

多感触ボタンによる触覚フィードバックの ゲームコンテンツへの応用

小川大地^{†1} Vibol Yem^{†1} 蜂須拓^{†2} 梶本 裕之^{†1}

本研究はビデオゲーム体験中におけるボタン型コントローラに対する触覚フィードバックの設計に関するものである。我々はこれまで、ボイスコイル型振動子、バネ、距離センサを用いた、大ストロークに対応した多感触ボタンを提案してきた。本稿ではこの多感触ボタンを用いて、ゲームコンテンツ内の複数の文脈に対する触覚提示を行い、各状況における最適な触覚デザイン的设计要件の検討を行った。

Haptic Feedback Design of Multiple Texture Button for Game Contents

DAICHI OGAWA^{†1} VIBOL YEM^{†1}
TAKU HACHISU^{†2} HIROYUKI KAJIMOTO^{†1}

We have previously proposed Multiple Texture Button that is composed of a voice coil actuator, spring, and distance sensor and can present haptic feedback to users in a video game experience. In this paper, we tried to improve the realism and immersive feeling of game contents by presenting vibration that matches the context.

1. はじめに

近年のゲームコンテンツでは視覚、聴覚刺激を最大限に利用することでゲームへの臨場感向上を行っている。また臨場感・没入感を高めるため、第3の刺激として触覚提示を行う例も多い [1, 2, 3]。これらの研究例では Geomagic¹ や Novint Faloon², Novint X² のような力覚や振動提示可能な 3D 触覚コントローラや専用のデバイス用いる場合が多い。しかし、再現性が高い高品質な触覚デバイスは、ボタンとジョイスティックを搭載した一般的なコントローラに比べ未だ入手コストが高いにもかかわらず、様々なゲームに幅広く対応できる汎用性は低いと考えられる。

ゲームコンテンツにおける触覚提示に最低限必要な要素は、幅広いゲームに対応可能な高汎用性、誰でも入手可能な低コスト性、そして多彩な表現を可能とする再現性の3つであると考えられる。我々はこの3つの条件を満たす最低限の構成として前回提案した多感触ボタンを用いる [4]。物理的なボタンは最も代表的な入力手段であり、ほとんどのゲームがボタンを搭載したコントローラで操作できることから、低コスト性と高汎用性が実現されていると言える。しかし物理的なボタンでは機械的な仕組みによって1つのボタンに対し1種類の感触しか提示できず、再現性は高いとはいえない。これに対して我々はボイスコイル型の振動子と実際に押し込み可能な物理ボタンの組み合わせによって複数種類の感触を提示できる多感触ボタンを開発

した。多感触ボタンの開発によって高汎用性、低コスト性、再現性の3つのバランスのとれたゲームコントローラがハードウェアとして実現したといえる。

本稿ではこの多感触ボタンを用いて実際のゲームに適合させるための再現性の高い触覚を提示する設計手法について検討する。再現性の高い触覚を設計するためには、ゲームコンテンツ内の状況に適した触覚提示を行う必要があると考えられる。我々は触覚提示する状況をユーザの運動に伴って生じる触覚（能動的触覚）と、ゲーム内のイベントによって提示される触覚（受動的触覚）の2種類に分類した際の、特に能動的触覚に関する事例を2種類取り上げ、適した触覚提示の条件を探索した。

2. 先行研究

ゲームコンテンツはユーザの操作に応じ対話的に映像・音が生成される。視覚・聴覚への刺激に次いで多く用いられる刺激が触覚である。1962年に Heilig により開発された Sensorama は複数感覚を同時に提示するマルチモーダル提示の元祖とされるが、最も古い触覚ゲームコンテンツであるとも言える。家庭用ゲーム機の例では1997年に任天堂が開発した振動パック [5] よりユーザに触覚提示を行っている例が挙げられ、現在は家庭用ゲーム機やスマートフォン上のゲームで振動提示が行われることはもはや一般的である [6, 7]。

^{†1} 電気通信大学
The University of Electro-Communications

^{†2} 筑波大学
University of Tsukuba

1 Geomagic Haptic Device
<http://www.geomagic.com/en/products/phantom-omni/overview>

2 Novint Technologies
<http://www.novint.com>

触覚提示は一般に能動触(active touch)と受動触(passive touch)に分類される[8, 9]. 能動触はユーザの意思によって実際に触る, 動くなどの動作を行った際に生じる触覚であり, ユーザ自身の動作情報(位置, 速度など)や触れた先の材質や状況をもとに触覚が生成される. 受動触はユーザの意思は関係せず, 周囲の状況の変化をもとに生じる触覚である.

ゲームコンテンツにおける触覚提示も同様の分類が可能であると考えられる. ゲームにおける能動的触覚提示はコントローラの入力動作そのものに対して触覚フィードバックを行う. 例えば叩く動作に伴い叩いた衝撃を, 切る動作に伴い感触をユーザに与えるような状況である. Kurihara らは身体運動入力型ゲームに対して, ロボットの身体感覚をユーザに提示し, あたかも本物のロボットになったような感覚を提示し臨場感を高めた[10]. Virtual Chanbara ではゲーム中の CG キャラクタと棒形のデバイスによってインタラクションを行った [11]. Haptic Battle Pong では Omni Phantom¹ を用いてゲーム中に力覚フィードバックを行っている[12].

一方で, ゲームにおける受動的触覚提示はゲームコンテンツ内で発生するイベントに対して行われる[13]. 例えば銃弾を受けた場合や物体との衝突の衝撃感がこれに該当する. ゲーム, 映画内の衝撃の体感や臨場感の向上を目的としてジャケット型のデバイス[14, 15]や椅子型のデバイス[16, 17]が提案されている. また, HaptiCast[3]では 3D マウスを用いて 3D ゲーム内の各イベント(衝突)に対して触覚提示を行っている. Ohshima らは刀で切られた感触を大量のボイスコイル型振動子を用いて再現した[18].

以上のように数多くの能動的, 受動的触覚提示がゲームに適用されている中で, 受動的触覚提示はユーザからの入力を用いないため, 今回のボタンを使用するという状況と従来研究の状況に大きな差異はないと考えられる. また受動的な触覚提示の設計手法は, 映画のシーンに合わせた触覚提示[16]や音楽の触覚による増強[19], 心拍の触覚による提示[20]など数多くの研究があり, これらを活用すれば良いと考えられる.

一方で能動的な触覚提示に関しては, 今回の多感触ボタンはやや特殊な例である. 垂直方向の 10mm 程度と触覚インタフェースとしては可動範囲が小さく, またボタンの動作(入力)とゲーム内のキャラクタや道具の動作(出力)は大きさも方向も一致していない. こうした状況下でのコンテンツへの触覚提示の合わせこみ手法に関しては比較的知見が少ないと考えられる. ボタン自体に触覚を付与して多彩なクリック感を再現する研究は存在するものの[21], ゲームコンテンツに適用できる触覚は少ない.

以上により本論文では特に, ボタンを用いた際の能動的触覚提示に関して 2 種類の事例を取り上げ, その設計手法について検討する.

3. 多感触ボタン

本章ではボタン型触覚コントローラの実装について述べる. 我々は実際に押し込み可能な物理ボタンと振動提示との組み合わせによって様々な感触を提示できる多感触ボタンを開発した. また, 従来のボタンとは異なり近接センサを用いることにより押し込み距離, 速度計測を行った.

3.1 実装

図 1 に実装したボタンを示す. 内部の押しバネ(ばね定数 $k = 0.889$ [N/mm], 自然長 43mm)によって操作部(Operating Part)とケース部(Case Part)を接続している. ボタンの最大押下距離は 10mm であり, 理論上押しバネのみで最大 8.89N の反力を提示する. 押し込み距離を計測するために直射方式の距離センサを構成した. ケース部の底に赤外フォトトランジスタを, 操作部の底に赤外 LED を固定し, 受光強度によってボタンの押し込み距離を計測した. 計測はマイクロコントローラ(NXP 社製, mbed NXP LPC1768)によって更新周期 5kHz で行った. 操作部内部に触覚を提示するための振動子(Acouve Laboratory 社製, Vp408)を搭載した. PC またはマイクロコントローラからのアナログ信号をオーディオアンプ(Muse audio 社製, M50)によって増幅し振動子を駆動した(図 2).

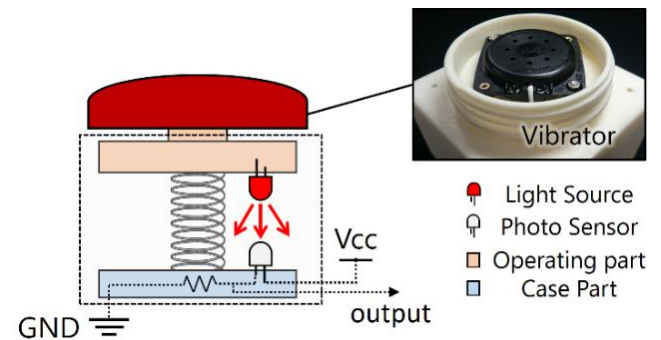


図 1 多感触ボタン概要

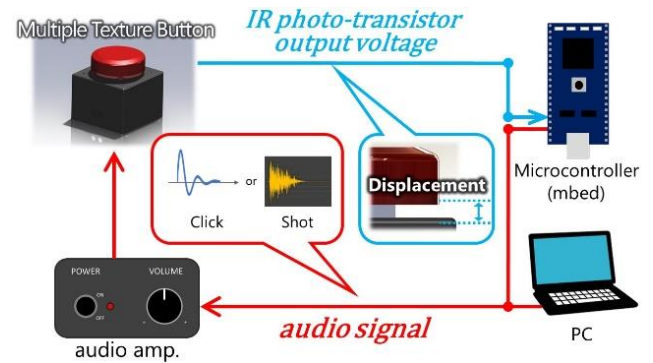


図 2 多感触ボタンを用いたシステム概要

3.2 押し込み距離及び速度計測

押し込み距離を計測するために、操作部底に固定された赤外 LED から発せられる赤外光の光量（電圧）を、ケース部底に設置された赤外フォトトランジスタより計測した。ハイトゲージを用いて 0 から 9mm まで 1mm 刻みで 10 回の計測を 2 セット、計 20 回計測した。図 3 に距離 x と電圧 $V(x)$ の関係と直線近似の結果を示す ($R^2=0.995$)。

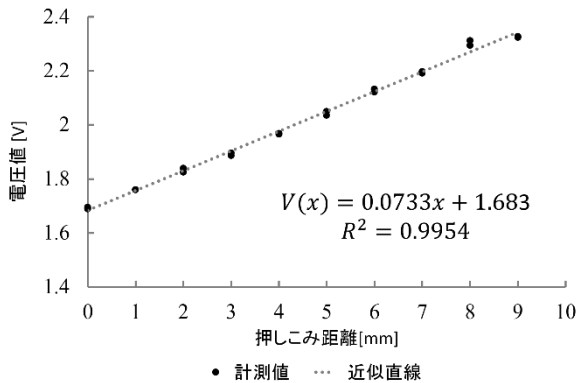


図 3 押しこみ距離と出力電圧の関係。

本装置はリアルタイムに押し込み距離を取得しているため、同時に押し込み速度も計測できる。マイクロコントローラにより取得した現フレームにおける押し込み距離 x_n と前フレームにおける押し込み距離 x_{n-1} とマイクロコントローラの更新時間 Δt をもとに次式(1)によって速度 $v(n)$ を計測した。移動平均化フィルタ処理（タップ数 $N=10$ ）を行い、データの平滑化を行った。

$$v(n) = (x_n - x_{n-1}) / \Delta t \quad (1)$$

多感触ボタンは従来の物理ボタンにはない、距離、速度推定の機能を有する。4章の実験では押しこみ距離や速度情報を反映させたゲームコンテンツを用いて、拡張機能がもたらすユーザへの影響も調査する。

4. 実験

本章では実装した多感触ボタンを入力装置として用いて、複数の能動的触覚フィードバックの状況に対して触覚フィードバックの設計手法を検討した。また、押しこみ距離や速度情報を反映させたゲームコンテンツを用いて、入力機能の拡張がもたらすユーザへの影響も調査した。

ゲームコンテンツ内では、例えば叩く、切る、刺す、折る、曲げるといった能動的行動に対して能動的触覚フィードバックが必要となる。こうした能動的触覚フィードバックを行う状況は、大きく分けて次の 2 つに分類できる。1 つ

目は「動作中」に継続して刺激を与えるものである。切る、刺す、曲げるといった動作中における状況での触覚がこれに該当する。2 つ目は「動作後」に刺激が生じるものである。叩く、折るといった動作の最後の状況での触覚がこれに該当する。この分類は楽器による類推で理解することもできる。吹奏楽器や弦楽器は前者にあたり、打楽器は後者にあたる。

実験 1 では前者の代表事例として「ノコギリで木を切る」状況を取り上げる。実験 2 では後者の代表事例として「バットでボールを打つ」状況を取り上げる。

4.1 実験 1：動作中に生じる触覚フィードバックの検討

本実験は動作中に刺激が継続する状況での能動的触覚の一例として、ノコギリで木を切るときの感触を再現し、その主観的なリアルさを評価した。

4.1.1 実験環境

ゲームではボタンの上下押し込み操作によって画面中のノコギリが動き、ゲーム内に設置された丸太を切ることができる（図 4）。ゲームエンジンには Unity³ を用いた。ノコギリの位置はボタンの押し込み距離に線形に対応している。ノコギリで丸太を切るとゲームが終了する。触覚はマイクロコントローラ内で信号を生成し、オーディオアンプにて増幅し提示した。これにより動作と触覚提示の時間的な遅延はほぼない状況で実験を行った。

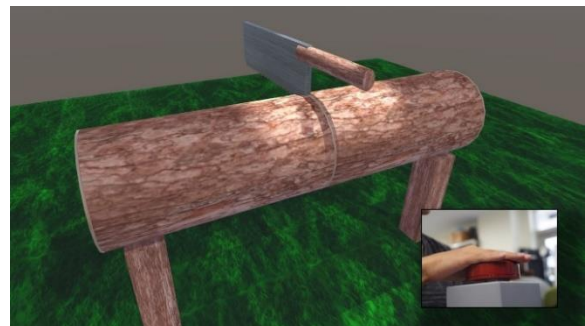


図 4 実験 1 に用いたゲーム

4.1.2 触覚提示条件

実際にノコギリの操作に対して生じる触覚は、動きの速度に応じて振幅が大きく、また周波数が高くなることが予想される。ここではノコギリの切断を連続的な衝突と捉え、衝突振動のモデルとして多く用いられる減衰正弦波[22]を用いて、ボタンの上下運動に対して 0.5mm 間隔で発生するという簡単なモデルで振動を生成した。比較として高周波ノイズを用いた。

それぞれ 2 種類の元波形に対し、動きの速度に対して「周波数を変化させるもの」「振幅を変化させるもの」をそれぞれ

3 Unity Technologies, Unity ver.5.1.1 f1 Personal
<http://unity3d.com>

れ用意した。以上から表 1 のように合計 8 種類の触覚提示波形を作成した。DS は減衰正弦波 (Decaying Sinusoidal), N はノイズを意味する。周波数の 100~1000Hz は速度の変化に対して 100Hz から 1000Hz を線形に対応づけることを意味する。ノイズ波形の場合は 1000Hz から 5000Hz を線形対応させた。

表 1 実験 1 で用いた触覚提示条件

| | 振幅 | 周波数 | 波形 |
|---|----|-------------|----|
| A | 可変 | 300Hz | DS |
| B | 固定 | 300Hz | DS |
| C | 可変 | 100~1000Hz | DS |
| D | 固定 | 100~1000Hz | DS |
| E | 可変 | 5000Hz | N |
| F | 固定 | 5000Hz | N |
| G | 可変 | 1000~5000Hz | N |
| H | 固定 | 1000~5000Hz | N |

4.1.3 実験手順

被験者は実験者から実験の内容についての説明を受け、ゲームの操作に慣れるために触覚を提示せずに 1 試行を行った。実験は一対比較法にて行った。まず感覚 A を提示し、次に感覚 B を提示し、感覚 A, B が比較可能になるまで提示を行い、3 つの選択肢 (A の方がリアル, B のほうがリアル, どちらも言えない) にて回答させた。一人の被験者には 8 条件の重複を持たない 2 組の組み合わせ (28 試行) と重複した条件を含む 2 組の組み合わせ (8 試行) の計 36 試行をランダムな順序で行った。本実験は触覚に焦点をあてるため、実験中はホワイトノイズを提示し聴覚マスキングを行った。被験者は 12 名 (男 10 名, 女性 2 名; 21-26 歳) であった。

4.1.4 実験結果・分析

実験の結果を、A の方がリアルであれば +1, 同程度であれば 0, B のほうがリアルと回答すれば -1 として得点化した。表 2 に重複を持たない 2 組の組み合わせ全 336 試行の平均得点を示す。表内の数値は -1 に近ければ感覚 B の方がリアルだと回答した割合を示し, +1 に近ければ感覚 A の方がリアルだと回答する割合を示す。太文字は 5% 有意水準で有意な組み合わせであることを示している。なお重複した条件を含む 2 組の組み合わせに関しては有意な差のある組み合わせはなかった。

各条件の選択関係をより明確に数値化するため、一般的に使われている一対比較法を用いて評価尺度を求めた。一対比較法とは、ロジスティック回帰モデル[23]へのフィッティングを行いそれぞれの回帰係数を評価尺度に解釈できる手法である。A, B どちらかをリアルだと回答した全 329 試行の観測データを式(2)フィッティングさせた。式(2)内の i, j はそれぞれ 4.1.2 項で示した 8 条件の 2 組の組み合わせ

を示し, β_0 はオフセット値, β_1 から β_8 はそれぞれ条件 A から H の回帰係数を示す。図 5 にそれぞれの評価尺度を示す。グラフにおいて値が大きいほど高い選択率を示す。

$$P(i, j) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_i}}{e^{\beta_0 + \beta_i} + e^{\beta_j}} = \frac{e^{\alpha + (\beta_i - \beta_j)}}{e^{\alpha + (\beta_i - \beta_j)} + 1} \quad (2)$$

ロジスティック回帰モデルへの適合度を調べる Hosmer-Lemeshow chi-square test にて検定を行い回帰モデルへの適合性が認められた ($\chi^2=3.303$, d.f. 8)。すなわち図 5 の尺度は信頼の高い値を示すことが認められた。

表 2 全被験者の回答の平均得点

| | | 感覚 B | | | | | | |
|------|---|-------|------|--------------|-------------|-------------|-------------|------|
| | | B | C | D | E | F | G | H |
| 感覚 A | A | -0.25 | 0.00 | -0.50 | -0.17 | 0.91 | -0.41 | 0.08 |
| | B | | 0.41 | 0.08 | 0.42 | 0.58 | 0.75 | 0.58 |
| | C | | | -0.67 | 0.08 | 0.75 | 0.08 | 0.33 |
| | D | | | | 0.83 | 0.75 | 0.50 | 0.33 |
| | E | | | | | 0.25 | 0.17 | 0.00 |
| | F | | | | | | -0.42 | 0.41 |
| | G | | | | | | | 0.17 |
| | H | | | | | | | |



図 5 各条件における尺度の結果。

4.1.5 考察

図 5 の分析の結果より、8 つの条件の中で B および D が特にリアルさに関して高い評価を得ていたことがわかった。

B は振幅および周波数を固定した 300Hz の減衰正弦波であり、D は振幅が固定され、周波数は動きに合わせて変化した減衰正弦波であった。つまり予想とは異なり、振幅が固定されている場合のほうがリアルさの評価が高いという結果になった。一方で減衰正弦波を用いたものはすべてノイズを用いたものよりも評価が高く、ノコギリの特徴である断続的かつ周期的な振動はリアルさの評価に結びつくことがわかった。

振幅が固定された振動は、言い換えればボタンを動かす速度が一定であることを擬似的に表現していたと考えられる。それゆえユーザは、滑らかな自己運動を想起したと推測される。今回使用した振動生成モデルは擬似弾性感[24]や自己運動感覚[25]を生起させることが知られており、この考察の結果を裏付けることができる。以上の考察よりノイズ波形と比較して歪まない減衰正弦波の方が高評価であることと合わせて結論付けるとユーザは「理想的な自己運

動に伴う、それらしい振動」をリアルであると感じていたと言える。

これは「ボタンを押す」という 10mm 程度の動きが、「ノコギリで切る」という動きに対して非常に小さく、自己運動を正確に把握することが出来ないことが原因の一つかもしれない。またノコギリの本来の振動振幅は速度が低い方が大きいという可能性もある。今後ノコギリの実際の振動を計測するとともに、ノコギリ以外の能動的触覚フィードバックでも本装置を用いた場合に理想的な自己運動を感じるという、同様の傾向を示すかどうかを確認する必要がある。また今回はホワイトノイズを用いて聴覚をマスキングした状態で実験を行ったが、今後はクロスモーダル状況下において能動的触覚が与える影響を調査する必要がある。

4.2 実験 2：動作後に生じる触覚フィードバックの検討

本実験は動作後に刺激を生じる状況での触覚フィードバックの例として、Unity³にて自作した野球ゲームでのバットによる打撃の感触の再現を行い、ゲームの臨場感の評価およびゲームの操作性の評価を行った。またあわせて、実験 1 では聴覚をマスキングした状態で実験を行ったが実験 2 ではクロスモーダル状況下で能動的触覚が与える影響を調査した。

4.2.1 実験環境

自作した野球ゲームはゲーム内に設置されたバッティングマシンから発射されたボールを金属バットで操作し、打ち返すゲームである(図 6)。ゲーム内の効果音はヘッドホンから提示をした。ユーザはボタンの押し込みによってバットをスイングする。押し込みの判定は押し込み距離 x が 10mm 以上になったときを押し込まれたと判定した。触覚はバットのスイング中にボールが当たった瞬間に提示した。ボタンが押し込まれたと判定した瞬間の速さに基づき、以下のゲームのパラメータ、1) バットのスイングスピード、2) ボールの反発速度、3) スイング音、バットとボールの衝突音の音量、4) 振動の強さ、に対して速さ情報をもとに変更した。項の最大速度に基づき 1) から 4) のパラメータを調節した。被験者には 1) の条件のみ伝えた。

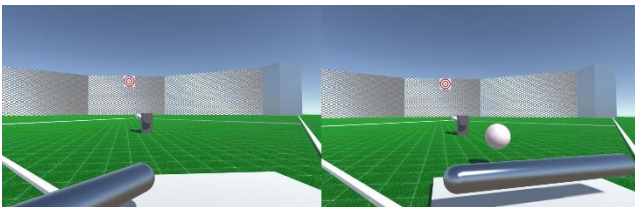


図 6 実験 2 で用いた野球ゲーム

4.2.2 触覚提示条件

触覚提示波形を下記の 3 種類用意した。

- A) バットとボールの衝突の際に使用している効果音の音声波形を 500Hz の低域通過フィルタで触覚提示用

に処理した波形 (LPF 条件)。

- B) バットの金属感を提示する 300Hz 減衰正弦波 (Metal 条件)
C) 一般的なゲームコントローラに搭載している振動モーターの振動を模擬した 50Hz 正弦波 (ERM 条件)

A) の条件は効果音 (聴覚) の文脈から設定した。ただし、今回使用した振動子は触覚だけでなく聴覚も同時に生じ、振動子から出力される音は高域が歪みやすく聴覚的な影響が大きいと考えられたため実際の効果音の波形データに対して LPF500Hz の処理を行った。B) の条件は金属バットの視覚的材質感 (視覚) の文脈より設定した。アルミ素材の衝突における触覚提示の先行研究[22, 26]にもとづき減衰正弦波を設定したが、触覚刺激の提示時間は効果音の長さ (約 0.5 秒) に合わせて提示した。それに伴い波形の減衰率も 0.5 秒の間に減衰するよう調節した。上記の 3 種類の触覚提示方法に加え、触覚を提示しない条件 (w/o H)、ゲームシステムすべての効果音と触覚を提示しない条件 (w/o A-H) を設定した。以上により計 5 条件 (LPF, Metal, ERM, w/o H, w/o A-H) を設定した。

4.2.3 評価項目

臨場感の評価をするため 4.2.2 項の各条件に対し、「球が当たった時の爽快感 (1:非常に不快—4:どちらでもない—7:非常に爽快)」、「実際の球を打っている感じがするか (1:非常に異なる—4:どちらでもない—7:非常に同じ)」、「球の打つ楽しさ (1:非常に楽しくない—4:どちらでもない—7:非常に楽しい)」の 3 項目を、7 段階リッカド尺度を用いて評価させた。実験終了後、拡張機能がもたらすユーザへの影響も調査するためゲーム内のバットの操作性 (1:非常に操作し難い—4:どちらでもない—7:非常に操作し易い) を、ゲーム完成度を評価するためゲーム全体の楽しさ (1:非常に楽しくない—4:どちらでもない—7:非常に楽しい) を、同様に 7 段階リッカド尺度を用いて評価させた。

4.2.4 実験手順

被験者は実験者から実験の内容についての説明を受け、ユーザの嗜好をもとに振動の強さの調節し、ゲームの操作に慣れるために w/o A-H の条件で試し打ちをしてもらった。十分ゲームの操作に慣れた時点でヘッドホンを装着してもらい、実験を開始した。実験中はゲーム内に的を用意し、その的を狙ってもらうよう指示した。

実験者が 4.2.2 項の 5 条件のいずれかに設定し、6 球ボールを打ち返してもらった。この 1 試行に対してボールが当たった爽快感を増加させるため、6 球中 2 球ランダムな順序で当たらないボールを設けた。ボールを打ち返した回数が 6 球のうち 2 球未満であった場合、最低 2 球当たるまで繰り返した。6 球終了後、4.2.3 節の 3 つの評価項目を回答させた。その後条件変更し、全 5 条件をランダムな順で行っ

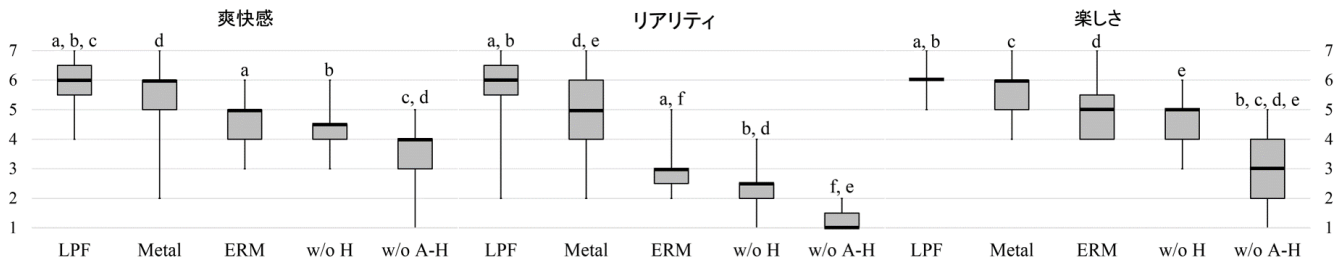


図 7 実験 1 における各条件の主観評価の結果：太線の位置を中央値とし，中央値から上部のボックスは第三四分位数から中央値，下部のボックスは中央値から第一四分位数を表す。エラーバーはそれぞれ最大値・最小値を示す。共通のアルファベットが表示されている 2 組の条件は有意な差 ($p < 0.05$) を示す。

た。被験者は 11 名 (男性 9 名，女性 2 名；21-24 歳) であった。

4.2.5 実験結果・分析

実験の各条件における主観評価の結果を図 7 に示す。触覚提示条件によって 3 つの評価に変化が生じたかを検証するため，多重比較 (Steel-Dwass 法) を用いて統計処理を行った。爽快感の項目では a(LP F, ERM: $t=2.78, p < 0.05$), b(LP F, w/o H: $t=3.24, p < 0.05$), c(LP F, w/o A-H: $t=3.73, p < 0.05$), d(Metal, w/o A-H: $t=2.81, p < 0.05$) の条件間に有意な差が認められた。リアリティの項目では a(LP F, ERM: $t=3.07, p < 0.05$), b(LP F, w/o H: $t=3.53, p < 0.05$), c(LP F, w/o A-H: $t=4.01, p < 0.05$), d(Metal, w/o H: $t=3.39, p < 0.05$), e(Metal, w/o A-H: $t=3.99, p < 0.05$) の条件間に有意な差が認められた。楽しさの項目では a(LP F, w/o H: $t=3.43, p < 0.05$), b(LP F, w/o A-H: $t=3.99, p < 0.05$), c(Metal, w/o A-H: $t=3.60, p < 0.05$), d(ERM, w/o A-H: $t=3.15, p < 0.05$), e(w/o , w/o A-H: $t=2.91, p < 0.05$) の条件間に有意な差が認められた。操作性の評価は中央値が 5 点 (最大 5 点，最小 3 点)，ゲーム全体の楽しさは中央値が 6 点 (最大 6 点，最小 4 点) であった。

4.2.6 考察

操作性およびゲーム全体の楽しさの評価が 4 点 (どちらでもない) を超えていることから，この 2 つの完成度に関して大きな問題はなかったと考えられる。また被験者の内観報告よりボタンの入力速度に応じてスイング速度が変化させることは直感的で扱い易かったという肯定的な評価より，今回行った入力機能の拡張は有用性が高いと考える。

ERM が現在の一般的な家庭用ゲーム機の振動モータによる触覚を模擬しているため，w/o H に比べ爽快感，リアリティ，楽しさの項目において比較的良好な傾向であったことは，現在家庭用ゲーム機で体験できるゲームの触覚提示は臨場感向上に有効であることを示している。一方で，ボイスコイル型振動子でしか再現できない LP F と Metal の条件は，LP F がすべての項目で他の条件より高い評価を，Metal は ERM と比較してリアリティの項目で高い評価を受けている。以上よりこの 2 つはともに従来多く用いられている触覚提示手法よりも優れているといえる。LP F が特に

高い評価を得ている理由のひとつは，今回音との整合性が最も高かったことが大きな理由であると考えられる。

被験者の内観報告において被験者の一部で Metal の条件の触覚，視覚情報をもとに打った感触がアルミニウムの材質感であるという報告があった。これが本来の金属バットで期待される触覚よりも振動強度が弱いという印象を与え，LP F 条件に比べると低いスコアにつながった可能性がある。一方で LP F の条件下でテニスボールのような感触が返ってきたという報告があり，LP F によって生じた低域成分の強調自体によって，本来よりも「柔らかい」という印象を生じていた可能性もある。今後は木のバット等複数の材質を表現するとともに，今回の知見が動作後に触覚を与える一般的な状況に適用できるか，複数のゲームで試す必要がある。

5. おわりに

本稿では複数種類の感触を提示できる多感触ボタンを用いて 2 種類のゲームに対して能動的触覚フィードバックを行い，触覚が与える臨場感の調査を行った。能動的触覚フィードバックを行う状況を「動作中」「動作後」の 2 種類に分類し，それぞれの状況に対して様々な触覚を提示し，適切な触覚提示の検討を行った。実験 1 では動作中における能動的触覚提示の調査を行った。実験 1 の結果において振幅を固定した断続的かつ周期的な振動が，理想的な自己運動を伴う振動を感じさせることがわかった。実験 2 では動作後における能動的触覚提示の調査を行った。実験 2 の結果より聴覚的文脈によって設計する触覚が臨場感向上において有効であるということが示唆された。

今後の課題として，今回論じた触覚の設計方法が他のゲームに適用できるか，調査を行う予定である。

参考文献

- 1) S. Y. Kim, K. Y. Kim, B. S. Soh, G. Yang and S. R. Kim: Vibrotactile Rendering for Simulating Virtual Environment in a Mobile Game, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 52, No. 4, 2006.
- 2) W. Park, L. Kim, H. Cho and S. Park: Design of haptic interface for

- breakout game, IEEE International Workshop on Haptic Audio visual Environments and Games (HAVE) 2009, pp.64 - 68, 2009.
- 3) S. Andrews, J. Mora, J. Lang and W. S. Lee: HaptiCast: A Physically-Based 3D Game with Haptic Feedback, Proc. of Future Play 2006, 2006.
- 4) 小川, 蜂須, 梶本: 物理的なボタンへの触振動付与による多感触ボタンの設計, Proc. of the 2015 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (ROBOMECH) 2015, 2A1-B01. 2015.
- 5) 任天堂株式会社. Nintendo64 振動パック.
<http://www.nintendo.co.jp/n01/n64/option/sindop.html>
- 6) D. Chang: Haptic: Gaming's New Sensation, IEEE Journal on Computer, Volume 35, Issue 8, pp.84-86, 2002.
- 7) M. Orozco, J. Silva, A. E. Saddik and E. Petriu: The Role of Haptics in Games, In Tech Journal on Haptics Rendering and Applications, pp.217-234, 2012.
- 8) S. J. Lederaman: The perception of surface roughness by active and passive touch, Springer-Verlag Journal on Bulletin of the Psychonomic Society, Volume 18, Issue 5, pp.253-255, 1981.
- 9) E. Chapman: Active versus passive touch: factors influencing the transmission of somatosensory signals to primary somatosensory cortex, Canadian Journal of Physiology and Pharmacology, Volume 72, Issue 5, pp.558-570.
- 10) Y. Kurihara, S. Takei, Y. Nakai, T. Hachisu, K. J. Kuchenbecker and H. Kajimoto: Haptic Robotization of the Human Body by Data-Driven Vibrotactile Feedback. Elsevier Journal on Entertainment Computing, Volume 5, Issue 4, Pages 485-494, December 2014.
- 11) D. Koge and T. Itagaki: Virtual Chanbara, Proc. of ACM Conf. on SIGGRAPH 2002 abstracts and applications pp.83-83, 2002.
- 12) D. Morris, J. Neel, and K. Salisbury: Haptic Battle Pong: High-Degree-of-Freedom Haptics in a Multiplayer Gaming Environment. Experimental Gameplay Workshop, Proc. of UBM Tech Game Network Conf. on Game Developers Conference (GDC) 2004, Experimental Gameplay Workshop, 2004.
- 13) S. Zhao, O. Schneider, R. Klatzky, J. Lehman and A. Israr: FeelCraft: Crafting Tactile Experiences for Media using a Feel Effect Library, Proc. of ACM Symp. on User Interface Software and Technology (UIST) 2014, pp.51-52, 2014.
- 14) 4DFX Haptic Gaming Vest, Immerz, Inc.
<http://korfx.com/>
- 15) P. Lemmens, F. Crompvoets, D. Brokken, J. v. d. Eerenbeemd and G. d. Vries: A body-conforming tactile jacket to enrich movie viewing, Proc. of Third Joint EuroHaptics Conf. and Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp.7-12, 2009.
- 16) A. Israr, I. Poupyrev, C. Ioffreda, J. Cox, N. Gouveia, H. Bowles, and T. Williams: Surround Haptics: Sending Shivers Down Your Spine, Proc. of ACM Conf. on SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies, 2011
- 17) M. Karam, C. Branje, G. Nespoli, N. Thompson, F. A. Russo and D. I. Fels: The Emoti-Chair: An Interactive Tactile Music Exhibit, Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI) 2010 Extended Abstracts, pp.3069-3074, 2010.
- 18) S. Ohshima, Y. Hashimoto H. Ando, J. Watanabe and H. Kajimoto: Simultaneous Presentation of Tactile and Auditory Motion on the Abdomen to Realize the Experience of "Being Cut by a Sword", Proc. of The EuroHaptics Society (EHS) Conf. on EuroHaptics 2008, pp.681-686, 2008.
- 19) E. Courtenay Wilson, Louis D. Braid, and C. M. Reed: Perceptual Interactions in the Loudness of Combined Auditory and Vibrotactile Stimuli, The Journal on the Acoustical Society of America, Volume 127, Issue 5, pp.3038-3043, 2010.
- 20) N. Nishimura, T. Hachisu, M. Sato, S. Fukushima and H. Kajimoto: Evaluation of a Tactile Device for Augmentation of Audiovisual Experiences with a Pseudo Heartbeat, Proc. of 4th Augmented Human International Conf. 2013, Poster, 2013.
- 21) D. W. Weir, M. A. Peshkin, J. E. Colgate and P. Buttolo: Design and performance of a high fidelity, low mass, linear haptic display, Proc. of Third EuroHaptics Conf. and Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems 2005, pp.177-182, 2005.
- 22) A.M. Okamura, M. R. Cutkosky, and J. T. Dennerlein: Reality Based Models for Vibration Feedback in Virtual Environments. IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, 6(3), pp.245-252, 2001.
- 23) D. W. Hosmer, and S. Lemeshow: Applied Logistic Regression, John Wiley & Sons, New York, 2003.
- 24) J. Kildal: Kooboh: Variable tangible properties in a handheld haptic-illusion box. Haptics: Perception, Devices, Mobility, and Communication, vol. 7283. Springer, pp.191-194, 2012.
- 25) S. Kim and G. Lee: Haptic Feedback Design for a Virtual Button Along Force-Displacement Curves. Proc. of ACM Symp. on User Interface Software and Technology (UIST) 2013, pp. 91-96, 2013.
- 26) T. Hachisu, M. Sato, S. Fukushima and H. Kajimoto: HaCHIStick: Simulating Haptic Sensation on Tablet PC for Musical Instruments Application, Proc. of ACM Symp. on User Interface Software and Technology (UIST) 2011, pp.73-74, 2011.