

応用論文

音から生成した全身振動の周波数特性が高次感性に与える影響
～多感覚情報の高次感性を定める要因の解明を目指して～阿部 翔太^{*1} 山高 正烈^{*2} 坂本 修一^{*1}
鈴木 陽一^{*1} 行場 次朗^{*3}Effects of Frequency Characteristics of Full-Body Vibration Generated from Auditory Signal
on the High-Level Perception of Reality-To Find out the Factors that Determine the High-Level Perception of Reality
of Multisensory Information-Shota ABE^{*1} Zhenglie CUI^{*2} Shuichi SAKAMOTO^{*1} Yôiti SUZUKI^{*1} and Jiro GYOBA^{*3}

Abstract – It has been reported that the reality perceived from audio-visual content is enhanced by adding vibrations generated by low-frequency components of sound. However, it is still unclear what characteristics of the generated vibrations affect the perceived reality. In this study, we regarded the generated vibrations as amplitude modulation (AM) signals and investigated the manner in which the carrier frequency of the sine wave and cutoff frequency of the low-pass filter applied to the sound affect the perceived reality. The experimental results showed that the manipulation of the carrier frequency had little effect on the sense of presence and verisimilitude, while an increase in the cutoff frequency induced a higher sense of verisimilitude. Moreover, the vibrations related to the foreground event of audio-visual content were retained by applying a low-pass filter with a high cutoff frequency. These results suggest that perceived reality, especially the sense of verisimilitude, could be enhanced by adding vibrations generated using appropriate parameters.

Keywords : presence, verisimilitude, multimodal integration, perceived reality, full-body vibration

1 はじめに

近年の情報科学技術の進歩により、視聴覚情報に加えて体性感覚や嗅覚などより多くの感覚情報を含んだバーチャル・リアリティ (VR) 空間の構築が可能となり、より自然でリアリティのある VR 空間の実現につながっている。このような VR 空間をユーザに快適に体験させるためには、「あたかもその場にいるような感じ」や「本物らしい感じ」などの高次感性を利用者に生起させることが重要である。ここで、これらの高次感性を適切に利用者に知覚させるためには、人間がどのように高次感性を処理しているかを明らかにした上で、その知見に根差したシステムの構築が必要となる。このような視座の下、我々は視聴覚情報に全身振動情報を加えた VR 空間において、多感覚コンテンツにおける全身振動情報の提示が高次感性に与える影響を調

査してきた。その結果、全身振動情報の付加が高次感性知覚に重要な役割を果たすことが示された [1][2]。

しかし、現状のコンテンツには全身振動情報が含まれていないのが一般的であり、このようなコンテンツにおいて全身振動情報を利用するためには何らかの感覚情報から作り出す必要がある。そこで我々は、音と振動の関連性が深いという知見 [3][4] に基づき、音情報から振動情報を生成する方法を提案した [5]。一般に、可聴音の上限周波数は人間が全身振動として知覚できる上限よりも非常に高いため、不要な高周波数帯域を削除する必要がある。そこで提案法では、JIS-C1510[6] における人間の全身を対象とする振動感覚の周波数特性を考慮し、音情報の 70 Hz 以下の低周波数成分を振動と見立てた。感性評価実験の結果、生成された振動は実測振動とは異なる特性を持つにも関わらず、実測振動と同程度に「その場にいる感じ」や「本物らしい感じ」を促進し得ることが示された。

音から生成した振動の有効性を示した研究はほかにもいくつかあり、例えば Lee らは、音から生成した振動を人の接近に合わせて提示することで、「人と交流し

*1 東北大学大学院情報科学研究科/電気通信研究所

*2 愛知工科大学

*3 東北大学 大学院文学研究科

*1 Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

*2 Aichi University of Technology

*3 Graduate School of Arts and Letters, Tohoku University

ている感じ」が促進されることを報告した [7]. 同様に, Merchel らは, 音楽と共に音から生成した振動を提示することで「コンサートを体験している感じ」が促進されることを示した [8]. Merchel らは, 低域通過フィルタを適用した音の時間波形を振幅変調波形と見立て, 時間信号から得られた包絡線に正弦波を搬送波として適用して振動波形を生成する方法を提案し, 生成振動が高次感性知覚を促進させたことを報告した [9]. 加えて, 搬送波周波数を変えることにより, 被験者に想起される高次感性が変化することを示した. この方法は, 遮断周波数を高く設定しつつ搬送波周波数を操作することで, モーションプラットフォームが稼働可能な周波数帯域内で信号を制御することができる. したがって, 上限周波数があまり高くない, もしくは広帯域の振動を再生できないようなモーションプラットフォームでも再生可能な振動を生成できる利点がある.

しかし, Merchel らの方法は音自体に演奏者の意図が含まれる音楽でしかその有効性が確かめられておらず, あるイベントによって自然に生じる音を対象としてもその方法が有効であるかは不明である. また, 先行研究では, 音に適用する低域通過フィルタの遮断周波数は固定されており, 音から生成する振動の時間包絡と搬送波周波数の二つの物理的な特性が高次感性の促進にどのように寄与するかを系統的に明らかにすることはできなかった. 振動と関連した音は, 振動源となる人や物体にあわせて強弱が変動する成分が周波数依存性を持ちうる [10] ため, 音から生成した振動の時間包絡は, 適用する低域通過フィルタの遮断周波数の値によって大きく変動する. 更に, 振動レベルの周波数特性 [6] から, 人間が知覚する振動の大きさは周波数に依存するため, 遮断周波数の違いにより生じる時間包絡の変動と搬送波周波数の両者には交互作用が生じる可能性も考えられる.

そこで本研究では, 衝撃的な自然音が多く含まれるコンテンツとしてバスケットボールの試合コンテンツを選定した上で, 音に適用する低域通過フィルタの遮断周波数と, 低域ろ波された音波形の時間包絡に適用する正弦波の周波数(搬送波周波数)の両方をパラメータとし, これらが高次感性に与える影響を検討することで, 自然音で構成されたコンテンツにおいての遮断周波数と搬送波周波数の影響を検討した.

2 実験 1

実験 1 では, 遮断周波数と, 搬送波周波数をパラメータとして音から振動を生成し, これらが高次感性に与える影響を検討する.



図 1 収録風景

Fig. 1 Recording scenery

2.1 被験者

被験者は, 正常な視覚(矯正を含む)と聴覚を有する大学生および大学院生 18 名(男性 10 名, 女性 8 名, 平均年齢 21.8 歳, 標準偏差 SD=1.6)であった.

2.2 実験刺激

実験刺激として, バスケットボールの試合風景(3 on 3 形式)の映像, 音, 振動を記録した収録素材から 180 秒を切り出した. 収録素材はビデオカメラ(Panasonic, AG-3DA1)の撮影方向に並ぶようにダミーヘッド(高研, SAMRAI)と加速度ピックアップ(RION, PV-84)を設置し, 映像, 音, および振動情報を収録した. 収録風景を図 1, 視聴覚刺激と加速度ピックアップの設置場所, および試合場所の広さなどの収録環境を図 2 に示す. なお, ビデオカメラの画角は水平画角 45 度, 垂直画角 35 度であった.

音刺激は, ダミーヘッドの両耳に挿入したバイノーラルマイクロフォン(B&K, 4101)を通して, ビデオカメラに映像と時間同期した状態で収録した. それにあわせて, 実際の振動情報として, 床面にしっかりと固定した加速度ピックアップを用いて, 上下方向の振動変位を測定した. 加速度ピックアップとコンデンサマイクロフォンの出力を AD 変換器(小野測器, DS-0264)に接続し, AD 変換器で収録した音声信号と, ビデオカメラで収録した音信号とを同期信号として使用することで, 映像, 音, 振動の 3 種の感覚刺激の同期を取った. 実験時に再生した音圧レベルについては, 収録時にその場で聞いた音と同じ音圧レベルであり, 時間率騒音レベル L_{A20} で 73.8 dB であった.

本実験で使用する振動は, JIS C1510 における振動感覚の周波数特性 [6] と, 本実験で使用するモーションプラットフォーム(D-BOX MASTERING MOTION, D-BOX)の再生能力を総合的に考慮して, 70 Hz 以下の周波数帯域のみとした. そこで, 実測値については, 収録した振動に対して遮断周波数 70 Hz (512 次, FIR フィルタ)の低域通過フィルタを適用した振動情

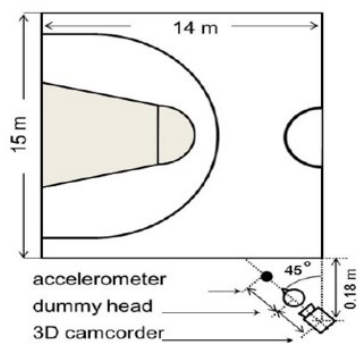


図2 収録環境

Fig. 2 Recording environment

報を用いた（以下、Originalと記す）。

音情報から生成した振動情報については、図3に示した信号処理の流れに沿って生成した。まず、ダミーヘッドにより収録した両耳信号をダウンミックスしてモノフォニック信号を生成した後、この後に行うフィルタ処理の遮断周波数が極めて低いことを考慮し、ダウンサンプリングを行った（48 kHz → 1 kHz）。続いて、その波形に遮断周波数を30, 70, 200 Hzのいずれかに設定した低域通過フィルタ（512次、FIRフィルタ）を適用した。次に、人間の振動の感覚と最も対応のある振動の物理量は振動加速度である[11]ことに鑑み、低域通過フィルタを適用した後の波形を二階微分して振動加速度に変換した。その後、振動振幅の包絡的な変動を抽出するために、半波整流を行った後の波形に遮断周波数8 Hzの低域通過フィルタ（512次、FIRフィルタ）を適用した。さらに、抽出した振幅時間変動を変調波、周波数が20, 40, 60 Hzの正弦波を搬送波として両側波帯搬送波抑圧変調を行った。最終的にはこの波形を振幅変位波形とみなした。

搬送波周波数については、100~200 Hzの帯域の周波数をもつ振動はチクチクと刺すような感覚を被験者に提示する[8]という報告を参考に、60 Hzを最大の搬送波周波数とした。なお、変調波である振幅時間変動は負の成分を含まなかったため、両側波帯搬送波抑圧変調の結果、搬送波の位相は反転することがなかった。最後に、全ての生成振動を実測振動と等しい振動レベル[6]となるように全体の波形を調整した後に、振動を再生するモーションプラットフォームが再生可能なサンプリング周波数にあわせてアップサンプリングを行った（1 kHz → 8 kHz）。なお、全時間にわたって算出した実測振動の振動加速度レベルは100.1 dB、時間率振動レベル L_{A20} は84.2 dBであった。

9つの生成振動（遮断周波数3条件×搬送波周波数3条件）は、遮断周波数を「Cut周波数」、搬送波周波数を「Carrier周波数」と表現し、9つの振動条

件を「Cut周波数_Carrier周波数」（例えば、遮断周波数30 Hz、搬送波周波数20 Hzの場合は、Cut-Freq30_CarrierFreq20）と呼称した。これらに実測振動条件を比較条件として加え、本実験は10条件で実験を行った。図4に、0~20秒までの各遮断周波数条件の時間波形の時間包絡を示す。

2.3 実験環境

実験環境の概要を図5に示す。実験は東北大学電気通信研究所本館内に設置されたシールド暗室にて行われた。収録素材の視覚刺激（解像度:1920 × 1080 pixel, フレームレート:30 fps）、聴覚刺激（サンプリング周波数:48 kHz, 量子化ビット数:16 bit）、および全身振動となる振動刺激（サンプリング周波数:8 kHz, 量子化ビット数:16 bit, 上下方向）を、それぞれDLPプロジェクタ（SANYO, PDG-DHT100JL）、密閉型ヘッドフォン（SENNHEISER, HDA-200）、モーションプラットフォーム（D-BOX, MASTERING MOTION）から提示した。被験者の立ち位置からスクリーンまでの距離を2.5 mとし、映像提示画角は被験者からおおよそ90 deg（水平方向）、50 deg（垂直方向）であった。被験者の右側にスロットルレバー型コントローラ（SAITEK, Throttle Quadrant）を設置した。このコントローラは上下方向のみに滑らかに可動し、レバー位置を保持することもできる。可動範囲は0~90 deg, 最小可動角度はおおよそ0.2 degで、1 s間に10個のデータを取得可能であった。

2.4 実験手続き

実測振動（Original）1条件、音情報から生成した振動9条件の合計10条件を、被験者に対しカウンタバランスを取って提示した。18人の被験者を臨場感を評価するグループと迫真性を評価するグループで同数になるように分け、それぞれ割り振られた感性指標についてのみ回答するよう求めた。割り振りの結果、両グループ共に男性5名、女性4名になった。実験に先立って、それぞれのグループに、臨場感は「その場にいる感じ」、迫真性は「本物らしい感じ」と説明した。被験者は、試行ごとに体験中および体験後の印象強度を回答した。

実験の流れは以下のとおりである。初めに被験者の正面方向となるスクリーン位置に十字の注視点が表示される。その後、180秒の実験刺激が提示される。この間、手元のコントローラを操作して、コントローラのレバーの回転角度と、試行中に体感した感性指標の印象強度が時間的にできるだけ一致するように回答するように教示した。このとき、レバーの角度が最大（90 deg）のときを「日常生活で経験する最大の臨場感または迫真性に対応」、最小（0 deg）のときを「臨場感または迫真性が全くない状態に対応」するよう指

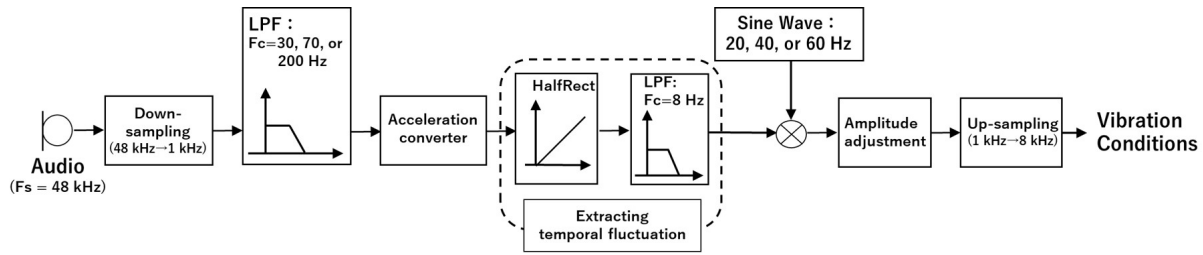


図3 信号処理の流れ

Fig. 3 Schematic diagram of signal processing

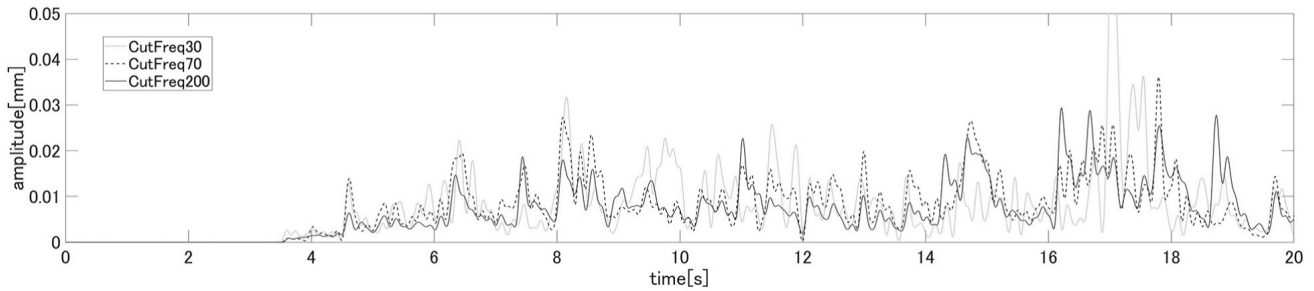


図4 各遮断周波数条件の時間波形の時間包絡

Fig. 4 The temporal fluctuation of each cutoff frequency conditions

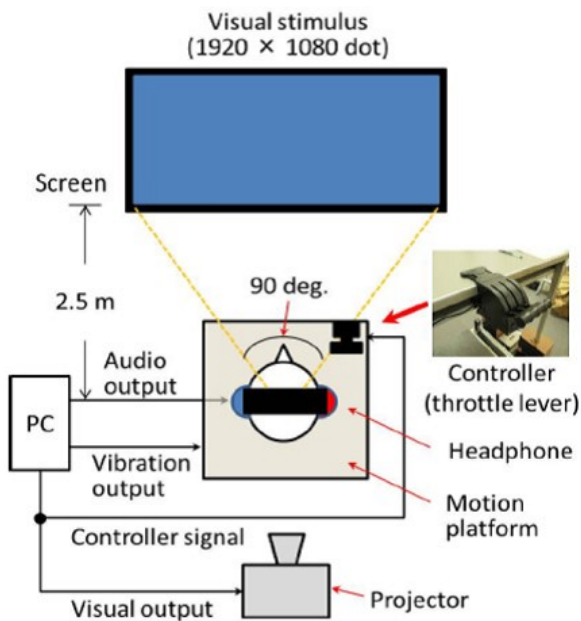


図5 実験環境の概要

Fig. 5 Experimental setup

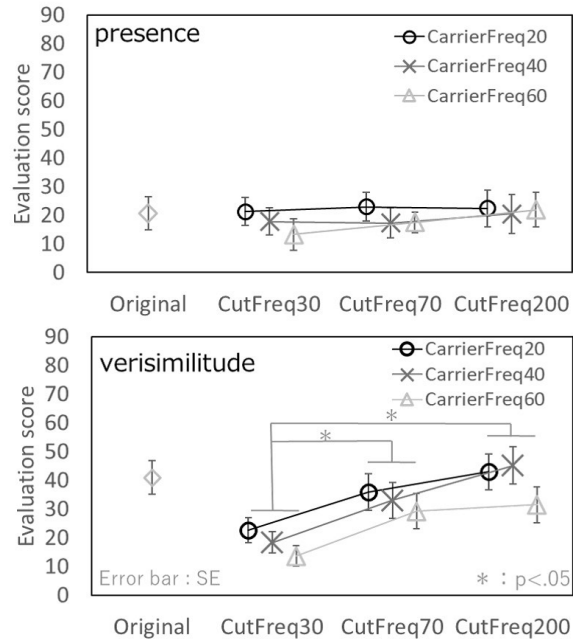


図6 試行中の印象強度の平均値

Fig. 6 Average evaluation scores during the presentation

示した。試行開始時は必ずレバーの角度を最小の状態に戻し、試行中は手元のレバーを見ないで操作して評価させた。さらに、実験中において最大角度を超える場合があったときには、超える状況があったことを試行後に報告するように伝えた。ただし、本実験では最大角度を超えて回答した被験者はいなかった。また、1試行が終了するごとに、試行全体の印象強度について7段階（0：臨場感または迫真性が全くない、7：日

常生活で経験する最大の臨場感または迫真性）で回答させた。

2.5 実験結果

各被験者の体験中における印象強度の値を振動条件ごとに時間平均を行った後に、各感性指標ごとに9人の被験者で平均したものを図6に示す。図6を見ると、臨場感評価においては、実測振動条件も含む全て

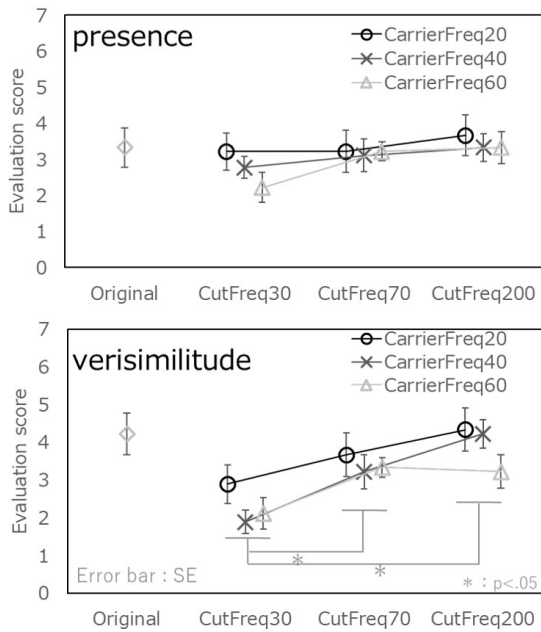


図7 試行後の印象強度の平均値

Fig.7 Average evaluation scores after the presentation

の条件間において印象強度に顕著な差は生じていないように見える。一方、迫真性評価では各遮断周波数条件間に大きな印象強度の差が見て取れる。即ち、遮断周波数が増加するに従って、印象強度も増加傾向を示しており、遮断周波数 70 Hz, 200 Hz 条件においては、実測振動条件と同程度の印象強度を示しているように見える。

遮断周波数と搬送波周波数が高次感性に与える影響を統計的に検討するために、各振動条件における試行中の平均評価値を対象に、臨場感と迫真性に分けて、遮断周波数 3 条件×搬送波周波数 3 条件の二要因分散分析を行った。その結果、臨場感においては、遮断周波数条件、搬送波周波数条件の各主効果、両者の交互作用全てに有意差が認められなかった（遮断周波数： $F_{2,16} = 0.76, n.s.$, 搬送波周波数： $F_{2,16} = 1.42, n.s.$, 交互作用： $F_{4,32} = 0.59, n.s.$ ）。一方で、迫真性においては、遮断周波数条件にのみ有意差が認められ（ $F_{2,16} = 15.9, p < .01$ ）、搬送波周波数条件、両者の交互作用には有意差は認められなかった（搬送波周波数： $F_{2,16} = 1.87, n.s.$, 交互作用： $F_{4,32} = 0.36, n.s.$ ）。多重比較検定（Bonferroni 法, $p < .05$ ）の結果、遮断周波数 30 Hz 条件が他のいずれの遮断周波数条件よりも迫真性が有意に低いことが示された。

各試行後に行った臨場感および迫真性についての 7 段階の印象評価の平均値を、図 7 に示す。図から、各振動条件間の評価の傾向は、図 6 に示されている試行中の評価の平均値の傾向とほぼ同様の傾向を示していることが分かる。体験中の印象評価の場合と同様に、

臨場感と迫真性ごとに遮断周波数 3 条件×搬送波周波数 3 条件の二要因分散分析を行った。その結果、臨場感においては、遮断周波数条件、搬送波周波数条件の各主効果、両者の交互作用全てに有意差が認められなかった（遮断周波数： $F_{2,16} = 2.15, n.s.$, 搬送波周波数： $F_{2,16} = 0.65, n.s.$, 交互作用： $F_{4,32} = 0.75, n.s.$ ）。一方で迫真性においては、遮断周波数条件にのみ有意差が認められ（ $F_{2,16} = 18.07, p < .01$ ）、搬送波周波数条件、両者の交互作用には有意差は認められなかった（搬送波周波数： $F_{2,16} = 1.72, n.s.$, 交互作用： $F_{4,32} = 1.47, n.s.$ ）。多重比較検定（Bonferroni 法, $p < .05$ ）の結果、遮断周波数 30 Hz 条件が他のいずれの遮断周波数条件よりも迫真性が有意に低いことが示された。

2.6 考察

実験 1 の結果、臨場感、迫真性のどちらの感性指標においても、実測振動条件と同程度の印象強度を得られた生成振動条件が存在していた。先行研究において、本研究で用いた実測振動と同一の振動条件が振動を提示しない場合よりも有意に高次感性を促進していたため [5]、上記の生成振動条件は振動を加えない場合よりも高次感性を促進していた可能性が高い。よって、自然音で構成されたコンテンツにおいても Merchel らの方法の有効性が確かめられたと考える。

また、特に遮断周波数の操作が迫真性評価に大きく影響を及ぼした。即ち、遮断周波数の増加は迫真性の印象強度の増加に結びついていた。そこで、遮断周波数の違いがどのように生成振動の時間包絡に影響したかについて分析を行った。その結果、特にバスケットボールがバウンドするタイミングにおいて、遮断周波数の違いによる時間包絡の変化が顕著であった。即ち、遮断周波数の増加に従ってバスケットボールのバウンドするタイミングに提示される振動の振幅が大きくなっていった。今回の結果で示された遮断周波数の増加による迫真性知覚の促進は、この振動の提示の差異が影響した可能性が高い。

3 実験 2

実験 2 では、遮断周波数の違いによって、コンテンツ内の特定の事象に生じた振動の差異が高次感性知覚にどのような影響を与えたかについて詳しく検討を行う。具体的には、ボールのバウンドを含む事象であるドリブルに着目し、まず、それが生じている場面を評定者に抽出させた。その後、各遮断周波数条件ごとの振動の差異が、抽出された事象においてどの程度高次感性知覚に影響を与えていたかを、実験 1 において測定した試行中の評価を解析することで検討した。

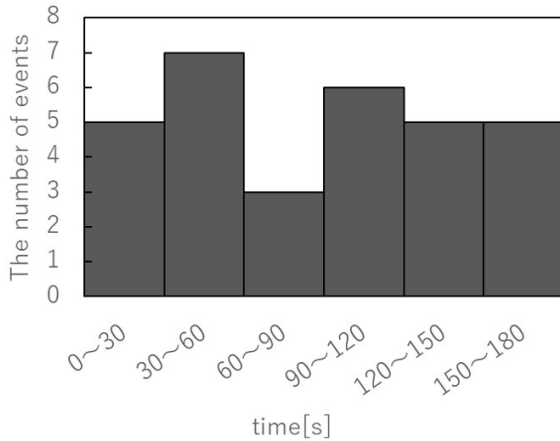


図8 時間区間ごとに集計したドリブル区間の個数の分布

Fig.8 Histogram of dribble events

3.1 ドリブルに該当する区間の抽出

3名の調査目的を知らない評定者に本コンテンツで使用した180秒の視聴覚刺激を観察させた。視聴覚刺激は、VLCメディアプレイヤー (Video LAN) を用いて再生し、評定者は、再生、停止、早送り、早戻し、コマ送りを自由に行うことができた。実験は実験1と同じ場所で行い、実験刺激提示機器もすべて実験1と同じものを用いた。被験者には、ドリブルが行われている場面を全て抽出させ、その開始および、終了時間を10分の1秒単位で解答用紙に記入するように求めた。一つのドリブルの開始および、終了時間は、日本バスケットボール協会におけるドリブルの定義 [12] を参考に回答させた。以下、抽出されたドリブルが行われている時間を「ドリブル区間」、それ以外の時間を「非ドリブル区間」と表現する。

少なくとも2名が一致した時間をドリブル区間として抽出した結果、31個のドリブル区間が抽出された。図8に時間ごとに抽出されたドリブル区間の個数の分布をまとめた。また、ドリブル区間の音の周波数特性と、非ドリブル区間の音の周波数特性を図9に示した。加えて、遮断周波数条件ごとに、抽出された各ドリブル区間における振動レベルを計算し、全ドリブル区間で平均したところ、遮断周波数30Hz条件で84.9dB、70Hz条件で86.1dB、200Hz条件で86.4dBであった。

3.2 抽出された区間での臨場感、迫真性の印象強度の算出

抽出された各ドリブル区間を用い、ドリブル区間における高次感性知覚の印象強度の変化を各振動条件ごとに検討する。実験1で測定された試行中の評価において、実験2で抽出された全てのドリブル区間における、ドリブル終了時の印象強度から開始時の印象強度の差分を行った後に、全ドリブル区間で平均したもの

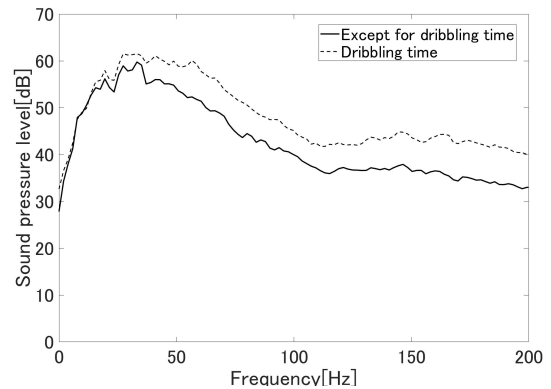


図9 ドリブル区間と非ドリブル区間の音の周波数スペクトル

Fig.9 Frequency spectrums of sound of "dribbling time" and "except for dribbling time"

をドリブルにより生じた高次感性知覚の印象強度の変化量とみなした。この印象強度の変化量を被験者ごとに測定し、振動条件で各感性指標ごとに9人の被験者で平均したものを図10に示す。図10から、臨場感評価においては、搬送波周波数60Hzのみ遮断周波数の増加に従って印象強度が増加する傾向を示し、迫真性評価においては、すべての搬送波周波数条件において遮断周波数の増加に従って印象強度が増加していることが読み取れる。また、臨場感評価における遮断周波数30Hz、搬送波周波数60Hz条件、迫真性評価における遮断周波数30Hzの3条件は、その変化量が0に近く、実測振動条件とも差があることが見て取れる。

臨場感と迫真性ごとに遮断周波数3条件×搬送波周波数3条件の二要因分散分析を行った結果、臨場感においては、遮断周波数条件、搬送波周波数条件の主効果に有意差が認められず、遮断周波数条件、搬送波周波数条件の交互作用に有意差が認められた (遮断周波数: $F_{2,16} = 3.14, n.s.$, 搬送波周波数: $F_{2,16} = 1.12, n.s.$, 交互作用: $F_{4,32} = 4.6, p < .01$)。交互作用について単純主効果を調べたところ、搬送波周波数60Hz条件における遮断周波数条件 ($F_{(2,16)} = 7.96, p < .01$)、遮断周波数30Hz条件における搬送波周波数条件 $F_{(2,16)} = 3.74, p < .05$) にそれぞれ有意差が認められた。多重比較検定 (Bonferroni法, $p < .05$) の結果、搬送波周波数60Hz条件において、遮断周波数200Hz条件が30Hz条件よりも有意に高いことが示され、遮断周波数30Hz条件における搬送波周波数条件間には有意差は認められなかった。一方で迫真性においては、遮断周波数の主効果にのみ有意差が認められ ($F_{(2,16)} = 18.82, p < .01$)、搬送波周波数条件、両者の交互作用には有意差は認められなかった (搬送波周波数: $F_{2,16} = 0.57, n.s.$, 交互作用:

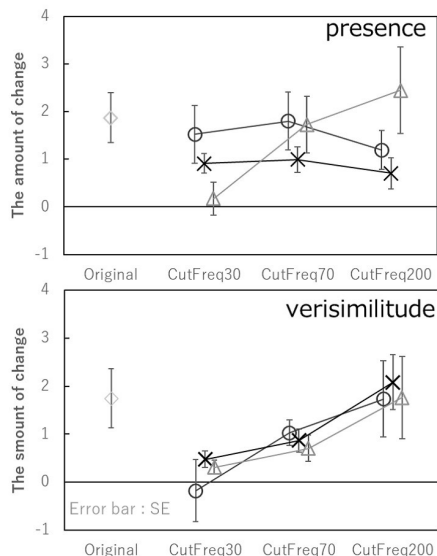


図 10 ドリブル区間における印象強度の変化量
Fig. 10 The amount of change of evaluation score during dribbling time

$F_{4, 32} = 0.51, n.s.$. 多重比較検定 (Bonferroni 法, $p < .05$) の結果, 遮断周波数 200 Hz 条件が 30 Hz 条件よりも有意に高いことが示された.

3.3 音と実測振動の時間包絡の相関関係

ドリブル区間において, 遮断周波数が高い条件は実測振動と同程度に迫真性知覚を促進させた. そこで, 1 オクターブバンドごとの音と実測振動の時間包絡の相関関係について検討を行った. 具体的には, ドリブル区間と非ドリブル区間における, 実測振動と 1 オクターブバンドごとの音の時間包絡の相関係数を調べた. 振動と音の時間ずれを考慮し, 相関係数の導出は以下の手順で行った. まず, 音に 1 オクターブバンド (中心周波数 31.5, 63, 125 Hz) のバンドパスフィルタを適用し, 各ドリブル区間と各非ドリブル区間ごとに, 実測振動とオクターブバンドごとの音の相互相関関数を計算した. その結果, ほとんどの区間において, 音が時間的に先であることを意味する位置で相互相関関数が最大となった. 構造物の床振動の伝搬について調べた研究において, 振動の伝搬速度が約 120 m/s であったことが報告されている [14]. このことから本実験環境下においても, 音の伝搬速度の方が振動の伝搬速度より速かったと考えるのが合理的であるため, 全ての区間において, 音が時間的に先になる範囲で相互相関関数が最大となる時間を求めた. その後, それを基に全ての区間において実測振動とオクターブバンドごとの音の時間合わせを行い, 実測振動とオクターブバンドごとの音の時間包絡の相関係数を計算した. 最後に, 計算した相関係数をドリブル区間, 非ドリブル区間ごとに平均した (表 1).

表 1 1 オクターブバンドごとの音と実測振動の時間包絡の相関係数

Table 1 Correlation coefficient of temporal fluctuation between the original vibration and sound with 1 octave band filters

ドリブル区間		非ドリブル区間	
1オクターブバンド中心周波数[Hz]	相関係数	1オクターブバンド中心周波数[Hz]	相関係数
31.5	0.64	31.5	0.66
63	0.58	63	0.54
125	0.62	125	0.44

3.4 考察

まず, 音に適用する低域通過フィルタの遮断周波数の増加がボールのバウンド時に提示される振動振幅の増加につながった理由について考察する. 図 9 に示されたドリブル区間と非ドリブル区間の周波数スペクトルをみると, 音のレベルは周波数が 30 Hz を超えると, ドリブル区間の方が非ドリブル区間より約 10 dB ほど高い値になる. また, 表 1 に示された実測振動と音の包絡線間の相関係数をみると, 非ドリブル区間については音の周波数が高くなるにつれて低くなるのに対し, ドリブル区間では音の周波数が高くなってもほぼ同じ値が保たれる. 非ドリブル区間において, 主要な音は人の移動により発生する音であることを考慮すると, ドリブル区間において増加する 30 Hz 以上の音には主にボールのバウンドによる音が含まれていると推測できる. したがって, 包絡線を求める音信号の遮断周波数を増加させることは, ドリブル区間において, 実測振動と相関が高く, ボールのバウンド時の振動が増加するような振動の生成につながったと考えられる.

次に, 遮断周波数を高くして振動を生成することが, 特に迫真性知覚の促進につながった理由について考察する. 先行研究 [13] 「本物らしい感じ」と定義される迫真性は, 主に前景の物体を評価する指標である. 今回使用したコンテンツにおいて, 選手がドリブルするイベントは被験者の注目をよく集め, より前景になりやすいイベントであったと考えられる. 更に, ドリブルはその映像からボールがバウンドする瞬間がよく確認できる. 即ち, 観察者は, 選手のドリブルに注目した際に, ボールがバウンドする瞬間にも振動を期待した可能性が高い. このようなイベントに対して, ボールの情報を多く含むように遮断周波数を高く設定し作成した振動を提示することで, 視聴覚情報と振動情報が強く関連することになり, 観察者の期待を満たしたと考えられる. よって, 今回の結果で示された遮断周波数の増加が特に迫真性知覚の促進に結びついたことは, 遮断周波数を高く設定することで, 振動条件の時間包絡がコンテンツ内の前景となるイベントと結びつ

いたことが一因であったと考えられる。即ち、前景となるイベントの音情報を含むように遮断周波数を高く設定することが重要であり、本実験においては遮断周波数 200 Hz を用いることで結果的に使用したコンテンツに適した遮断周波数となっていたと考えられる。

一方、搬送波周波数の影響が見られた先行研究 [9] とは異なり、搬送波周波数の違いは迫真性評価にほとんど影響を及ぼさなかった。その原因として、使用したコンテンツの違いによる影響が考えられる。本実験で用いたコンテンツは、先行研究で用いられた人工的な音楽コンテンツとは異なり、振動と関連する衝撃的な音が多く含まれた自然音で構成されている。日常生活において衝撃的な振動が生じる場面は多く（例えば、物体の落下など）、その場面により振動の周波数特性も大きく異なると考えられる。このため、搬送波周波数の違いが迫真性に影響を与えなかったと考えられる。

最後に、臨場感知覚について考察する。先行研究 [13] によると、「その場にいる感じ」と定義される臨場感には主に背景的な空間を評価する指標である。臨場感知覚に関しては、搬送波周波数が 60 Hz の場合のみ遮断周波数の影響が示された。遮断周波数が 30 Hz において搬送波周波数の主効果が認められたことから、遮断周波数 30 Hz における搬送波周波数 60 Hz 条件において、臨場感評価の変化量が 0 に近いことが大きく影響したと考えられる。実験後に行った内省報告において、臨場感評価を行った観察者の半数から搬送波周波数が 60 Hz である振動を体験している時、選手が走っているタイミングにおいて違和感があるとの報告があった。遮断周波数 30 Hz の振動条件は、ボールのバウンドに対する振動提示が小さく、選手の動きに関するイベントに主に振動が提示される条件である。臨場感には主に背景的な空間を評価する指標であるため、コンテンツに絶えず含まれる選手が走るイベントに対する振動提示の違和感が大きく影響したと考えられる。

4 総合考察

本研究では、音に適用する低域通過フィルタの遮断周波数と、低域ろ波された音波形の時間包絡に適用する正弦波の周波数（搬送波周波数）の両方をパラメータとし、これらが高次感性に与える影響を検討することで、自然音で構成されたコンテンツにおける Merchel らの方法の有効性と、遮断周波数と搬送波周波数の影響を検討した。実験 1 では、先行研究の方法が自然音で構成されたコンテンツにおいても有効であることを示した。また、搬送波周波数の操作は臨場感、迫真性評価に大きな影響を与えなかった一方で、遮断周波数の操作は特に迫真性評価に大きく影響を及ぼしたことを示した。実験 2 では、衝撃的な振動が含まれ

るイベントに対する振動提示が遮断周波数の違いにより変化し、それが特に迫真性評価に大きく影響を与えていたことを示した。

はじめに、臨場感について考察する。本実験では、二つのパラメータの操作は臨場感知覚にあまり影響を与えなかった。臨場感は、被験者に提示される感覚刺激が大きくなるにしたがって、印象評価が単調増加するという特性を持つ [16][17]。今回の実験においては、刺激全体の振動レベルが全ての条件において等しく調整されていた。そのため、臨場感評価に有意差が現れるほどの違いが生じなかったと考えられる。今回の振動条件においても、その波形全体での振動レベルを上昇させることにより臨場感評価を上昇させ得ると推測できる。

次に、迫真性について考察する。遮断周波数の操作は迫真性知覚に大きく影響を与えた。実験 2 では、遮断周波数の操作が前景にあたるイベントと関連する操作であったことが示唆された。音情報には振動に関連する様々なイベントの情報が含まれている。そのため、そのような情報が保たれるように遮断周波数を高く設定することは、様々なイベントに振動が提示されることにつながると考えられる。本研究で用いたコンテンツにおいては、特にバスケットボールのバウンドに提示される振動の大きさが遮断周波数の高低に左右されていた。様々なイベントに振動が提示されることにより、前景に当たるイベントにも振動が提示されることが期待できるので、高い遮断周波数で音から振動を生成することは迫真性の促進に有効であると考えられる。

一方、搬送波周波数の操作は、遮断周波数の操作ほどには迫真性知覚に影響を与えなかった。人間の全身振動の周波数弁別閾 [15] を考慮すると、被験者は各搬送波周波数条件の違いを認識できていたと考えられる。にもかかわらず、搬送波周波数の操作は迫真性知覚には大きな影響がなかった。これは、搬送波周波数はイベントとあまり関連しない操作であったことが理由だと考えられる。本実験では、単一の正弦波を搬送波として振幅変調を行うことで振動を生成した。そのため生成振動の周波数特性は、搬送波である正弦波の周波数が非常に卓越したものとなっており、その時間的変化はあまり大きくなかったと考えられる。即ち、生成振動の周波数特性はあまりイベントと関連した変化をしなかったと推測できる。このことは、搬送波周波数をイベントと関連して変化させることで迫真性知覚をより促進できる可能性を示す。

以上では、イベントを意識した遮断周波数、搬送波周波数の操作が高次感性の促進につながると考察した。しかし、遮断周波数を高く設定すると、「人の声」や「笛の音」など現実において全身振動と関係しないイ

イベントに対しても振動が提示されることになる。このような、イベントに対する振動の提示が高次感性に有効に働くかは未だ不明である。また、搬送波周波数においても、イベントと関連した搬送波周波数の操作方法は不明であり、その最適化方法については今後更なる検討を進める必要がある。

5 結論

本研究では、音に適用する低域通過フィルタの遮断周波数と、低域ろ波された音の音圧波形の時間包絡に変調する正弦波の周波数（搬送波周波数）の両方をパラメータとし、これらが高次感性に与える影響を明らかにすることで、自然音で構成されたコンテンツにおける Merchel らの方法の有効性と、遮断周波数と搬送波周波数の影響を検討した。

実験の結果、先行研究の方法の有効性を示すとともに、搬送波周波数の操作は臨場感、迫真性評価にほとんど影響を与えなかった一方で、遮断周波数の操作は迫真性評価に大きく影響を及ぼしたことを示した。即ち、遮断周波数の増加は迫真性の印象強度の増加に結びついていた。検討の結果、遮断周波数を増加させ、より広い帯域の音情報から振動を生成することは、より多くのイベントへの振動提示につながっていた。その結果、前景となるイベントに対する振動が強調され、迫真性知覚を促進させたことが示唆された。このことは、音から振動を生成する際には、コンテンツに含まれるイベントを意識してパラメータを調整することが重要であることを示唆する。

謝辞

本研究の一部は、NICT 委託研究「革新的な三次元映像技術による超臨場感コミュニケーション技術の研究開発」、JSPS 科研費 16K12506、および東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Shuichi Sakamoto, Gen Hasegawa, Akio Honda, Yukio Iwaya, Yōiti Suzuki, Jiro Gyoba : Body vibration effects on perceived reality with multimodal contents, ITE Transactions on Media Technology and Applications, Vol.2, No.1, pp.46-50, 2014.
- [2] Zhenglie Cui, Shuichi Sakamoto, Jiro Gyoba, Yōiti Suzuki : Influence of Visual Depth and Vibration on the High-level Perception of Reality in 3D Contents, ISSN, Vol.8, No.6, 2017.
- [3] 水澤富作, 近藤八重, 滝沢宣人, 河原田豊: 球体の衝突を受ける平板から発生する衝撃音に関する基礎的研究, 土木学会論文集, Vol.68, No.766, pp.47-57, 2004.
- [4] S. Merchel, M. E. Altinsoy : Music-induced vibrations in a concert hall and a church ,Archives

- of Acoustics, vol.38, No.1, pp.13-18, 2013.
- [5] 崔正烈, 柳生寛幸, 坂本修一, 鈴木陽一, 行場次朗: 多感覚コンテンツの音情報から生成した床振動の高次感性促進効果, 情報処理学会論文誌, Vol.59, No.11, 2018.
- [6] 日本規格協会: 振動レベル計, JIS 1510.
- [7] Myungho Lee, Gerd Bruder, Gregory F. Welch : Exploring the Effect of Vibrotactile Feedback through the Floor on Social Presence in an Immersive Virtual Environment, Proceedings of the IEEE Virtual Reality, pp.105-111, 2017.
- [8] S.Merchel, M.E.Altinsoy : Vibratory and acoustical factors in multimodal reproduction of concert DVDs, Haptic and Audio Interaction Design, pp.119-127, 2009.
- [9] S.Merchel, M.E.Altinsoy. : The influence of vibration on musical experience , Journal of the Audio Engineering Society, Vol.62, No.4, pp.230-234, 2014.
- [10] 富田隆太, 井上勝夫, 伊東和: 人の動作とゴムボール衝撃時の床振動応答加速度に関する実験的検討, 日本建築学会技術報告集, Vol.14, No.27, pp.179-182, 2008.
- [11] 石川孝重, 野田千津子, 隈澤文俊, 岡田恒男: 鉛直振動に対する感覚評価とその表現に関する研究, 日本建築学会計画論文集, No.437, 1992.
- [12] 日本バスケットボール協会, 2019 バスケットボール競技規則.
- [13] 行場次朗: 臨場感と迫真性の感性心理学的特性, 電子情報通信学会誌, Vol.101, No.8, pp.793-797, 2018.
- [14] 石橋敏久, 岩本賢治: 床振動測定に基づく S 造 3 階建物の振動伝播特性 (その 1) 測定概要と測定結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.383-384, 2010.
- [15] S.Merchel, M.E.Altinsoy, and M.Stamm: Just-Noticeable Frequency Differences for Whole-body Vibrations, Inter-noise2011, 2011.
- [16] 寺本渉, 吉田和博, 浅井暢子, 日高聡太, 行場次朗, 鈴木陽一: 「迫真性」を規定する時空間情報, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol.15, No.5, pp.483-486, 2010.
- [17] 本多明生, 神田敬幸, 柴田 寛, 浅井暢子, 寺本 渉, 坂本修一, 岩谷幸雄, 行場次朗, 鈴木陽一: 視聴覚コンテンツの臨場感と迫真性の規定因, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol.18, No.1, pp. 93-101, 2013.

(2020 年 9 月 17 日受付)

[著者紹介]

阿部 翔太 (学生会員)



2017 年東北大学工学部情報知能システム総合学科卒業。2019 年東北大学大学院情報科学研究科博士課程前期課程修了。現在、東北大学大学院情報科学研究科博士課程後期課程在学中。マルチモーダル知覚の研究に従事。

山高 正烈 (正会員)



2004年九州大学大学院システム情報科学府博士課程修了。同年、同大学COE 研究員・ユーザーサイエンス機構研究員を経て、2009年より東北大学電気通信研究所研究員、助教。2019年より愛知工科大学准教授、現在に至る。人工現実感環境生成法、人の感性・生理・心理特性に関する研究、ドライビングシミュレータを用いた運転行動ヒューマンインタフェースの研究等に従事。博士（工学）。

坂本 修一 (正会員)



1997年東北大学大学院情報科学研究科修士課程修了。同年（株）日立製作所入社。2000年から東北大学電気通信研究所准教授。2019年から同所教授、現在に至る。博士（工学）。単語知覚過程に関する研究に従事するほか、近年ではマルチモーダル感覚情報処理過程に関する研究にも注力。日本音響学会、電子通信情報学会、日本バーチャルリアリティ学会、日本感性工学会等の会員。

鈴木 陽一 (正会員)



1981年東北大学大学院工学研究科修了。工博。東北大学大型計算機センター助教授等を経て、1999年から東北大学電気通信研究所教授、現在に至る。2011年日本バーチャルリアリティ学会フェロー、理事。3次元音空間知覚と聴覚ディスプレイ、マルチモーダル知覚などの研究に従事。日本VR学会フェロー、理事。米音響学会フェロー。著書に聴覚モデル（コロナ社）など。

行場 次朗 (正会員)



尚絅学院大学総合人間科学系心理部門教授。1981年東北大学大学院文学研究科博士課程心理学専攻修了。信州大学人文学部助教授、九州大学文学部助教授、東北大学大学院文学研究科教授を経て、2019年より現職。東北大学名誉教授。

専門は視覚心理学・認知心理学。共著書、「知覚と感性の心理」（福村出版）、「視覚と聴覚」（岩波書店）など。日本心理学会、日本基礎心理学会、日本認知心理学会、電子情報通信学会各会員。