

鍵盤楽器打鍵時に生じる触覚的材質感の再現

蜂須 拓^{*1} ガブリエル・シリオ^{*2} モード・マーシャル^{*2}

アナトール・レキュイエール^{*2} 梶本 裕之^{*1, *3}

Haptic Simulation of Materials Resulting from Striking Chromatic Percussions

Taku Hachisu^{*1}, Gabriel Cirio^{*2}, Maud Marchal^{*2}, Anatole Lécuyer^{*2}, Hiroyuki Kajimoto^{*1, *3}

Abstract — PC による楽器演奏の再現は音楽ゲームという一つのジャンルを確立し、世代を超えて楽しられている。近年の動作入力型コントローラの普及でより直感的な演奏が可能になった。一方で、動作入力の結果ユーザに返される触覚情報は単純な振動の呈示に留まっている。そこで我々は楽器演奏時に生じる触覚の再現を試みる。本稿では鍵盤楽器（木琴、鉄琴）打鍵時の触覚的材質感呈示を実現するシステムの製作について報告する。

Keywords : Haptic interaction, material, musical video game, vibration.

1. はじめに

楽器演奏は最もよく知られた、かつ最も古くから楽しまれてきたエンターテインメントのひとつである。演奏技術の優劣に関わらず、その洗練された音を奏でたり、他者と協調したりすることで聴衆はもちろん、演奏者本人にも快楽を与えてきた。こうした中、近代の音楽ビデオゲームによって、ユーザは容易に、かつ安価に様々な楽器演奏を体験することが可能となった。

とりわけ音楽ビデオゲームのコントローラは体験をより現実に近くする方向に著しく発展している。家庭用ゲーム機ではキーボードやギター等の演奏楽器をかたどった様々なコントローラが販売されている。これにより通常のコントローラのボタンでの演奏に比べて、格段にユーザの体験は豊かになった。

Kanebako らはユーザの身体運動を計測する複数のセンサを搭載した Mountain Guitar を提案した[1]。これによりユーザは全身を使ってギターの演奏動作を模倣することで、初心者でも簡易に幅広い演奏表現が可能となった。任天堂より発売された Wii Music では、ユーザが Wii リモコンを介して所望の動作をとることで様々な楽器演奏を行う[2]。これら二つの作品に共通していることのひとつに、ユーザの身体動作を楽器演奏に反映させているという点が挙げられる。身体動作を

入力とすることで、ユーザはそれまでの直接あるいは間接的な楽器演奏に関する経験を活用することができるので、より直感的に、かつそのコンテンツに没入して楽器演奏を行うことができる。以上から近年、音楽ビデオゲームのコントローラは、とりわけその入力技術が多いに進歩したといえる。



図 1 バーチャルな木琴・鉄琴

一方で、ユーザへの呈示、すなわち出力技術に関しては入力技術ほど進歩したとは言い難い。確かにオーディオ出力に関しては立体音響を筆頭に前進したといえるが、特に触覚呈示に関してはあまり発展していない。例えば Wii リモコンにおける触覚呈示は未だ振動モータからの単調な振動呈示に留まっており、前述した身体動作入力に対して不十分なフィードバックとなっている。

例として実際に木琴や鉄琴等の鍵盤楽器の打鍵する状況を考える。本来ならばその材質の違いにより音色が異なる事はもちろん、同様に触覚的

^{*1}: 電気通信大学, {hachisu, kajimoto}@kaji-lab.jp

^{*2}: INRIA Rennes

^{*3}: 科学技術振興機構さきがけ

^{*1}: The University of Electro-Communications

^{*2}: INRIA Rennes

^{*3}: Japan Science and Technology Agency

材質感も異なるはずである。しかし現行のシステムでは木琴を叩こうが、鉄琴を叩こうが同様の触覚しか呈示することができず、これが身体動作入力によって実現される直感性やコンテンツへの没入感を減じていると考えられる。

そこで本研究では音楽ビデオゲームにおいて楽器演奏時に生じる触覚の再現を目的とする。我々はこの目的を達成すべく以下に述べる3つのコンセプトを設定した。一つ目は現行の振動モータよりも高品位な触覚呈示を実現することである。二つ目はシステムを構築する際、高価な実装を避けることである。前述したとおり、音楽ビデオゲームの利点のひとつに容易かつ安価に楽器演奏を体験できるという点がある。したがって産業や研究段階で使用される高価な力覚呈示装置等は使うべきではない。三つ目はユーザの運動を妨害しないシステムを構築することである。これを実現するためには、特にユーザの手に触れるコントローラは単純な構造で容易に扱えるように設計する必要がある。

本稿ではこれらのコンセプトを実現する新たなシステムの構築について述べる。また本システムの効果を実証するために、バーチャルな鍵盤打楽器、木琴と鉄琴を打鍵する時に生じる触覚を再現する(図1)。

2. 鍵盤打鍵時に生じる触覚

固い物体の表面に指で、あるいは道具を介して触れた時、我々は視聴覚に頼らずとも触覚の手がかりによって触れた物体の材質を識別することができる。触覚は皮膚感覚(物体に触れた瞬間に生じる振動等による皮膚の機械的変形)と力覚(物体表面から返される反力)から成り立つ。バーチャルな鍵盤打楽器における触覚を再現するためには皮膚感覚と力覚を呈示することが必要となる。

2.1 振動呈示による材質感の再現

これまでに、皮膚感覚と力覚を同時に呈示して物体のもつ材質感を呈示する手法が提案されている。Wellmanらはボイスコイルを搭載した力覚呈示装置を提案し、力覚と皮膚感覚を独立のアクチュエータで呈示した[3]。またOkamuraらは力覚と皮膚感覚を一つの力覚呈示装置のみから呈示する手法を提案した[4]。彼らは皮膚感覚呈示に式(1)に示す減衰正弦波モデルを採用し、固い物体に触れた時から時間 t が経過した振動 $Q(t)$ を再現した。

$$Q(t) = A(v)e^{-Bt} \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

ここで、 A は初期振幅係数、 v は衝突速度、 B は減衰係数、 f は振動周波数である。 A 、 B 、 f の値は物質によって定まるパラメータである。

Okamuraらはこのモデルを用いてゴム、木材およびアルミニウムの3つの異なる材質を再現し、被験者実験によりユーザがそれぞれを識別可能であることを示した。またこの時、ユーザは主に皮膚感覚を手がかりに材質感を識別していたことを報告している。

2.2 Pseudo-Haptic を用いた触覚呈示

皮膚感覚はボイスコイルを用いて簡易に、かつ安価に呈示できるのに対して、力覚呈示には複雑・高価な力覚呈示装置がしばしば用いられている。前章でも述べたように、音楽ビデオゲームに複雑・高価なデバイスがシステムに組み込まれることは望ましくない。そこで我々は力覚呈示装置を必要としない力覚呈示手法としてpseudo-hapticによる力覚呈示手法に着目した[5]。pseudo-hapticとは視覚によって触覚が誘発される錯覚現象であり、例えばPCマウスの使用中にPCモニター上のカーソルの移動速度がPCマウスの移動速度と比較して急に遅くなると、PCマウスが重たくなったかのように感じるという経験が挙げられる。これまでにpseudo-hapticを用いてバネの硬さの変調、画像の触覚的凹凸感、バーチャルな物質の重さの変調等、様々な力覚の再現がされてきた。

しかし、実際に生じる触覚と比較して、pseudo-hapticで生じる触覚は振動周波数、特に高周波成分において限界がある。なぜなら視覚的に高周波成分を再現しようとするには通常のモニタのリフレッシュレート(60Hz)では不十分であり、またヒトの視覚特性上50Hz以上の振動は知覚不可能であるからである。したがって前節で述べたように皮膚感覚をボイスコイルを用いて呈示し、力覚をpseudo-hapticを用いて呈示しようとすると、ユーザに知覚される触覚は図2に示すように隔たりのあるものになると予想される。その結果としてユーザの印象は不自然なものになると考えられる。

この困難を解決するために、我々は非写実的表現手法によってより高い周波数成分を呈示可能とするpseudo-hapticの拡張方法を提案した[6]。我々の提案手法はGleesonらのcartoon-inspiredモデル[7]による触覚レンダリング手法から着想を得たものである。cartoon-inspiredモデルはTVアニメ等で良く用いられる現実的ではないが、ユーザに与える印象を強調するための手法である。

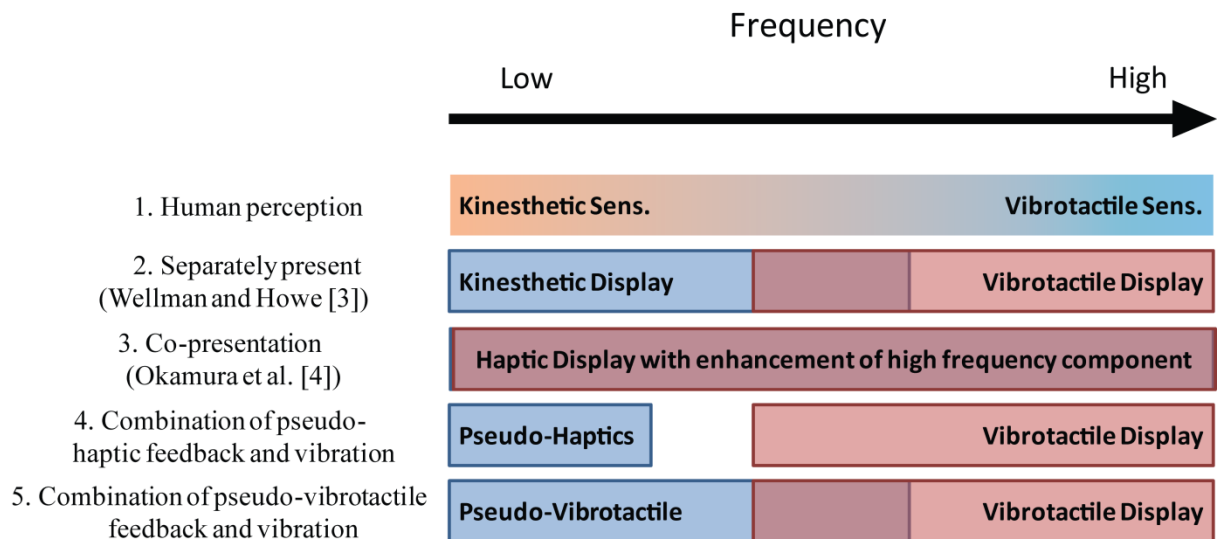


図 2 ヒトの触知覚と触覚呈示

我々の提案は、通常目には見えない皮膚感覚的振動の振幅を大きくし、振動周波数を可視できるほどに低くして、誇張して視覚的に振動呈示することで疑似触振動感覚 (pseudo-vibrotactile) を誘発させるというものである。第 3.2.1 節でも述べるように、pseudo-vibrotactile はその振動パラメータは著しく現実のものとは異なるが、ユーザの知覚は皮膚感覚から力覚的触覚成分が連続的なものとなると考えられる (図 2)。

3. システム構成

3.1 試作ハードウェア

3.1.1 システム構成要素

図 3 にシステム図を示す。本システムは PC、PC モニタ、オーディオアンプ、オーディオスピーカー、ばち型コントローラ、赤外線位置センサ(任天堂、Wii リモコン) より構成されている。

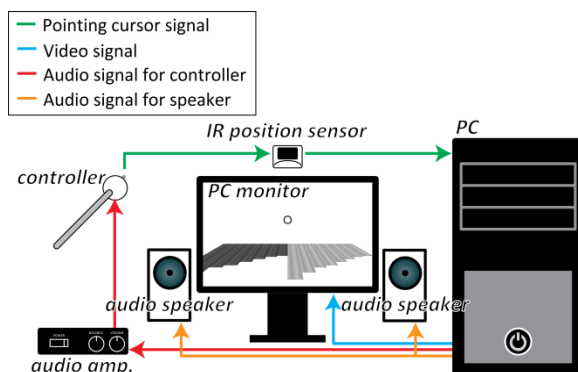


図 3 システム図

3.1.2 ばち型コントローラ

図 4 および図 5 にばち型コントローラの外観および内部構造を示す。柄の部分はアルミニウムで、球状のヘッド部分はアクリロニトリルブタジエンスチレン樹脂 (Acrylonitrile Butadiene Styrene, ABS 樹脂) により作られている。柄の部分の先端にはボイスコイル型の触振動呈示用アクチュエータ (TactileLabs 社製, Haptuator TL002-14-A[8]) が内蔵されている。またヘッドの先端には赤外線発光 LED が搭載されている。コントローラの全長は 200mm、重さは 90g である。

使用したアクチュエータはオーディオアンプを介して音声信号を入力することで制御でき、広帯域な触振動呈示が可能である。これにより従来の振動モータよりも高品位な触振動刺激の呈示が可能となる。

赤外線 LED の位置は Wii リモコンの赤外線位置センサにより取得される。その値は Bluetooth を介して PC に送信され、PC モニタ上にばちのヘッドとして球状のカーソルで表示される。

本コントローラの構造は非常に単純なものであるため、ユーザの身体動作入力を妨げることはない。また今回使用したアクチュエータは未だ家庭用ゲーム機用に採用できるほど実用的な価格ではないが、将来 Wii リモコンの様に広く普及することでその価格は下がるものと考えられる。



図 4 ばち型コントローラ

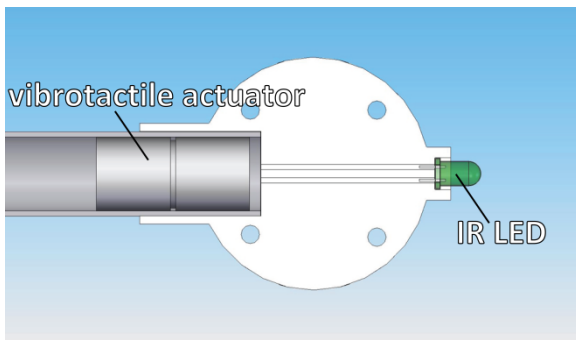


図 5 ばち型コントローラの内部構造

3.2 試作アルゴリズム

本章ではPCモニタ上のばち（カーソル）の挙動、およびばち型コントローラに内蔵されたボイスコイルとオーディオスピーカに入力する音声信号の制御アルゴリズムについて述べる。

3.2.1 カーソルの挙動

まず、本アルゴリズムはPCモニタ上に木琴および鉄琴の鍵盤の位置を定義する。次に前節で述べたように、Wiiリモコンから送信された赤外線LEDの位置情報に応じてPCモニタ上のカーソルの位置を決定する。そしてカーソルの位置と鍵盤の位置が一致した時、カーソルと鍵盤が衝突したと判定し、その時の衝突位置と衝突速度 v を記憶する。

衝突後のカーソルの挙動には前章で述べたpseudo-vibrotactile[6]が適応され、カーソルは図6に示すように振動する。この時の振動は式(1)に示した減衰正弦波モデルに従い、衝突位置、つまり木琴に衝突したか、あるいは鉄琴に衝突したかでパラメータ A 、 B 、 f が決定する。その後カーソルは、衝突速度 v と初期振幅係数 A によって初期振幅が定まり、 B と f に従い減衰振動する。

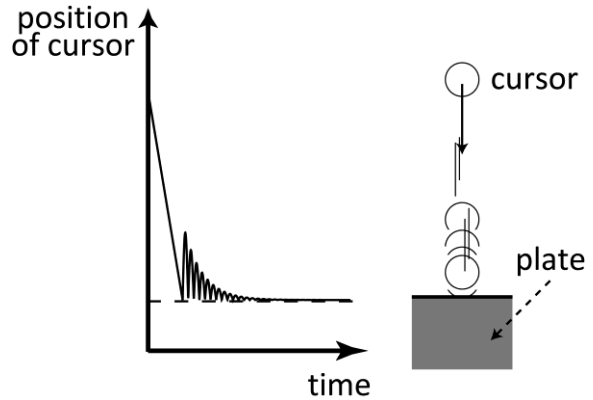


図 6 打鍵時における視覚的に誇張したカーソルの振動挙動の模式図

3.2.2 音声信号の制御

(a) オーディオスピーカ

前節で述べた衝突位置と衝突速度より、MIDIプロトコルを介して音色（木琴もしくは鉄琴）と音階、および音量が決定される。その音声信号がPCのオーディオ端子よりオーディオスピーカに出力され、所望の音がユーザへ呈示される。

(b) ボイスコイル

オーディオスピーカと同様に、ボイスコイルへの音声信号は衝突位置と衝突速度に基づいて決定される。カーソルの挙動と同様に式(1)に従い、衝突位置に応じてパラメータ A 、 B 、 f が決定し、初期振幅は衝突速度 v と初期振幅係数 A によって定まる。生成された音声波形はPCの（オーディオスピーカの時とは異なる）オーディオ端子より出力され、オーディオアンプを介してばち型コントローラに内蔵された触振動呈示用アクチュエータに入力される。

4. 実演展示

本章ではバーチャルな木琴・鉄琴の実演展示について述べる。本システムを設置した時の様子を図7に示す。PCモニタには木琴（図8左下）、鉄琴（図8右下）、およびばちのヘッドとして白い球状のカーソル（図8中央）が描画されている。木琴・鉄琴にはそれぞれ1オクターブ分の音階（ド、レ、ミ、ファ、ソ、ラ、シ、ドの計8音）が割り振られている。カーソルはユーザのばち型コントローラの操作に応じてモニタ上を二次元平面的に動く。



図 7 システム設置時の様子

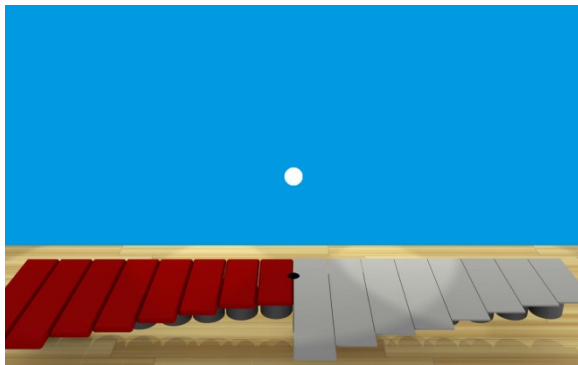


図 8 PC モニタのスクリーンショット

表 1 にカーソルおよび触振動呈示用アクチュエータに入力した音声信号の式(1)減衰正弦波モデルにおける 3 つのパラメータを示す。ただし、アクチュエータにおける初期振幅係数 A は物理量ではなく比率である。ユーザの好みによってオーディオアンプのロータリスイッチで調整される。これらの値は Okamura らの論文[4]を参考に PC モニタおよびアクチュエータの帯域幅に合わせて決定した。

表 1 減衰正弦波のパラメータ

	カーソル		アクチュエータ	
	木琴	鉄琴	木琴	鉄琴
A(s)	0.010	0.020	*1.0	*2.0
B(s ⁻¹)	8.0	9.0	80.0	90.0
f(Hz)	5.0	15.0	100	300

我々はこのバーチャルな木琴と鉄琴を大学オープンキャンパスの日に実演展示した。参加者の反応は極めて良好であった。

第 2.2 節で述べたようにカーソルの挙動に

pseudo-vibrotactile を適用することでユーザの受ける触覚的印象が良くなると予想した。一方で表 1 が示すように、カーソルの振動とアクチュエータから呈示される振動は著しく異なっている。そのため、例えばアクチュエータからの振動は減衰しきっているにもかかわらず、カーソルは振動し続けているということが起こりうる。結果として体験者の印象が逆に不自然になってしまう可能性も考えられる。しかしこの予想に反して、オープンキャンパス参加者からは「カーソルの挙動が不自然であった」等の報告はなかった。

この点に関しては更なる調査が必要であるが、ユーザのアクチュエータからの実際の振動刺激に対する触覚が pseudo-vibrotactile によって、それに合わさるように変調されたと考えられる。この仮説の根拠として、Lécuyer らの、視覚刺激が実際の触覚に与える影響についての報告が挙げられる[9]。彼らは被験者に一定速度で回転する触覚的テクスチャをもった円筒に指を触れさせた状態で、PC モニタ上に回転速度が変化する円筒の映像を呈示した。この時被験者に触れている円筒の回転速度やテクスチャの粗さについて回答させると、回答が PC モニタ上の円筒の回転状態に共変することを明らかにした。この事実から本実演展示においても、pseudo-vibrotactile (視覚刺激)によってアクチュエータからの振動刺激に対する触覚が視覚刺激に合わせるように共変したと考えられる。その結果、参加者はカーソルとアクチュエータから呈示される振動に不自然さを覚えなかったと考察できる。

5. おわりに

本稿では、鍵盤打楽器演奏時に生じる触覚的材質感再現することで音楽ビデオゲームの体験をより豊かにすべく、ボイスコイルを内蔵したばち型コントローラと pseudo-vibrotactile を利用したシステムの製作について述べた。そして大学オープンキャンパスにてバーチャルな木琴と鉄琴を実演展示し、参加者の体験の様子を観察した。Pseudo-vibrotactile を適用した PC モニタ上のカーソルとアクチュエータの振動パラメータが著しく異なるため、参加者に不自然な印象を与える可能性があったが、参加者からそのような報告は得られなかった。これに対し我々は視覚刺激、つまり pseudo-vibrotactile が触覚を共変させた可能性を述べた。

今後は視覚刺激が触覚に与える影響を調査すると共に、両振動パラメータの最適化を試みる。また今回は木琴と鉄琴を再現したが、他の鍵盤打楽器や打楽器に関しても再現を試みる。

参考文献

- [1] Kanebako, J., Gibson, J., and Mignonneau, L.: Moutaing Guitar: a Musical Instrument for Everyone. Proceedings of the 7th International Conference on New Interfaçes for Musical Expression, pp. 396-397 (2007).
- [2] NINTENDO. Wii Music, 2008.
<http://www.wiimusic.com/>.
- [3] Wellman, P. and Howe, R.D.: Towards Realistic Display in Virtual Environments. Proceedings of the ASME Dynamic System and Control Division, 57(2), pp. 713-718, 1995.
- [4] Okamura, A.M., Cutkosky, M.R., and Dennerlein, J.T.: Reality-Based Models for Vibration Feedback in Virtual Environments. IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, 6(3), pp.245-252, 2001.
- [5] Lécuyer, A.: Simulating Haptic Feedback Using Vision: a Survey of Research and Applications of Pseudo-Haptic Feedback. Presense, 18(1), pp.39-53, 2009.
- [6] Hachisu, T. Cirio, G., Marchal, M., Lécuyer, A., and Kajimoto, H.: Pseudo-Haptic Feedback Augmented with Visual and Tactile Vibrations. Proceedings of 2011 IEEE VR International Symposium on VR Innovations, pp. 327-328, 2011.
- [7] Gleeson, B. and Johnson, D.E.: Expressive Haptic Rendering with Cartoon-Inspired Effects. Proceedings of 2010 IEEE Haptics Symposium, pp. 191-194, 2010.
- [8] Yao, H.-Y., and Hayward, V.: Design and Analysis of a Recoil-Type Vibrotactile Transducer. Journal of the Acoustical Society of America, 128(2), pp. 619-627, 2010.
- [9] Lécuyer, A., Congedo, M. Gentaz, E., Joly, O., and Coquillart, S.: Influence of Visual Feedback on Passive Tactile Perception of Speed and Spacing of Rotating Gratings. Proceedings of EuroHaptics 2010, pp. 73-78, 2010.