This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere

第 22 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集（2017 年 9 月）

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

塩野入央空 [1)]，櫻木怜 [1)]，小玉亮 [1)]，岡崎龍太 [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， okazaki， 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た VR システムを開発してきた．このシステムは，アクセル開度とブレーキの切り替えによって全身揺動を提示するため，提示可能な周波数が低周波に限定されるという課題がある．この課題を解決するために，我々は自動車の運転席周辺に振動子を設置し，振動提示を全身揺動に重畳することを提案する．本稿では，自動車の代替として単軸の直動アクチュエータを用いて提示した全身揺動と振動子による振動提示の組み合わせに関する調査について報告する．

キーワード：モーションプラットフォーム，揺動，振動触覚，

1. はじめに

1.1 背景

モーションプラットフォーム（MP）を用いた体感型コンテンツを家庭で安価に実現するために，我々は自動車を MP として用いる VR システムを開発してきた[1] (図 1). 本システムは自動車のアクセルとブレーキを切り替えることによって全身への揺動を提示している．しかしながら，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，2Hz 程度まで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は高品質なフィードバックができなかった．

1.2 関連研究

上述の自動車 VR システムの課題を解決するために，我々は振動子による振動提示を全身への揺動に重畳することを提案した[2]. 映像に合わせて振動と揺動を同時に提示することにより，従来の揺動のみの提示よりも VR 体験を向上させることが本提案の目的である．Okamura ら[3]や Higashi ら[4]の力覚提示装置に振動を重畳する手法を提案しており，振動提示は材質感や硬さの提示に有効であることが示されている．この例に習い，重畳する刺激として振動提示を選択した．

我々と同様にエンタテイメント体験や VR 体験の向上を目的として振動提示を用いた例は複数する．Branje ら[5]の Emoti-Chair では，椅子に取り付けた振動子による全身への振動提示により，音楽体験の向上を行った．Sakata ら[6]は，ラケットでボールを打つ際の振動を実際に計測し，前腕部にその振動を提示することによって，ラケットでボールを打った感覚を提示した．Gongora ら[7]は自転車で山道を走る映像の体験者に対し，手の中に握ったデバイスを通して振動提示を行うことにより，映像体験のリアルさが向上したと報告している．

Bellmann ら[8]は座面の振動提示機能を持った MP を開発している．しかしながら，座面の振動提示と MP の揺動の組み合わせによる効果について評価や検証は行っていない．また，我々の知る限り，これについて検証を行った研究例はその他にも存在しない．

本稿では，振動子の振動提示と全身揺動の重畳刺激によ

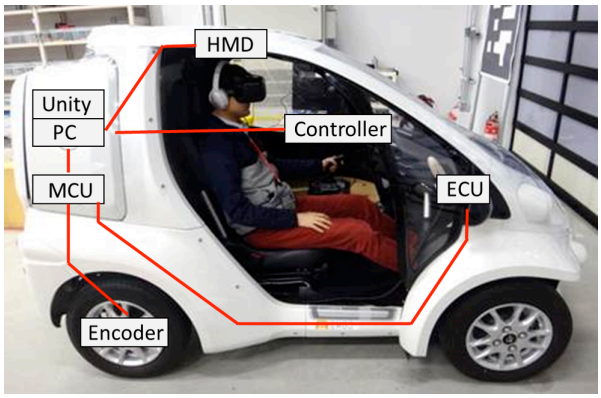

図 1：自動車を MP として用いる VR システム（[1]より）

Taro VIRTUAL， Jiro KAKUCHOU， and Hanako GENJITSU

る VR 体験への影響を調査するために行った主観的評価実験について報告する．

2. 実験装置

本稿で報告する実験において使用した装置の構成について説明する（図 2）．我々の目的は自動車 VR システムにおける効果の検証であるため，本装置は自動車を模した形状である．

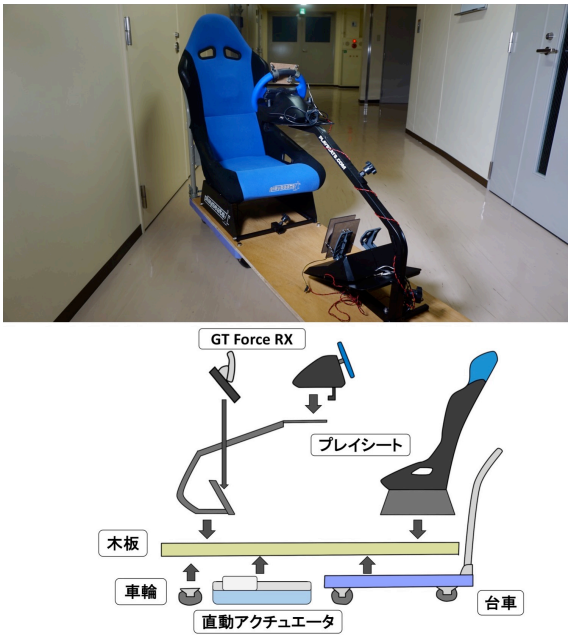

図 2：実験装置全体の構成

前後の揺動が行えるよう台車(DSK- 101，ナンシン)を用い，その上に木板(ランバーコア，W155×D46× H2[cm])を取り付け車の底面とした．また，プレイシート (playseats Blue/Black，playseat company)をランバ ー板の上に取り付け運転席とし，ハンドルコントローラー (GT Force RX LPRC-12000， Logicool)をハンドルとアク セルペダルとしてプレイシート上に取り付けた．また，前報では台車を人力で駆動していたが，今回はより正確な実験を行うため，前後揺動を行うためのアクチュエータとして直動アクチュエータ（F1420-200， Yamaha）を取り付けた．

振動提示は座席と搭乗者の接触部周辺に振動子を取り付けるという方法を用いた．設置した場所はハンドル，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, AcouveLaboratory 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）．

また，PC からの振動信号は USB-DA コンバータ（DA-300USBS，DENON）とオーディオアンプ（A-5VL(s)，ONKYO）を介して振動子へ出力した．

図 3：振動子の取り付け位置詳細

3. 被験者実験

3.1 実験 1：弁別閾測定実験

はじめに，振動と揺動の重畳提示において，主観的に重畳刺激として許容される時間差を測定する実験を行った．

3.1.1 実験セットアップ

実験は実験装置の他にオシロスコープと加速度センサ（KXR94-2050， Kionix）を用いた．また，実験用に製作したコンソールアプリケーションから直動アクチュエータへのシリアル通信と振動波形出力を行った．振動と揺動の時間差はコンソールアプリケーションによって生起した．また，その時間差が正しく保たれているかオシロスコープによって確認した．オシロスコープへの入力信号は，アンプから振動子へ出力される信号と，直動アクチュエータに接続された加速度センサが出力する前後方向の加速度の電圧値とした．各装置とソフトの構成図は図 4の通りである．

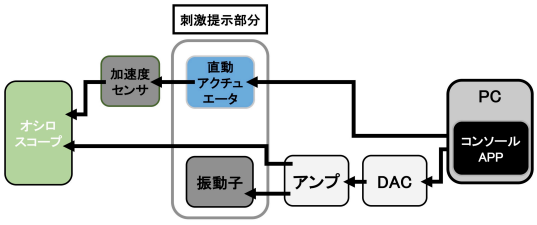

図 4：実験 1 セットアップの構成図

3.1.2 実験条件

揺動は単軸アクチュエータによって提示された．振動は 35Hz，650ms の減衰正弦波が振動子によって提示された．直動アクチュエータが動作し，動作部分が端に到達する時刻を揺動の基準として，振動の出力タイミングが-35， 0，+35， +70， +105ms の刺激を用意した．具体例として，時間差-35ms のときは，アクチュエータが動き出し，約 1 秒かけて動いた後に端で停止する時刻の 35ms 前に振動が発生していたことを意味する．予備実験の結果，直動アクチュエータの動作部分が端に到達する瞬間を最も衝突の瞬間と解釈しやすかったため，この時刻を基準とした．

被験者は 3 名（全員男性，21-23 歳）であった．被験者はそれぞれの刺激を 10 回ずつ，ランダムな順番で体験した．刺激を 1 回体験するごとに，被験者は「振動と揺動のどちらを先に感じたか」という質問に対して「振動」か「揺動」のどちらか一方を答えた．

3.1.3 実験結果

各被験者の測定結果は図 5，各被験者の結果を平均化した結果は図 6のようになった．

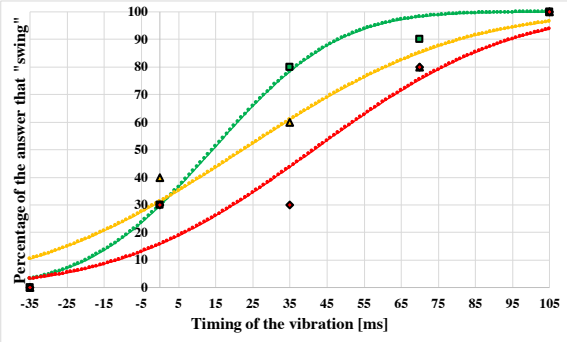

図 5：各被験者の測定結果

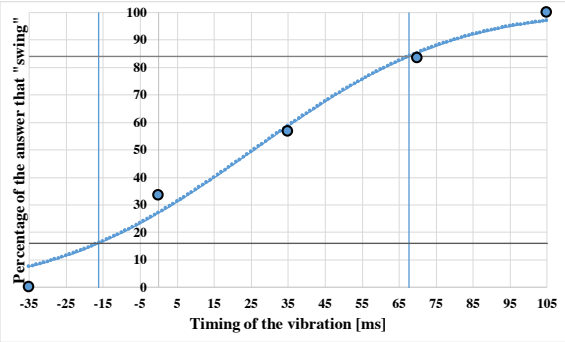

図 6：全被験者の結果を平均化した測定結果

結果に対して累積正規分布フィッティングを行い，84%弁別閾を求めることにより，揺動を基準として，-16ms – 67ms の間に振動提示を行うことで，振動と揺動が主観的に重畳されている刺激が可能であることがわかった．

3.2 実験 2：主観評価実験

前後揺動に振動提示を重畳した際に，実際に VR 体験に与える影響を調べるため，実験装置を用いて主観的評価実験を行った．

3.2.1 実験セットアップ

実験は実験装置の他に，Oculus Rift と Unity を用いて製作した VR コンテンツを使用した．また，実験用に製作した VR コンテンツから UDP 通信を利用して信号を受け取り動作するコンソールアプリケーションを用いて，直動アクチュエータへのシリアル通信と振動子への振動波形出力を行った．各装置とソフトの構成図は図 7の通りである．

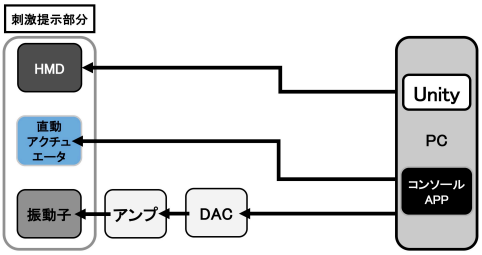

図 7：実験 2 セットアップの構成図

3.2.2 実験条件

揺動は単軸アクチュエータによって提示された．振動は 35Hz，650ms の減衰正弦波が振動子によって提示された．実験 1 と同様に，振動提示は直動アクチュエータが端に到達する時刻に合うように提示した．

HMD を通して提示する映像は，車が直進し，先にあるブロックの壁に衝突するものとした（図 8）．なお，振動や揺動の刺激は壁にぶつかる瞬間に合わせて提示した．

被験者は全 12 名（女性 5 名，男性 7 名）であった．映像に合わせて行った刺激は振動のみ，揺動のみ，振動と揺動の重畳刺激，の 3 種類であった．被験者は，はじめに基準刺激として揺動のみ刺激で映像を体験した．直後，3 種類のいずれかの刺激をランダムに体験し，質問に 7 段階のリッカートスケールで答えた．質問は以下の 3 問であった．

Q1．基準刺激と比べ，体験の臨場感はどうでしたか？
（1:全く感じなかった 4:基準と同じくらい 7:とても感じた）
Q2．基準と比べ，体験の自然さはどうでしたか？
（1:全く感じなかった 4:基準と同じくらい 7:とても感じた）
Q3．振動子からの振動は感じましたか？
（1:全く感じなかった 7:とてもはっきりと感じた）

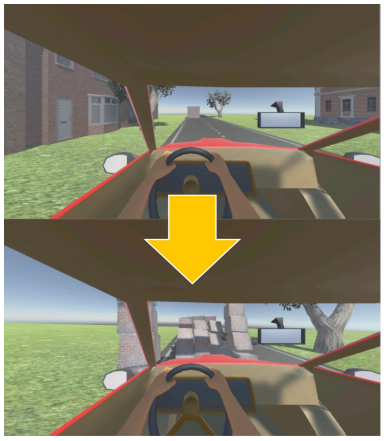

図 8：実験に用いた VR コンテンツ

3.2.3 実験結果

臨場感および自然さの回答結果は図 9，図 10のようになった．Steel-Dwass 検定による有意確率 5%以下の組み合わせを*，有意確率 1%以下の組み合わせを**としてグラフ中に記述した．

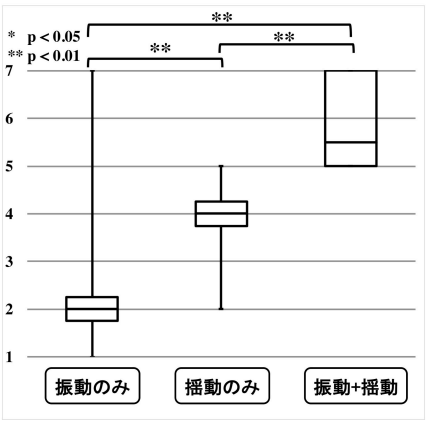

図 9：臨場感の回答結果（1:全くない 7:とてもある）

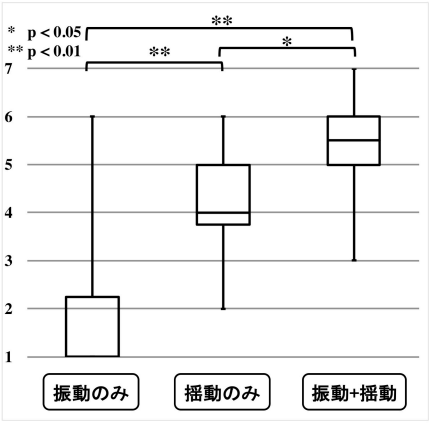

図 10：自然さの回答結果（1:全くない 7:とてもある）

結果より，振動と揺動の重畳刺激は，従来の振動のみの刺激や揺動のみの刺激よりも優位に臨場感と自然さを向上させることが分かった．

4. 考察

実験 1 において，C++で製作されたコンソールアプリケーションから時間差の制御を行っていることと荷重によって直動アクチュエータの動作が若干変化することから，揺動と振動のタイミングがずれることがあった．実験 1 ではその問題への対処としてオシロスコープにより時間ズレを正確に確認していた．こうした確認にも関わらず，振動と揺動が物理的に同時の場合よりも，振動をやや遅らせた場合の方を「同時」と知覚しやすいという結果は興味深い．一つの理由として振動の方が知覚自体が早い可能性があると考えられるが，今後の検討が必要である．

制御プログラムの問題と搭乗者の体重や路面状況による前後揺動にかかる抵抗値の変化は実際の自動車 VR システムでも考えられる問題であるため，対処が必要である．

実験 2 において，ほとんどの被験者は振動刺激がある試行とない試行で，振動知覚に関する回答が 1 もしくは 7 とはっきり別れていた．しかしながら，2 名の被験者は揺動刺激のみの場合にも振動を知覚した答えていた．また，これに関して個別に追加アンケートを行った結果，振動子からの振動をはっきり感じたと思っていたこと，振動が重畳されていた方が揺動の触感が明らかに変わったと知覚していたことがわかった．振動が重畳されたときに，明らかに揺動の衝撃感が変化するとコメントした被験者は他にも複数名いた．

振動刺激のみの場合が最もリアルであり，さらに振動刺激だけを受けた時にも全身が動いている気がした，というコメントをした被験者が 1 名いた．また，数名の被験者は「自分のイメージと刺激のタイミング，大きさ，種類が異なる」というコメントをしていた．これらは，全て個人の持つ衝突のイメージの違いから生まれる問題であると考えられる．被験者は全員実際の衝突体験をしたことはなかったことと，今回の刺激は実際の衝撃を元に用意されたものではなかったことから，評価に若干の個人差が生まれた可能性がある．

5. 結論

本稿では自動車を MP とした VR システムの体験を向上する手段として，自動車が生起する低周波な揺動に振動提示を重畳することを提案した．まず同時の刺激と知覚させるためには振動と揺動の時間差がどれくらい許容されるかを調べ，振動と揺動の重畳刺激が実際に VR 体験に及ぼす影響を調査した．その結果，揺動刺激を基準とした時に，許容される振動提示のタイミングが-16ms – 67ms であることがわかった．また，振動と揺動の重畳刺激は，振動や揺動単体の提示に比べて有意に臨場感と自然さを向上させることがわかった．

今後は実際に自動車 VR システムに振動子を搭載し，臨場感や自然さの評価を行っていく．

謝辞　本研究は JST-ACCEL「身体性メディア」プロジェクトの一環として行われた．

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 システムにおける自動車の HMI 周辺における振動提示，第 21 回バーチャルリアリティ学会大会, 2016.

[3] A. M. Okamura, M. R. Cutkosky, J. T. Dennerlein: Reality-based models for vibration feedback in virtual environments, in *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 6, no. 3, pp. 245–252, Sep. 2001.

[4] K. Higashi, S. Okamoto, H. Nagano, M. Konyo, Y. Yamada: Perceived Hardness by Tapping: The Role of a Secondary Mode of Vibration, in *AsiaHaptics 2016*, pp. 27-32.

[5] C. Branje, M. Karam, D. Fels, F. Russo: Enhancing entertainment through a multimodal chair interface, in *Science and Technology for Humanity, 2009 IEEE Toronto International Conference*, pp. 636–641.

[6] S. Sakata, H. Nagano, M. Konyo, S. Tadokoro: Multipoint vibrotactile stimuli based on vibration propagation enhance collision sensation, in *EuroHaptics 2016*, pp. 65–74.

[7] D. Gongora, H. Nagano, M. Konyo, S. Tadokoro: Vibrotactile rendering of camera motion for bimanual experience of first-person view videos, in IEEE WorldHaptics 2017, to be published.

[8] T. Bellmann, J. Heindl, M. Hellerer, R. Kuchar, K. Sharma, G. Hirzinger: The DLR robot motion simulator part I: design and setup, in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4694–4701.