

音から生成した振動の時間・周波数特性は 高次感性をどう変化させるか

阿部 翔太^{1,a)} 山高 正烈² 坂本 修一³ 鈴木 陽一³ 行場 次朗⁴

概要: 我々は、臨場感と迫真性を高次感性の評価指標として用い、多感覚コンテンツにおいて音情報から生成した全身振動情報が実測振動と同程度に高次感性を促進することを示した。しかし、音情報から生成した振動のどのような成分が高次感性の促進に貢献しているかは未だ不明である。そこで本研究では、音情報から生成した振動を包絡的な変動と搬送波的波形からなる振幅変調波形と見立て、搬送波的波形を正弦波で置き換えた。そして、その時間包絡と搬送波周波数をパラメータとして振動情報を生成することで、音情報から生成した振動の物理的特性が高次感性に与える影響を検討した。実験の結果、時間包絡特性は特に迫真性評価に影響を与えるのに対して、搬送波周波数は臨場感、迫真性評価にあまり影響を与えないことが示された。ただし、時間包絡特性が直接影響を及ぼすのではなく、それによって抽出される情報との関係が重要であることが示唆された。

1. はじめに

近年、視聴覚情報に加えて触覚や嗅覚、身体運動感覚などより多くの感覚情報を含む多感覚コンテンツの作成が可能となり、エンタテインメントシステムへの様々な応用が期待されている。その実現の際には人間が多感覚コンテンツからどのように高次感性を生起させているか明らかにした上で、その知見に根差したシステムの構築が必要である。このような視座の下、我々は全身振動情報に着目し、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「臨場感 [1][2]」、「迫真性 [3][4]」といった評価指標を用いて調査してきた。その結果、全身振動情報の提示も高次感性の生起に重要な役割を果たすことが示された [5][6]。

しかし、現状のコンテンツには振動情報が含まれないのが一般的なので、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 [7][8] 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 [9]。提案法に基づき音情報の低周波数成分を振動と見立てて視聴者に提示した場合、実際に測定した振動と同程度に高次感性を促進することが示された。即ち、実測振動と音情報から生成した振動が異なる特性を持って

るのにも関わらず、実測振動と同程度に高次感性が促進されたことが示されたのである。

しかし、音情報から生成した振動のどのような特性が高次感性に影響していたかは未だ明らかになっていない。Merchel らは、音情報から振動を生成する際に用いる低域ろ波された波形を包絡的な変動と搬送波的波形からなる振幅変調波形と見立て、搬送波的波形を正弦波で置き換えた結果、生成振動が高次感性評価指標の一つである「concert experience」を促進させたことを報告している [10]。同時に、搬送波の周波数を操作した結果、高次感性に影響を与えることを示した。この報告は、音の低周波帯域音の波形が包絡的な変動とそれに包まれた搬送波的波形の振幅変調と見立てられる場合において、音情報から生成した振動の時間包絡と正弦波により置き換えられた搬送波の周波数が高次感性の促進に重要な特性である可能性を示している。しかし、音から振動を生成する際に用いる低域ろ波された波形の包絡的な変動は、音情報に適用する低域通過フィルタの遮断周波数の値によって変動する。音情報に適用する低域通過フィルタの遮断周波数をパラメータとした実験は存在するが [11]、生成振動に含まれていた高周波成分が高次感性に大きな影響を与えていたため、未だ生成振動の時間包絡が高次感性に与える影響は不明である。

そこで本研究では、音情報から生成した振動を包絡的な変動と搬送波的波形からなる振幅変調波形と見立て、搬送波的波形を正弦波で置き換え、時間波形における包絡的な振動と搬送波周波数という二つの物理的特性が高次感

¹ 東北大学大学院情報科学研究科

² 愛知工科大学

³ 東北大学電気通信研究所

⁴ 東北大学大学院文学研究科

a) shota.abe.r4@dc.tohoku.ac.jp, ewrm.1308@gmail.com



図 1 収録風景

性にどのような影響を与えるかを検討した。具体的には、Merchel らの研究を参考に、音情報の時間包絡を抽出する際に使用する低域通過フィルタの遮断周波数と搬送波として埋め込む正弦波の周波数をパラメータとして振動情報を生成し、生成された振動情報が高次感性に与える影響を検討した。

2. 実験方法

2.1 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 s 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。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声信号とを同期信号として使用することで、映像、音声、振動の 3 種の感覚刺激の同期を取った。

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 [12] 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。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報を用いた (以下, Original)。

音情報から生成した振動情報については、図 3 に示した

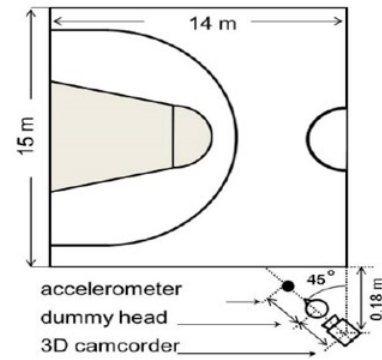


図 2 収録環境

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生成したモノフォニック信号に、遮断周波数 30, 70, 200 Hz の低域通過フィルタ (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 [13] ことを鑑み、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、振動加速度の包絡的な変動を抽出するために半波整流を行った後、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。次に、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。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、搬送波の位相が反転することがなかった。そのため、変調後の波形は振幅変動を抽出した振動加速度波形と等しいエネルギーを持つ。最後に、全ての生成振動を実測振動と等しい振動レベル (84.5 dB) [12] となるように全体の波形を調整した。

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、CutFreq30_CarrierFreq20) と呼称した。これらに Original 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。

2.2 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 ± 1.6 歳) であった。これを、臨場感と迫真性それぞれの感性指標のグループ間で同じ人数となるように割り当てた。その結果、臨場感、迫真性共に男性 5 名, 女性 4 名となった。

2.3 実験環境

実験環境の概要を図 4 に示す。実験はシールド暗室に

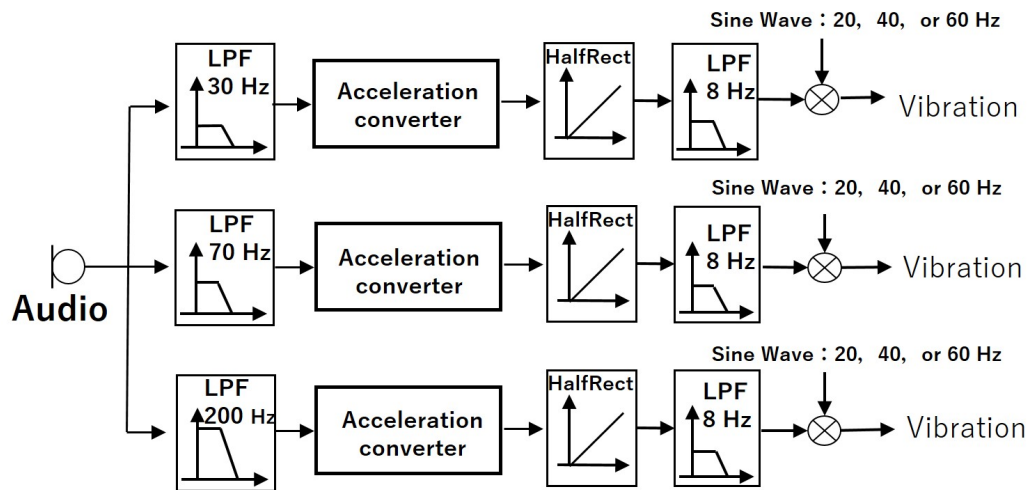


図 3 信号処理の流れ

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よそ 90 deg（水平方向）として映像を表示した。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，最小可動角度はおよそ 0.5 deg 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情報 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。被験者は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の 2 つに分け，割り振られた感性指標についてのみ回答するように求めた。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」であると説明した。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 s 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

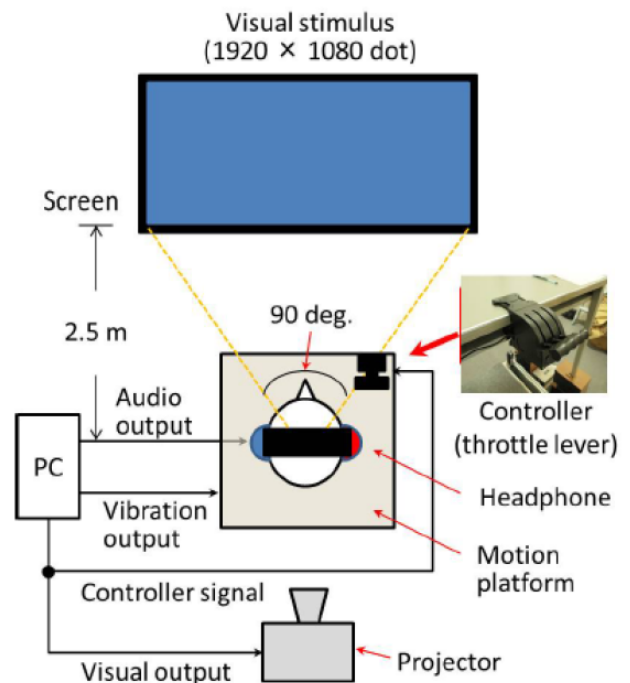


図 4 実験環境の概要

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」するよう指示した。試行開始時は必ずレバーの角度を最小の状態から開始し，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。

3. 実験結果

体験中における臨場感および迫真性の印象強度の継時変化を図 5 に示す。印象強度の継時変化をみると，迫真性評価においては条件間に大きな印象強度の違いが生じている

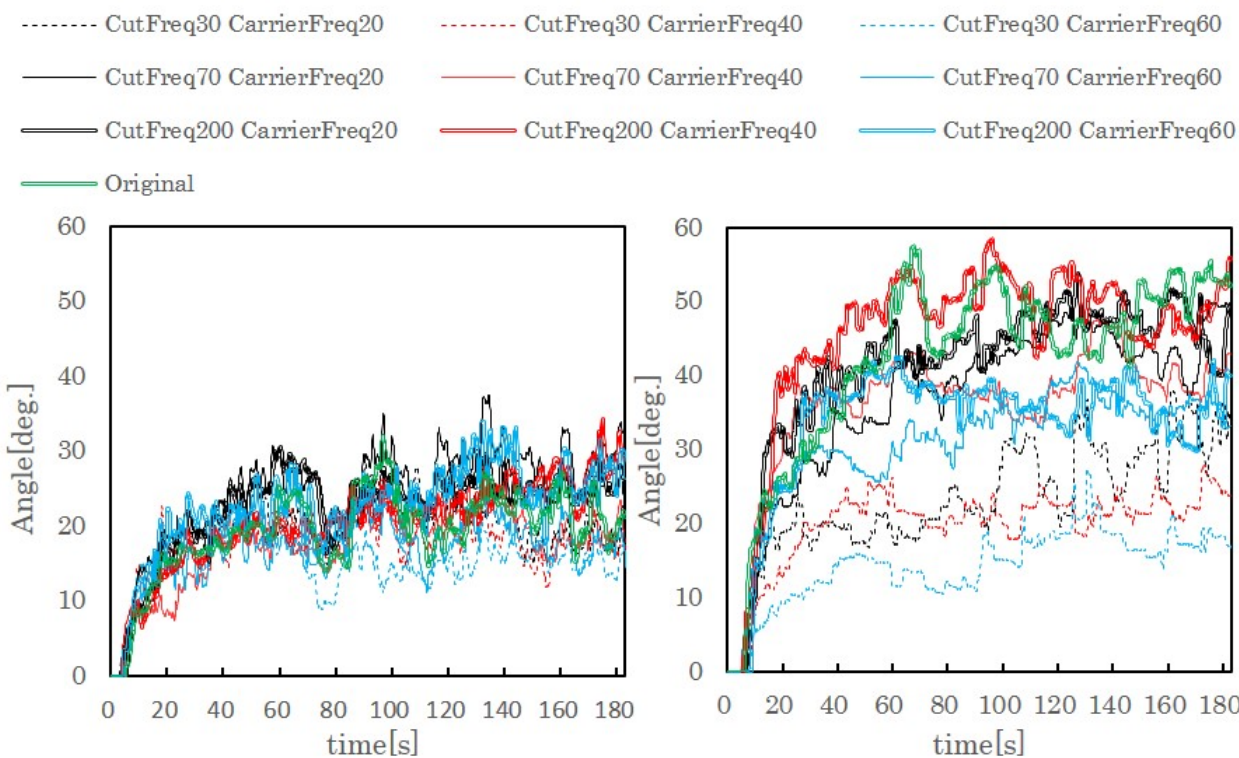


図 5 試行中の印象強度 (左：臨場感，右：迫真性)

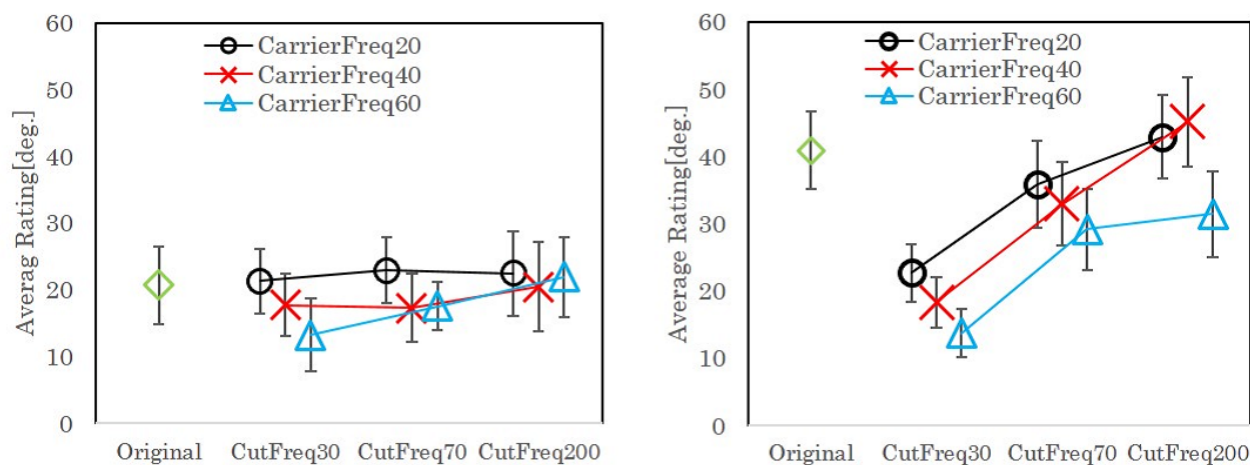


図 6 試行中の印象強度の平均値 (左：臨場感，右：迫真性)

一方で、臨場感評価においては迫真性ほどの大きな違いは生じていないことが分かる。

体験中の全区間にわたる印象強度の平均値を比較するために、各振動条件ごとの体験中における印象評価の値を平均したものを図 6 に示す。図 6 を見ると、臨場感評価においては、CutFreq30_CarrierFreq60 以外は Original 条件とほぼ同程度の印象強度が得られている。一方、迫真性評価においては遮断周波数の増加に伴って印象強度が上昇傾向を示しており、CutFreq200_CarrierFreq20 と CutFreq200_CarrierFreq40 では Original 条件と同程度の印象強度を得られているように見える。加えて、迫真性評

価において、3つの CarrierFreq60 条件は、遮断周波数が等しいいずれの条件においても印象強度が最も低くなっている。

音情報から生成した振動の振幅の包絡的な時間変化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、臨場感と迫真性ごとに、CutFreq3 条件 × CarrierFreq3 条件の 2 要因分散分析を行った。その結果、臨場感においては、CutFreq 条件、CarrierFreq 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。一方で迫真性においては、Cut 条件にのみ有意差が認められ ($F_{(8,16)} = 15.9, p < .001$)。CarrierFreq 条件、両者の交互

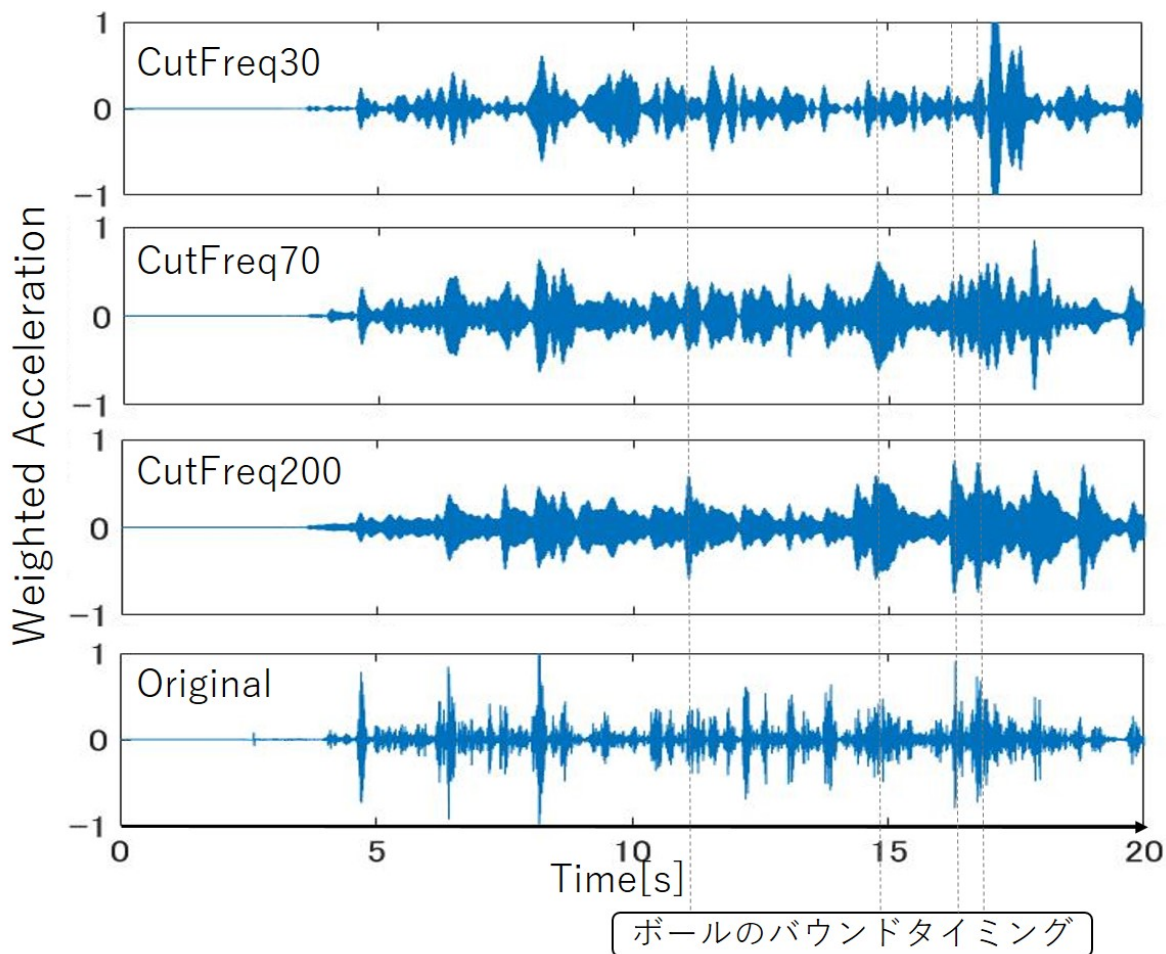


図 7 各 CutFreq 条件の時間波形

作用には有意差は認められなかった。多重比較検定 (Ryan 法, $p < .05$) の結果, CutFreq30 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。これらの結果は, 遮断周波数 (振動の時間波形における包絡的な変化) は特に迫真性評価に影響を与えるのに対して, 搬送波周波数は臨場感, 迫真性評価にあまり影響を与えなかったことを示している。

4. 考察

本実験では, 音情報から生成された振動を包絡的な変動と搬送波的波形からなる振幅変調波形と見立て, 搬送波的波形を正弦波で置き換えた。そして, 適用する低域通過フィルタの遮断周波数や搬送波周波数を操作することで, 時間波形における包絡的な変化や搬送波周波数といった物理的特性が多感覚コンテンツの高次感性に与える影響を分析した。実験の結果, 遮断周波数の操作による振幅の包絡的な変化が迫真性に大きく影響を及ぼした一方で, 搬送波周波数は臨場感, 迫真性にあまり影響を与えないことが示された。

遮断周波数の操作により, 生成された振動の時間包絡がどのように変化したのか分析を行った。180 秒の振動刺激

を代表して, 図 7 に 20 秒までの各遮断周波数条件の時間波形を示す。縦軸は感覚補正を施した振動加速度 [12] で, 振幅の大きさが人間の感じる振動の大きさとなる。なお, 搬送波周波数は 40 Hz とした。図 7 から, 遮断周波数の違いにより振動の時間包絡に変化が生じていることが分かる。この変化を分析したところ, バasketボールがバウンドするタイミングに由来する振動成分と関連した現状であることが分かった。各条件で見たと, 遮断周波数の増加に従ってBasketボールのバウンドに当たる振動振幅が顕著になっていることが見て取れる。

今回使用したコンテンツにおいて, ドリブルやボールのバウンドなどのボールに関するイベントは観測者の注意を集めるイベントであるため, より前景になりやすいイベントであると考えられる [14]。そのため, ボールがバウンドしたタイミングに提示される振動は前景に関連したイベントとしてみなすことができる。迫真性は前景にあたる物体の本物らしさを評価するものであることを考慮すると, 遮断周波数の増加により生じた前景となるイベントへの強調された振動の提示が迫真性を促進させたと考えられる。このことは, 振動の時間波形の包絡的な変動がコンテンツ内の前景情報に関連することによって迫真性が促進されたこ

とを示唆している。そのため、様々なコンテンツにおいて迫真性を促進する振動を生成したい場合は、コンテンツにおける主要な前景要素は何かということを考慮し、適切な時間包絡を持った振動となるように生成することが必要となる可能性がある。

一方で、搬送波周波数の違いは振幅の時間包絡の違いほどは迫真性評価に影響を与えなかった。本実験は、振動条件を生成する際に音の低周波帯域の波形の包絡的変動を変調波、正弦波を搬送波として振幅変調を行っている。そのため、生成振動の周波数特性は時間的にほとんど変動しない。このことは、今回使用したコンテンツ内に生じる様々なイベントに提示されていた振動が、一試行を通して常にほぼ同一な周波数特性を持っていたことを意味する。それ故に、搬送波周波数はイベントに関連したパラメータではなかったと考えられる。このことは、イベントに関係ないパラメータの操作は迫真性評価にあまり影響を与えないことを示唆する。

ただし、有意差は認められなかったものの、図6からは搬送波周波数が高い場合(今回のコンテンツ条件では60 Hz)の印象強度が低いことが見て取れる。実験後に行った内省報告からも、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り、イベントに適さない搬送波周波数が迫真性の減少を引き起こしたと考えられる。即ち、迫真性を促進させるために適切な搬送波周波数が存在する可能性は否定できない。実際に、一般人の振動のイメージを調査した研究[15]において、道路交通や工事などの振動源を表す言葉から類推する振動の周波数が被験者間によって一致する傾向があると報告されており、今回の結果もコンテンツ内の様々なイベントから類推される振動の周波数のイメージと提示された振動の周波数が一致するかどうかは迫真性に影響を与えたと考えられる。今後はコンテンツに適した搬送波周波数の決定因などを調べることで、より効率的に迫真性を促進できる振動生成手法の確立につながると考えられる。

臨場感評価においては、遮断周波数の変化による振幅の時間包絡の変化も搬送波周波数の違いも迫真性評価ほど違いを生じさせなかった。この原因の一つは、臨場感評価が空間に関連した背景的な場を主に評価する評価指標であることだと考えられる。上記のように、遮断周波数の違いは、今回使用したコンテンツの主な前景要素であるボールのバウンドのタイミングに提示される振動振幅の大きさに表れていた。そのため、前景要素を評価する迫真性評価ほどには臨場感評価に影響を与えなかったと考えられる。

また、もう一つの原因として、提示刺激全体での刺激量が全ての条件間において等しかったことが考えられる。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。刺激強度が臨場感に与え

る影響に関する先行研究によると、臨場感は感覚刺激が大きくなるにしたがって単調増加で印象強度が増加するという特性を持つ[3][4]。そのため、すべての条件の刺激全体の振動レベルが等しく調整された今回の条件は、臨場感評価に有意差が現れるほどの違いを生じさせなかったと考えられる。これらのことから、臨場感の印象強度を促進するためには、振動情報の振動レベルが重要な要素だと考えられる。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ることができる考えられる。ただし、今回の条件のように前景と背景に該当する振動が異なる状況において、臨場感と迫真性の両方を効率よく高めるための方法は今後の検討課題である。

5. 結論

本研究では、音情報から生成された振動を包絡的な変動と搬送波的波形からなる振幅変調波形と見立て、搬送波的波形を正弦波で置き換えた。そして、適用する低域通過フィルタの遮断周波数や搬送波周波数を操作することで、音情報から生成した振動の時間波形における包絡的な変化や搬送波周波数といった物理的特性が多感覚コンテンツの高次感性に与える影響を観察した。

実験の結果、遮断周波数(振動の時間波形における包絡的な変動)が迫真性に大きく影響を及ぼした一方で、搬送波周波数はあまり大きな影響を高次感性に与えないことが示された。ただし、包絡的な変動が直接迫真性に影響を及ぼしているのではなく、包絡的な変動の変化に結びついている前景に関連した振動の提示が迫真性に影響を与えていたことが示唆された。一方、臨場感評価においては、振動レベルの大きさが重要な要因である可能性が示された。これらの結果は、迫真性を促進する振動を音情報から生成するためには、コンテンツにおける前景要素、背景要素を考慮し、それに適するように振動の物理的特性を調整する必要がある一方で、臨場感を促進する振動を生成するためには刺激全体の振動レベルを上昇させることが重要であることを示唆している。

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] M. Lombard, T. Ditton : At the heart of it all : The concept of presence, Journal of Computer-Mediated Communication, Vol.3, No.2, 1997.
- [2] M. Slater, A. Steed A, J. McCarthy, F. Maringelli : The influence of body movement on presence in virtual environments, Human Factors, Vol.40, No.3, pp.469-477, 1998.

- [3] 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, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.15, No. 5, pp.483-486, 2010.
- [4] 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, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.18, No.1, pp. 93-101, 2013.
- [5] Shuichi Sakamoto, Gen Hasegawa, Akio Honda, Yukio Iwaya, Yôiti Suzuki, Jiro Gyoba : Body vibration effects on perceived reality with multi-modal contents , ITE Transactions on Media Technology and Applications, Vol.2, No.1, pp.46-50, 2014.
- [6] Zhenglie Cui, Shuichi Sakamoto, Jiro Gyoba, Yoiti Suzuki : Influence of Visual Depth and Vibration on the High-level Perception of Reality in 3D Contents , ISSN, Vol.8, No.6, 2017.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] S.Merchel, M.E.Altinsoy : Vibratory and acoustical factors in multimodal reproduction of concert DVDs, in Haptic and Audio Interaction Design, pp.119-127, 2009.
- [12] 日本規格協会, : 振動レベル計, JIS 1510
- [13] 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, , 日本建築学会計画計論文報告集, No.437, 1992.
- [14] A.L. Yarbus. Eye movements and vision. NY : Plenum Press.
- [15] 鈴木千尋, 石川考重: 言葉と振動のイメージの関係に着目した環境振動の言語表現に関する検討, 日本建築学会環境系論文集, Vol.82, No.742, pp.985-994, 2017.