



自動車をモーションプラットフォームとした

VR システムにおける振動提示(第 3 報):

振動と揺動と効果音のクロスモーダル刺激による VR 体験の変化

塩野入 央空¹⁾, 櫻木 怜¹⁾, 小玉 亮¹⁾, 梶本 裕之¹⁾

1) 電気通信大学 情報理工学研究科

(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {shionoiri, sakuragi, kodama, kajimoto}@kaji-lab.jp)

概要: 我々は自動車をモーションプラットフォームとして用いる VR システムの開発を行ってきた。また、我々はこの VR システムに振動子を搭載し、振動と揺動を同時に提示することで、揺動に衝突感や衝突物体の材質感を付与できることを確認してきた。しかし、装置の実際の用途を考慮すると、コンテンツ体験時には映像、振動、揺動だけでなく、効果音などの聴覚刺激も行われることが想定される。聴覚刺激は知覚に大きな影響を与えることが知られていることから、本稿では振動と揺動と効果音による VR 体験の変化について調査し報告する。

キーワード: クロスモーダル, モーションプラットフォーム, バーチャルリアリティ, 振動触覚

1. はじめに

1.1 背景

我々は自動車をモーションプラットフォーム (MP) として用いる VR システムの開発を行ってきた[1] (図 1)。本システムでは、アクセルとブレーキの切り替えにより、前後揺動の提示を行っている。本システムにはアクセルとブレーキの高速な切り替えが難しいことから、低周波な揺動しか提示できないという問題が存在する。この問題により、衝突などの幅広い周波数成分の提示が行われるべき映像に対して高品質なフィードバックができなかった。

1.2 関連研究

上述の問題を解決するため、我々は揺動と同時に座面に取り付けた振動子による振動提示を行うことを提案した[2]。また、前後揺動に重畳することで材質感を付与できる振動波形のパラメータを提案した[3]。

これまでの検討において、我々は効果音など聴覚フィードバックを行なってこなかった。しかし、実際の商用 VR コンテンツを考えると、ほぼ全てのコンテンツで効果音など聴覚フィードバックが用いられている。聴覚刺激は触覚知覚に影響を与えることが知られている (例えば Parchment-skin illusion[4])。このことから、効果音のある VR コンテンツにおいて、我々が提案してきた振動と揺動の組み合わせによる材質感提示の効果は変化することが予測された。本稿はこの変化を調査する目的で行った 主観評価実験について報告する。

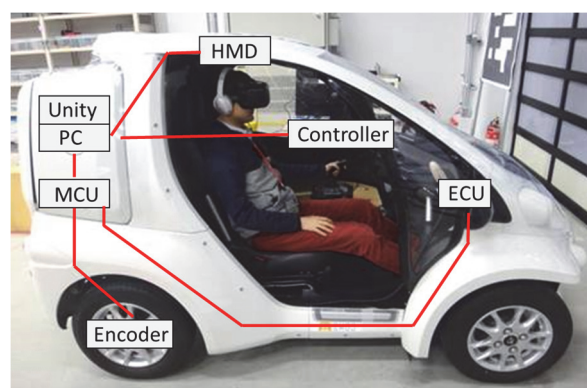


図 1: 自動車を MP として用いる VR システム ([1] より)

2. 実験装置

本稿で報告する実験において使用した実験装置について説明する。簡略化と安全のため、実験では実際の自動車ではなく、自動車を模した揺動装置を用いた (図 2)。

前後の揺動が行えるように台車 (DSK-101, ナンシン) をベースに用いた。台車の上に木板 (ランバーコア, W155 × D46 × H2[cm]) を取り付けた。また、プレイシート (playseats Blue/Black, playseat company) とハンドルコントローラー (GT Force RX LPRC-12000, Logicool) を木板の上に取り付け、運転席周辺を再現した。前後揺動を行うため、直動アクチュエータ (F1420-200, Yamaha) を木板に取り付けた。

振動提示を行うための振動子は、座席と搭乗者の接触部

周辺に取り付けた。設置箇所はハンドル、アクセルペダル、シート座面、シート背面である。ハンドルは振動子 (Vp408, Acouve Laboratory Inc) を上部一ヶ所に固定した (図 3-A)。シート背面にはクッションと表面のカバーの間に振動子 (Vt708, Acouve Laboratory Inc.) を設置した (図 3-B)。アクセルペダルはペダル前面に振動子 (Vp604, Acouve Laboratory Inc.) を固定した (図 3-C)。シート座面は座面に用いられているウレタンクッションを切り抜いて振動子 (Vt708, Acouve Laboratory Inc.) を埋め込んだ (図 3-D)。振動子への信号入力はマイクロコントローラ (mbed NXP LPC 1768, ARM) から行なった。

聴覚刺激として提示する音声は PC に接続されたイヤホンから出力した。



図 2 : 実験装置全体の構成

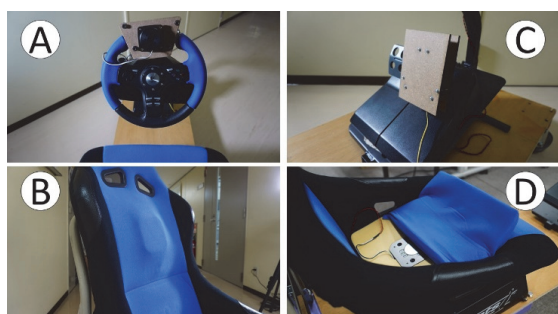


図 3 : 振動子の取り付け位置

3. 被験者実験

これまでに提案してきた振動刺激と全身揺動の重畳による材質感提示の効果が、効果音の追加によってどのような変化をするか調査するため、被験者実験を行なった。

3.1 実験セットアップ

実験には実験装置の他に、ヘッドマウントディスプレイ (HMD; Oculus Rift, Oculus) と制御用のノート PC を用いた。HMD へ出力する VR 映像は Unity を用いて制作した (図 4)。映像は、車に搭乗したプレイヤーが衝突対象に向かって直進し衝突するという内容である。衝突対象は大きなタイヤ、木製のキューブ、アルミニウム製のキューブの 3 種類である。制御用の PC には HMD 以外に直動アクチュエータ操作用のコントローラ、振動出力用のマイコン、効果音提示用のイヤホンが接続されていた。



図 4 : 実験用 VR 映像のスクリーンショット

効果音は商用データベースにて購入したものを使用した (www.soundsnap.com)。効果音の選定に関しては、ゴム、木、アルミニウムとの衝突音を録音した効果音の中から、実験者が最も相応しいと判断したものを選択した。選定した効果音について、音信号の最大振幅が等しくなるように編集を施し、衝突対象との衝突時に発生する効果音として Unity に組み込んだ。

振動提示用の信号は以下の式(1)で表される減衰正弦波を用いた。

$$V(t) = Ae^{-Bt} \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

ここで、 V はマイコンから出力される電圧の指令値である。 V の最大値は 0.5、最小値は -0.5 とした。 A は初期振幅を表す。 B は減衰正弦波の減衰率を表す。 f は減衰正弦波の周波数を表す。 t は時刻を表す。各パラメータの値は、先行研究で我々が報告したパラメータ[3]を用いた (表 1)。表 1 のパラメータは、振動と揺動の重畳提示において、各

表 1 : 先行研究[3]で報告した振動パラメータ

Material	A	B (s^{-1})	f (Hz)
Rubber	0.325	6.5	30
Wood	0.021	6.0	100
Aluminum	0.295	4.0	300

素材の材質感の提示に有効であることが分かっている。

VR 空間における衝突対象との衝突時にシリアル通信を行うことにより、マイコンと直動アクチュエータに信号を送り、振動提示と揺動提示を行なった。前後揺動は自動車 VR システムの揺動方式を踏まえて、直動アクチュエータの可動部が前方に 20cm 移動して停止するという方法で生じた。前方までは約 400ms で到達し、速度は約 1.8km/h

であった。搭乗者の重量によって若干速度が変化したため、事前に重量ごとの速度の変化を記録し、重量ごとの適切な信号出力タイミングを導出した。これを用いて、振動、揺動、効果音の提示が同時に行われるように事前に調整を行った。なお、振動と効果音はそれぞれの信号波形が最初のピークに達するタイミングを基準とした。揺動は加速度センサで加速度を計測し、水平軸の加速度が負になるタイミングを基準とした。これは搭乗者が慣性力により水平軸前方に力を感じ始めるタイミングであり、衝突の表現に適していると判断したためである。

3.2 実験条件

10名（女性1名男性9名、22-24歳）が被験者として実験に参加した。はじめに、被験者を装置に搭乗させ、実験に関する説明を行った。説明の後、刺激に驚いて正確な評価が行なえなくなることを防ぐため、ランダムな刺激で予行演習を行なった。その後試行を開始した。試行中、被験者は装置に搭乗し、HMDとイヤホン、イヤーマフを装着していた。試行中はハンドルを握り、アクセルペダルに足をかけるように指示をした（図5）。

刺激条件は映像3条件×振動3条件×揺動1条件の9種類であり、それぞれを1回ずつ、合計で9試行行なった。映像はタイヤ、木のキューブ、アルミニウムのキューブに衝突する映像の3種類であった。効果音は、それぞれの衝突対象に対して実験者が最適であると選定したものを1種類ずつ設定した。衝突対象ごとに効果音は固定とし、他の衝突対象用に用意した効果音を使用しての試行は行なわなかった。振動は表1のゴム、木、アルミニウムの3種類のパラメータを使用した。揺動は常に同じ指令で提示を行なった。

9種類の刺激の順番はランダムに決定された。1試行ごとに被験者にアンケートを行なった。アンケートの項目は表2のとおりである。アンケートには7段階のリッカートスケールで回答した。本アンケートでは、1を「非常に低い」、7を「非常に高い」として回答させた。



図5：実験の様子

表2：実験の質問項目

Question1	衝突の自然さはどれくらいでしたか？
Question2	楽しさはどれくらいでしたか？
Question3	快適さはどれくらいでしたか？
Question4	満足度はどれくらいでしたか？

3.3 実験結果

実験の結果を図6、図7、図8、図9として示す。Objectは映像内での衝突物体を表し、Vibrationは振動条件を示す。例えば、ObjectがRubberの欄の黄色い箱ひげ図は、映像条件がタイヤへの衝突であり、振動条件がwoodのパラメータであったことを意味する。四分位範囲の1.5倍を超えた値はひげに含まずドットとして示した。1名の被験者が「実際の事故を想起したために恐怖を感じた」とコメントしており、特に楽しさ、快適さの評価において他9名の傾向と著しく差があったため、楽しさ、快適さの評価からは外れ値として除外した。

Steel-Dwass法により、各評価項目の各映像条件におけるスコアについて有意差検定を行なったが、有意差の見られる組み合わせは存在しなかった。

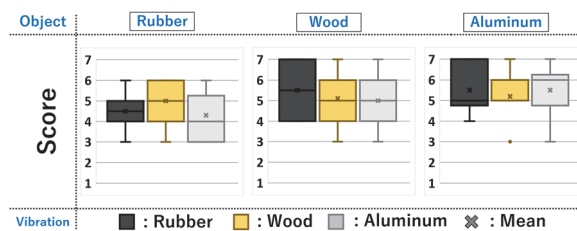


図6：自然さの評価

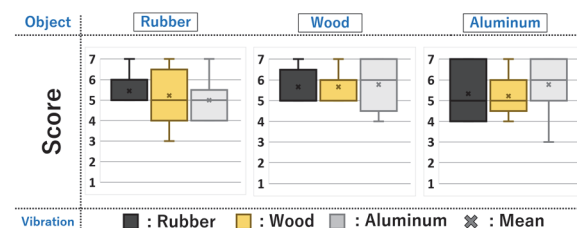


図7：楽しさの評価

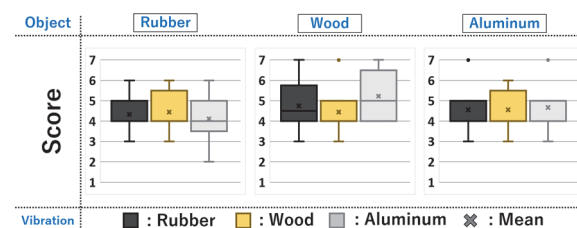


図8：快適さの評価

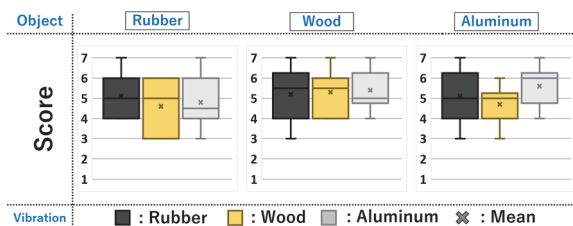


図 9：満足度の評価

4. 考察

実験の結果より、自然さ、楽しさ、快適さ、満足度、という評価項目においては、振動刺激の違いによって体験の差がほとんどなかった。特に、自然さの評価は我々の前回の報告[3]でも調査を行なった項目であるが、本実験の結果はその時の傾向とは大きく異なる。我々の前回の報告では、衝突物体の材質に対応する振動条件の時に自然さの評価が高くなった。また、タイヤや木との衝突条件において、アルミニウムの振動パラメータは著しく自然さの評価が低くなった。更にアルミニウムとの衝突条件において、ゴムや木の振動パラメータは著しく評価が低くなった。刺激条件において、前回の報告と本稿で報告した実験の間で異なる点は効果音の有無である。このことから、自然さの評価への影響は、聴覚刺激が振動刺激よりも大きい可能性がある。ただし、前回の報告とは参加した被験者が異なるなどの問題もあることから、それらを考慮した追加の検証が必要である。

実験後の被験者からのコメントとして、「振動刺激の違いがほとんどわからなかった」という意見が多かった。それらのコメントの中では、アルミニウムのパラメータの振動刺激を「他よりも響く振動」と区別できるが、それ以外は変わらないと感じる者が多かった。また、効果音が変化していると感じていた者が3名いた。

前回の報告で振動刺激と揺動刺激のみで実験を行なった際、アルミニウム用の振動刺激はアルミニウム以外の衝突対象のフィードバックとしては評価が低く、被験者からのコメントでも違和感が指摘され、好まれない傾向にあった。しかし、今回はアルミニウム用の振動刺激を好むとコメントした者が3名おり、楽しさや満足度の評価も他の振動刺激よりも若干高い傾向にあった。また、好む理由や高評価をした理由として「振動をはっきりと知覚できて楽しい、気持ちがいい」「響く感覚が楽しい、心地よい」という理由が多く述べられていた。考えられる要因として、知覚のしやすさ、振動刺激のエネルギー、効果音とのマッチングの3つがある。アルミニウム用の振動パラメータは、他の振動刺激に比べ人間の指先受容器で知覚しやすい周波数である。更に減衰率も他に比べて低く、時間的に長く振動する。この二つの理由からアルミニウムの振動刺激は他の振動刺激よりも知覚しやすく、フィードバックを受けたことを実感しやすいため、好まれた可能性がある。また、

周波数が最も高く、最も長く響く振動刺激であることから、アルミニウム用の振動刺激は与えるエネルギーが最も高い刺激でもある。このことから、強い衝撃感を感じ、楽しさや満足度が向上した可能性も考えられる。周波数や減衰率、あるいは信号波形全の概形などにおいて、効果音と振動刺激のマッチングができていた可能性も要因として考えられる。これらの要因を今後の検証で特定する必要がある。

楽しさや快適さの評価理由として、相手を吹き飛ばした感覚の有無を複数人が回答していた。それらの被験者は、映像上の効果として、自分が衝撃を与えた側だと心地よく、衝撃を与えられた側だと心地悪く感じていた。また、タイヤへの衝突において、他の映像条件に比べ自然さの評価が全体的に低かった。これは我々の選定した効果音が影響したと考えられ、今後は被験者がもっともらしいと考える効果音を設定するステップを設ける必要がある。

5. 結論

本稿では、我々がこれまでに提案した振動と全身揺動の組み合わせによる材質感提示の効果が、効果音の追加によりどのように変化するか、主観評価実験を用いて調査した。実験ではVR空間でタイヤ、木のキューブ、アルミニウムのキューブに衝突する際に振動、揺動、効果音を提示した。実験の結果、前回の報告の結果とは異なり、振動パラメータの違いによる評価の差がなくなった。また、提示された振動刺激の違いがほとんど分からなかったというコメントが複数得られた。

今後は条件を整えて効果音の有無による変化を計測するとともに、評価の傾向から振動と効果音の効果的な組み合わせ方を調査していく。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP15H05923 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] R. Kodama, M. Koge, S. Taguchi, H. Kajimoto: COMS-VR: mobile virtual reality entertainment system using electric car and head-mounted display, in *IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, pp. 130-133, 2017.
- [2] 塩野入央空, 櫻木怜, 小玉亮, 岡崎龍太, 梶本裕之: 自動車をモーションプラットフォームとした VR システムにおける振動提示 (第2報): 直動アクチュエータと振動子の組み合わせによる検証, 第22回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2017.
- [3] H. Shionoiri, R. Sakuragi, R. Kodama, H. Kajimoto: Vibrotactile feedback to combine with swing presentation for virtual reality applications, in *Eurohaptics*, pp.114-124, 2018.
- [4] V. Jousmaki, R. Hari: Parchment-skin illusion: sound-biased touch, in *Curr. Biol.*, vol. 8, no. 6, pp. R190-191, Mar. 1998.