 半径 6mm の鋼球をディスク面

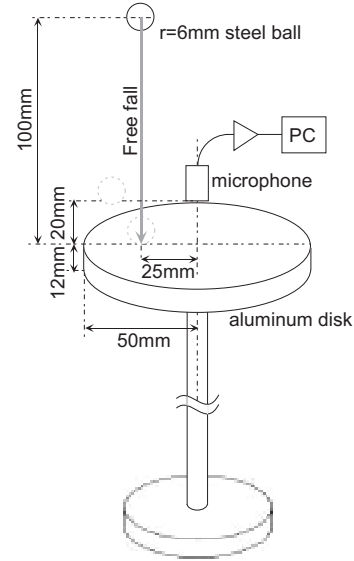


図7 測定実験器具構成
Fig.7 experimental configuration

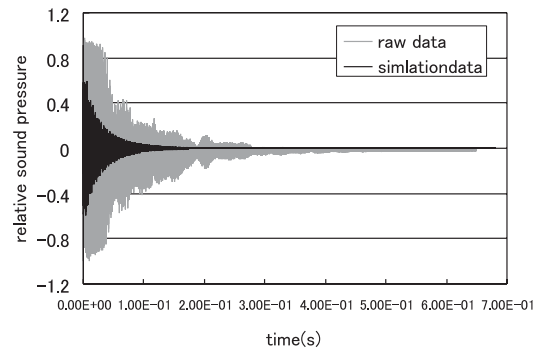


図8 シミュレーションと実測値での音圧の時間変化の比較

Fig.8 comparison of time response of sound pressures with simulation and measurement

から 100mm の高さから衝突速度が試行毎に同じになるよう自由落下させ, ディスクから発生する音を集音する. 集音に用いた小口径のコンデンサマイクロフォンディスクは無指向性であり, 半径 50mm のディスク全面からの音を効率的に収集できる. フォースディスプレイへのスピーカの実装を考慮して, マイクロフォンの位置は, これに対応するディスク面から 20mm 上方に設置した. 電気信号に変換された音はサンプリング周波数 44.1kHz, 分解能 16bit で PC 上に記録する. 鋼球の落下位置はディスクの中心から 25mm のポイントである.

図 8 は衝突音の時間応答を同じ条件でおこなったシミュレーション結果とともに示したものである. 衝突によって発生したインパルスの歪がディスク形状に対応する機械的境界条件下での過渡的な挙動を経て, 結果的に余韻の長い応答となったものと考えられる.

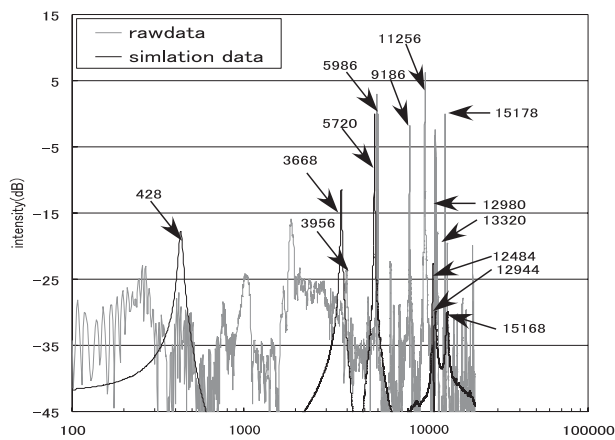


図9 シミュレーションと実測値での音圧の周波数特性の比較

Fig.9 comparison of power spectrum of sound pressures with simulation and measurement

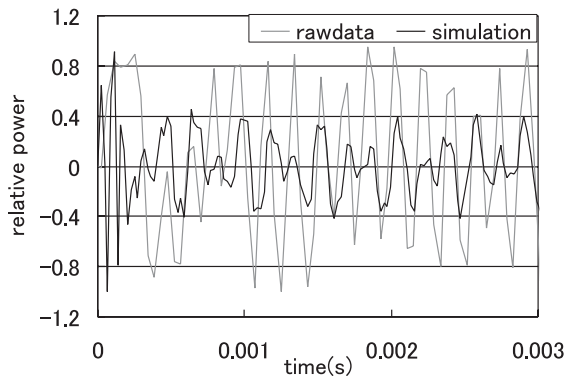


図10 シミュレーションと実測値での衝突直後の音圧の時間変化の比較

Fig.10 comparison of initial time response of sound pressures with simulation and measurement

実験結果で最初の約40msの間、減衰量が少なく、振幅一定で継続しているのは、鋼球がディスクに衝突して完全に跳ね返るまでに若干の時間を要したためである。シミュレーションでは完全なインパルスとして入力しているため、図にはその差異が生じている。しかしそれ以降の包絡線はシミュレーション結果に対応しており、概ね妥当性のある結果となった。シミュレーション結果は、先にも述べたようにリアルタイム性を追求するために計算量を減じたため、実験結果と一対一での比較はできないが、減衰の状況等はよく対応していると思われる。

ここで示している衝突音モデルの場合、実質的な音の継続時間は0.5s以下である。認識対象がクリック音かトーン音等の継続時間によっても異なる[11]が、一般的に聴覚によってリアルに認識されるか否かは、

音の振幅特性よりは音の周波数特性の方が重要な要素である[12],[13]。このために、次にスペクトル解析を行った。

図9は、図8に対応する形で示した衝突音のスペクトルである。シミュレーション結果では、5.720kHzに大きなピークがあり、この他に3.668, 12.484, 12.944, 15.168kHzの小さなピークが存在する。実験結果には、シミュレーション結果の大きなピークに対応する5.986kHzにピークが存在する。約5%の誤差を生じたがこれは用いた材料や定数の差異によるものと考えられる。この他に3.956, 12.980, 13.320, 15.178kHzの応答も対応して存在していることが確認できる。これらの応答は輪郭振動モードの一種であると考えられる。6kHz弱の大きなピークのほかにシミュレーション結果と対応する応答もあるが、特に9.186, 11.256kHzの応答はシミュレーション結果には現れていない。これはシミュレーションにおいて同一円周上では、物体表面の速度が同一とする簡略化を行ったこと等のため、実際に発生する音響波の複雑な挙動をすべて表現できていないことが原因であると考えている。また、1kHzと2kHzにピークを持つ低域側の応答は6kHz弱の大きなピークに比べて20から30dB以下のレベルであり、音色の認識には大きな影響を与えていないと考えられる。

図10は、図8と同じ時間応答のうち最初の3msだけを拡大したものであるが、図9のスペクトル解析結果と併せて分析すると次のようなことが分かった。即ち、実験結果からは時間応答信号が主として5.986kHzの周波数成分から形成されていること、シミュレーション結果からは最初の0.3msまでに12kHzを超える高周波成分が存在するが、それ以降は、実験結果と同じ周波数帯である5.720kHzが支配的で、僅かに3.668kHzの影響が認められること等である。何れにせよ最初の応答には実験結果、シミュレーション結果ともに図9のところでも考察したように6kHz弱の成分で形成されていることが分かった。

5. 内部構造が異なる物体の識別実験

本手法ではボリュームモデルによる有限要素計算を物理法則計算に用いている。これにより、同じ表面形状でも内部構造の異なる物体からの音を呈示できるはずである。そこで、同じ表面形状で、中空と中実になっているバーチャルな物体を定義し、それをたたくことで違いをユーザが識別できるか調べる実験をおこなった。

直径100mm、厚さ25mmのアルミ製ディスク2つを定義し、片方の裏側には内径80mm、深さ13mmのくぼみを定義した。それぞれの表側の面の中心から25mmのところをたたいた時の音を被験者に呈示し、音の違いからどちらが中実でどちらが中空のものを答えさ

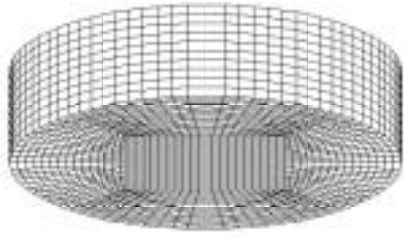


図 11 裏から見たアルミディスクのメッシュ
Fig. 11 backside of mesh data of thick aluminum disk

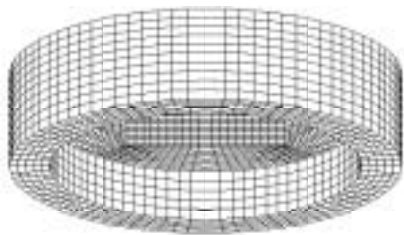


図 12 裏から見たくぼみ付きアルミディスクのメッシュ
Fig. 12 backside of mesh data of aluminum disk with hollow

せた。実物と同じ大きさの円盤を定義し、HapticMasterの効果器のめり込み量に比例した反力を呈示した。物体にめり込んだと同時に聴覚データをスピーカより出力した。実験で用いた円盤のメッシュデータを図 11, 12 に示す。音圧は 3 章で述べた方法で計算した。たたき方やたたいた位置による違いは考慮しておらず、スピーカの位置のみに依存した音と力覚データを出力した。被験者は 6 名でそれぞれ 6 試行おこなった。物体データの切り替えはキーボードによりおこなった。ただし、被験者には今回使用したモデルのようなアルミディスクをたたいた時の音に対する原体験がなかったため、実物を用意し実際にそれをたたいた時の音をあらかじめ聞かせた。この音の特徴としては、中実のものの方が中空のものより高い音が発生する。シミュレーションの結果でも同様の傾向が見られた(図 13)。

この実験における被験者の正解率は 97%であった。これより本手法によって中実か中空かをスペクトルの

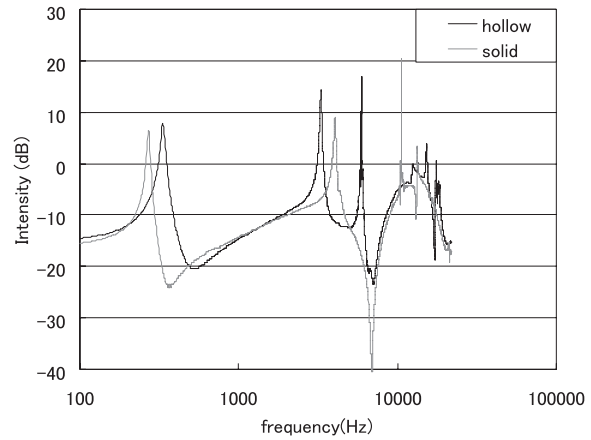


図 13 (25,0,1) の位置の音のパワースペクトル
Fig. 13 power spectrum of the sound pressures

に見ても音の違いを表現でき、それをユーザがほぼ完全に識別できることが明らかになった。また、被験者からは、中実のものは高くすんだ音、中空のものはそうでない音として判断したという感想が得られた。

本稿では、シミュレーションにおいて同一円周上の物体表面の速度が同一とする簡略化を行った。その結果、約 6kHz 以下に現れる大きなピークには大きな影響はなかった。大きなピークである 6kHz の応答を中心に、実際には発生している低周波側の約 2kHz の応答や 10kHz を超える高周波の応答を十分に再現することはできなかった。しかしながら、識別実験において正解率が 97%であったのは、低周波側では、6kHz のピークに比べてレベルが 20dB ほど小さかったことと、高周波側では人間の聴覚にとって聞き取り難かったためであると考えられる。従って、リアルタイム呈示のために本論文で導入した簡略化計算は、少なくとも知覚レベルでの一致を損なうことなく妥当なものであったと考えることができる。

6. 考察

本手法により、アルミニウムの円盤をたたいた時の音を再現できることがわかった。また、中空か中実であるかを判断する実験により、本手法で内部構造の異なるバーチャルな物体をたたいた時の音を表現できることが確認された。これは従来の手法では対応することが不可能で、その意味で新規性がある手法といえる。ただし、有限要素法によるシミュレーションでは、hourglass control によるものと思われる減衰、周波数に依存した減衰が考慮されていなかった等の原因により、実物よりも若干減衰が早くなっている。この点についても改良を加えていく必要がある。

また、ゴムや木などより複雑な物性を持つ物体につ

いても原理的には対応可能である。しかしながらこれらは部材の内部が不均質で計算モデルが複雑 [14] になる。また、たたく場所やたたき方によっても音は変化する。さらに本研究のようにペンやハンマーによってたたくことを想定するのではなく指先のような複雑な変形をするものでたたくと音はさらに複雑に変化する。これについては逐一有限要素計算をすることで原理的には任意の物体をたたいた時の音を生成することが可能であるが、現時点ではリアルタイム性は確立されていない。たとえば、物体の剛性マトリックスを多数用意し、打撃が加わった瞬間に変形を計算するデータベース FEM の開発や計算の簡略化手法の開発は今後の課題であるが、予測を取り入れることでリアルタイムに変形を計算する手法の研究 [15] も進められており計算機の処理速度の向上とあまって今後リアルタイム有限要素計算技術については徐々に実用に近づいていくと考えられる。

ところで本稿では、アルミニウムの円盤をたたいた時の音をひとつのスピーカから出力している。人間の頭の大きさとアルミニウム円盤の大きさと両者の距離を考慮するとスピーカによる点音源としての近似による誤差の影響は本実験環境では少ないと考えられるが、物体が音の波長よりも大きくなる、あるいは音の波長が物体の大きさに対してある程度短くなると放射音の指向性が高くなり点音源として扱うことは困難となる。この場合には複数のスピーカアレイを用いるなどの対策が必要である。また、本実験で使用したスピーカは小型であるため低音（数百 Hz 以下）の特性がよくない。実験では 1kHz 以上の高音の音が主であるので影響は少ないと考えられる。もし低音が重要な場合は、人間が低音の音源定位が困難であることを逆に利用して、低音用のスピーカを力覚デバイスの近傍に置くことで対応可能である。

また、本システムはインタラクションのあった物体からの音の放射の計算は行なっているが、周りの物体による音の反射は考慮していない。従来のサンプリング音を用いた音の反響を考慮した 3 次元立体音場生成システムと組み合わせることで、お互いの不足した点を補い、より臨場感のある環境の構築が可能である。

このシステムの応用分野としては、環境シミュレータやトレーニングシミュレータが考えられる。たとえば先のトンネル崩落事故後の壁面打音検査などは打音が反響して熟練しないと判断が難しい。このような状況を従来の 3 次元音場生成シミュレータと本システムを組み合わせ作り出し、反響音と打音、力覚を同時に呈示する訓練シミュレータを作ることも考えられる。

また逆に本システムの結果は、FEM の計算手法開発にフィードバックできる可能性もある。たとえば何らか

の形で反響音を除去した放射音のみのセンサーのデータとシミュレーションの結果から空洞を発見するシステムの可能性も考えられる。

また、スピーカを手元につけることで、没入型ディスプレイ内で効果器が物体と接触したときの近接音やボタン操作をしたときのクリック音等の呈示にも応用が可能である。

7. おわりに

本研究では、物理法則に基づく聴覚と力覚を融合したシステムの構築手法を述べた。この手法は現在の計算機の能力では制約が多いが、物理法則に基づいた計算により、バーチャルな物体をたたいた時の音と力覚情報を同時に呈示可能であることが検証された。

今後の課題としては、ゴムや木など他の素材を再現することや計算量を減少するための音の近似計算手法の開発などが挙げられる。

参考文献

- [1] 小泉:音のリアリティ, 仮想現実学への序曲, 共立出版, pp100-109, (1996)
- [2] 山崎:インタフェースとしての音を考える, パーチャルリアリティ, (株) クバプロ, pp160-165, (1999)
- [3] 工藤他:近接 4 点法により求められた反射音位置に基づく波面合成, 日本音響学会講演論文集, pp803-804, (1996)
- [4] R.T.Shumacher:Ab initio calculations of the oscillations of a clarinet, *Acustica*, 48, 2, pp71-85, (1981)
- [5] Doel, Pai: The Sounds of Physical Shapes, *PRES-ENCE*, Vol 7, No. 4, (1998)
- [6] 原田:聴覚情報提示の研究, 文部省科学研究費補助金重点領域研究「265」人工現実感に関する基礎的研究, 平成 9 年度研究成果報告書, pp43-44, (1997)
- [7] 鈴木他:機械工学のための振動・音響学, サイエンス社, (1998)
- [8] <http://www.lstc.com>
- [9] 廣瀬他:触覚用共通ソフトウェア (HIP) の開発; 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol. 3, No. 3, pp. 111-119, (1998)
- [10] 理科年表, 丸善 (株), (2000)
- [11] N. H. van Schijndel, T. Houtgast and J. M. Festen: Intensity discrimination of Gaussian-windowed tones: indications for the shape of the auditory frequency-time window, *J. Acoust. Soc. Am.*, 105, pp. 3425-3435 (1999).
- [12] 難波:音色の定義を巡って, *音響学会誌*, 49, pp. 823-831 (1993).
- [13] 吉川:ピアノの音色はタッチで変わるか - 楽器の中の物理学, 日経サイエンス社 (東京), 1 章 (1997).
- [14] L. E. MALVERN: Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium, Prentice-Hall, Inc., pp306-327 (1969)
- [15] 壺内他:有限要素法に基づくリアルタイム形状変形, ヒューマンインタフェース学会研究報告集 Vol. 2 No. 2, pp3-7 (2000)

(2000 年 4 月 12 日受付)