T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	個々人のバーチャルサウンドスケープを体感音響で豊かにする張力式振動提示装置
Title(English)	Tension-based musical haptic wearables that enrich the personalized virtual soundscape
著者(和文)	山崎勇祐
Author(English)	Yusuke Yamazaki
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12387号, 授与年月日:2023年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:長谷川 晶一,中本 高道,小池 康晴,吉村 奈津江,渡辺 義浩
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12387号, Conferred date:2023/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

表紙

東京工業大学
工学院情報通信系情報通信コース

2022 年度
博　士　論　文

個々人のバーチャルサウンドスケープを体感音響で豊かにする張力式振動提示装置

Tension-based musical haptic wearables that enrich the personalized virtual soundscape

山崎　勇祐
Yusuke Yamazaki

指導教員　長谷川　晶一　准教授

2023 年 1 月 提出

概要

音楽は、聴覚的な風景を意味するサウンドスケープの影響を受けて時代と共に変遷し、音声の録音再生技術が発達するにつれ、演奏会場だけでなく様々な場所で音楽自体がサウンドスケープの一部となった。そして携帯音楽プレイヤーの発明により、音楽によるサウンドスケープは「場所」に属するものから「個々人の聴覚」に属するようになった。近年著しい発展を遂げている無線・ノイズキャンセリング・立体音響技術は、わずか 5 g ほどのワイヤレスイヤホンを両耳に装着するだけで、ケーブルに束縛されること無く周囲の音を自由に遮断・増強した上で臨場感のある音を自由に再生することを可能にしている。もはや現代の一人ひとりのサウンドスケープは現実の空間と切り離され—あるいは混じり合い—バーチャル化されていると言える。

音源からの空気圧変動が聴取者の身体に触覚的に伝わることで感じられる体感音響は、そうしたサウンドスケープの情緒を豊かにするのに重要な役割を果たす。体感音響は本来、演奏会場など身体が音場空間に存在している状態、すなわち場所に属するサウンドスケープでのみ感じられるものであるが、個々人のサウンドスケープでも体感音響を体験できるよう、振動子を用いて音楽と同期した振動（音楽振動）を身体に伝達させることを目的とした体感音響装置が近年、多種多様な形態で提案されている。しかし振動子の構造上、体感音響を効果的に表現するために重要となる高振幅な低周波振動の広範囲への伝達と、装置の小型化を両立することが難しい。そのため市販されている体感音響装置はベスト型やバックパック型など体感音響効果を重視して大型化する傾向にあり、このような形態では歩行時や電車乗車時といった日常的なモバイル環境での利用に適さず、バーチャル化されたサウンドスケープに体感音響装置が有効に活用できているとは言い難い。

こうした背景から、本研究ではバーチャル化されたサウンドスケープを体感音響で豊かにすることを目的とする。そのために、まずは体感音響効果が高く日常的なモバイル環境での利用に適した体感音響装置を実現することに着手した。上述の問題から従来の振動生成機構ではその実現が難しいと判断し、原理的に小型化と広範囲へ高振幅な低周波振動伝達を両立可能な、モーターと糸を用いた張力式振動生成機構（提案機構）を発明した。提案機構による身体への伝達振動を測定したところ、提案機構は糸を中心に体の広範囲に振動が伝達できていること、

低周波（30 Hz）での振動伝達に優れ、高周波（150 Hz）でも従来の直動型振動子と同程度の強度で伝達できたことが明らかとなった。また体感音響装置として音楽振動を提示した場合も、提案機構を使用した場合の方が直動型振動子よりもポジティブな評価をする参加者が多く、提案機構の振動伝達特性は体感音響装置に適していることを示した。

この提案機構を利用し、実用的な体感音響装置の実現を試みた。当初は胴巻き付け型で開発していたが、国際会議でのデモ展示や一般ユーザーへの試用から得られた多くのフィードバックから、主に利便性や装着性、装着時の見た目の面において胴巻き付け型は実用的ではないと判断した。そこで日常的なモバイル環境での利用を前提とした設計要件—十分な振動伝達能力・装着の容易さ・低音声ノイズ・低消費電力—を定義し、試行錯誤の末、ネックレス型体感音響装置 Hapbeat を開発した。Hapbeat の性能評価では十分な強度の低周波（20 Hz）振動を広範囲に伝達できていることが示され、1–470 Hz の範囲では出力振動が大きく減衰せず、応答時間は 2.74 ms 程度と、体感音響装置として優れた特性を持つことが示され、実用的な体感音響装置の実例を示すことができた。また設計要件を満たすために工夫した諸所の実装の効果が認められたことで、本開発で得られた知見は今後、提案機構を利用した装置の開発にも貢献することが期待される。

次に体感音響による立体音響表現を実現することでサウンドスケープ表現を拡張する取り組みを行った。立体音響の中でも音像定位に着目し、Hapbeat で提示される音楽振動の振幅を、使用者と任意のターゲットとの方向・高さ・距離といった位置関係に応じて変調することで、音楽鑑賞体験を向上させつつ 2 次元・3 次元的な情報伝達が可能な変調手法を提案した。その評価のため、2 次元音像定位は歩行中に目的地までたどり着くナビゲーションタスク、3 次元音像定位は 3 次元的な VR 空間内でランダムに動くターゲットを銃撃するタスクを行った結果、提案手法の体感音響による音像定位がタスクの達成に明確に貢献することが示された。ここで重要なのは、本手法によって変調された体感音響提示がサウンドスケープを損なわず、むしろ豊かにしながら位置情報という有益な情報を提示できた点である。

以上のように、本論文は現代のバーチャル化されたサウンドスケープを体感音響で豊かにする方法を、日常的に利用しやすく高性能な振動提示装置の実現と、それを用いた体感音響による音像定位の実現を通して提案しており、今後のサウンドスケープ表現の発展や触覚技術の利用拡大に貢献することが期待される。

目次

第 1 章　序論 1
1.1 研究の背景 1
1.1.1 音の世界とサウンドスケープ 1
1.1.2 サウンドスケープと音楽 2
1.1.3 サウンドスケープのバーチャル・パーソナル化 3
1.1.4 身体で感じるサウンドスケープ：体感音響 4
1.2 研究の目的 7
1.2.1 新しい振動生成機構の提案 7
1.2.2 日常的に利用可能な体感音響装置の開発 7
1.2.3 音響振動による立体音響表現の試み 8
1.3 本論文の構成 8

第 2 章　関連研究 11
2.1 触覚の知見 11
2.1.1 皮膚の構造 11
2.1.2 神経系の密度 11
2.1.3 有毛部の触知覚 13
2.2 聴覚と触覚の感覚統合 16
2.2.1 時系列統合 17
2.2.2 周波数統合 18
2.2.3 音楽鑑賞への影響 19
2.3 音楽 20
2.4 既存の体感音響提示手法 20
2.4.1 設置型 20
2.4.2 装着型 21

第 3 章　モーターと糸を用いた張力式振動生成機構 23

3.1 体感音響装置に用いる振動生成機構の要件 23
3.1.1 低周波振動の重要性 23
3.1.2 広範囲への振動伝達の重要性 24
3.1.3 応答時間の重要性 25
3.1.4 小型化の重要性 25
3.2 直動型振動子の課題 25
3.2.1 直動型振動子の振動出力の測定 27
3.3 提案機構 27
3.3.1 部品の要件 28
3.4 評価 29
3.4.1 身体への伝達振動の測定 29
3.4.2 音楽鑑賞体験への影響 33
3.5 考察 36
3.5.1 皮膚上での振動伝搬 37
3.5.2 振動を伝達できなかった領域 37
3.5.3 楽曲による違い 38
3.6 3 章のまとめ 38

第 4 章 張力式振動生成機構を用いたネックレス型体感音響装置 Hapbeat の開発 41
4.1 胴巻き付け型の課題 41
4.2 設計方針 42
4.2.1 装置の形状 43
4.2.2 音声ノイズの抑制 43
4.2.3 省電力化 43
4.3 実装 44
4.3.1 振動伝達部 44
4.3.2 定常トルク機構 45
4.3.3 駆動回路設計 45
4.4 評価 46
4.4.1 伝達振動の基準値の定義 46
4.4.2 着用者上での振動伝達測定 46
4.4.3 出力波形の忠実性の評価 52
4.4.4 定常トルク機構による省電力効果の検証 53
4.4.5 始動電流の比較 54
4.4.6 音声ノイズの測定 54

4.4.7 周波数応答の測定 56
4.4.8 応答時間の測定 57
4.5 全体の考察 58
4.5.1 Limitation 59
4.6 4 章のまとめ 60

第 5 章 体感音響による 2 次元音像定位 61
5.1 背景：音楽鑑賞とナビゲーションの両立 61
5.2 関連研究：非視覚的な位置情報提示 62
5.2.1 音声（音楽）変調によるナビゲーション 62
5.2.2 触覚刺激による 2 次元位置情報提示 63
5.3 変調手法 64
5.4 評価 65
5.4.1 実験条件 65
5.4.2 実験 1：歩行時の Hapbeat による音楽鑑賞体験 68
5.4.3 実験 2：首への変調された音楽振動刺激による方向精度 69
5.4.4 実験 3：歩行時のナビゲーション能力の評価 73
5.5 考察 76
5.5.1 H1：音楽振動のステレオバランスを変調することでナビゲーションを成立させるのに十分な情報を伝えられる 76
5.5.2 H2：歩行中の音楽振動提示は音楽鑑賞体験の向上に寄与する 78
5.5.3 H3：歩行中の音楽振動提示は従来の音楽変調による方向提示を妨げない 79
5.5.4 H4：音声を変調するよりも音楽振動をステレオバランスさせた場合の方が音楽鑑賞体験として好まれる 79
5.5.5 H5：距離情報を振動強度変調で表現することでナビゲーションがより分かりやすくなる 80
5.5.6 H6：距離情報を振動強度変調で表現すると、強度を変調しない場合よりも音楽鑑賞に悪影響を及ぼす 81
5.5.7 楽曲による比較 82
5.5.8 Limitations 82
5.6 5 章のまとめ 83

第 6 章 体感音響による 3 次元音像定位 85
6.1 背景：視覚外オブジェクトの描画手法と VR ゲームのプレイヤー体験向上の両立 85

6.2 関連研究 86
6.2.1 触覚による 3 次元位置情報提示 86
6.2.2 音楽によるプレイヤー体験の向上 87
6.3 提案手法 88
6.3.1 体感音響装置 88
6.3.2 変調手法 88
6.4 評価 90
6.4.1 実験参加者 90
6.4.2 使用機器 90
6.4.3 提示刺激 91
6.4.4 実験用バーチャル環境 92
6.4.5 実験条件 92
6.4.6 アンケート 93
6.4.7 実験手順 94
6.4.8 実験結果 94
6.5 考察 97
6.5.1 H1：Haptic 対 None 98
6.5.2 H2：Haptic 対 Vision 98
6.5.3 H3：VisHap 対 Vision 99
6.5.4 H4：鑑賞体験とプレイヤー体験の関係 101
6.5.5 M1 対 M2：ターゲットの動き方による差異 103
6.5.6 Limitations 104
6.6 6 章のまとめ 105

第 7 章 結論 107
7.1 各章のまとめ 107
7.1.1 3 章：モーターと糸を用いた張力式振動生成機構 107
7.1.2 4 章:張力式振動生成機構を用いたネックレス型体感音響装置 Hapbeat の開発 108
7.1.3 5 章：体感音響による 2 次元音像定位 109
7.1.4 6 章：体感音響による 3 次元音像定位 110
7.2 今後の展望 110
7.2.1 体感音響の重要な要素の解明 111
7.2.2 音楽が従属的であるコンテンツにおける体感音響の影響の検証 112
7.2.3 着心地の良い衣服型体感音響装置 113

7.2.4 張力式振動提示装置の音楽以外への応用 113
7.2.5 バーチャルサウンドスケープの展望 114

参考文献 117

付録 133

著者論文リスト 135

図目次

1.1 体感音響の概念図。身体には皮膚が空気圧の変化によって刺激を受ける空気伝播振動と、床や椅子などの構造物を介する固体伝播振動が伝わる。 5

2.1 人の皮膚構造。左が無毛部、右が有毛部。[1] より引用。なお、field unit の具体的な組織学的構造は不明 [2]。 12
2.2 触覚の神経応答の分類図。[3] を元に作成。 12
2.3 全身における 2 点弁別域の調査結果。[4] より引用。 13
2.4 全身の神経密度の推定値。[5] より引用。 14
2.5 身体の複数部位で計測された振動検出閾値。[6] より引用。 14
2.6 設置型体感音響装置の例。(a) Emoti-Chair [7]。写真は [7] より引用。(b) Synesthesia X1-2.44 [8]。写真は筆者撮影。(c) Derritron VP85[9]。写真は [9] より引用。(d) Vibrating Floor [10]。写真は [10] より引用。(e) InnerSoul Tranquility Liquid Sound Table [11]。写真は [11] より引用。 20
2.7 装着型体感音響装置の例。(a) Armband-based Musical Haptic Wearables[12]。写真は [12] より引用。(b) Haptic Bracelets[13]。写真は [13] より引用。(c) Mood Glove[14]。写真は [14] より引用。(d) The Hedonic Haptics Player[15]。写真は [15] より引用。(e) SUBPAC M2X[16]。写真は SUBPAC 社が配布しているプレス用画像から引用。(f) Woojer Vest[17]。写真は [17] より引用。(g) Synesthesia suit[18]。写真は [18] より引用。 21

3.1 直動型振動子の振動生成機構と身体への振動伝達イメージ 26
3.2 直動型振動子の周波数応答測定。上：測定に使用した直動型振動子の外観および測定条件。下：測定結果。加速度振幅 a_{RMS} の算出は式 4.1 参照。なお 100 m/s^2 近辺の値は加速度センサの検出上限（各軸約 78.4 m/s^2）に達している可能性が高いことに注意されたし。 28
3.3 モーターと糸を利用した振動生成機構と身体への振動伝達イメージ。 29

3.4 振動提示装置の外観。(a) WTV の外観 (b) WTV の固定方法 (c) WTV 装着状況の説明図 (d) WTV 装着時外観（胸部） 31
3.5 Haptuator の説明図。(a) 外観 (b) 装着位置の例（下腹部の場合）(c) 固定方法 31
3.6 刺激装置の装着箇所および測定箇所。黒点は加速度センサを密着させて測定する箇所、青点は Haptuator の接着箇所、赤線は WTV 装着時の糸の場所を示す。胸部における装着位置の目安は参加者の鳩尾部、下腹部では臍から 1 cm 高い位置である。 32
3.7 伝達振動測定結果。測定結果は 1 軸（体表対して鉛直方向）のみである点に注意。 33
3.8 音楽刺激。それぞれの楽曲の上半分は波形（縦軸：-1.0–1.0 の振幅)、下半分はスペクトログラム（縦軸単位：Hz）を示す。短時間フーリエ変換は、50 % オーバーラップのハミングウィンドウを用いて 8192 サンプルで計算された。 34
3.9 アンケート回答用紙および回答例。中央を基準とし、記入点までの距離を得点とする。 35
3.10 アンケート結果。図中データは各参加者の得点を示す。*は有意であることを示し、p 値はウィルコクソンの符号順位検定の結果、p_H 値は WTV の 8 つの帰無仮説族について Holm 法で調整した値である。 36

4.1 胴巻き付け型のプロトタイプ写真。(a) Euro Haptics 2016 でデモを行った巻き付け型（アクチュエーター部分のみ、別途駆動用アンプが必要）(b) (c) 巻き尺型の装着図。(d) 巻き尺型の側面図。(e) ベルト型。(f) ベルト型装着写真。 42
4.2 Hapbeat の構造の詳細。図中の数値の単位は全て mm。(a) 図中の ρ は糸が通っているチューブ（紫のライン）とゴムが通っているチューブ（赤のライン）の曲率半径を示す。(b) 図中の緑色の矢印は糸が繰り出されたときびボビンにかかる張力の向きを示し、白色の矢印はその時ゴム紐がボビンに掛ける張力の向きを示す。(c) ボビンの寸法。 44
4.3 計測箇所の説明。予備実験で計測した計測点のうち、本実験で採用した測定点は黄色、それ以外の測定点は黒丸で示す。赤矢印は赤線上の測定点、青矢印は青線上の測定点での加速度センサの方向を示している。橙円で囲った文字は各列の基準点であり、以下の基準で決定した。A：リボンと鎖骨の接点、B：A と C の中間点、C：結合部品の中心、D：ハウジングの中間点、E：帯と縫い目延長線の交点、F：頸椎の中心（目視で決定)。 48

4.4 参加者へ伝達された振動の加算平均値（$n = 6$）と主観実験の結果。赤の実線は a_{RMS} の大きさ表し、赤い半透明の領域は標準偏差（±1SD）の範囲を示す。肌色の領域の測定結果は皮膚上で計測されたもの、灰色の領域は Y シャツの襟上、それ以外の領域での測定結果は服上で測定されたものを示す。各測定の位置、もしくは傍にある円グラフは主観実験の結果を示し、青が「明確に感じられた」と回答した人数、水色が「微かに感じられた」と回答した人数を示す。図中の青線は服の縫い目、緑線は鎖骨を示す。Hapbeat の線と帯の間の緑色の楕円は結合部品を示す。図中の星印は 4.4.3 節で注目した測定点を示す。 51
4.5 20Hz-1W 出力時の伝達振動の波形と周波数成分。四隅それぞれの上側のグラフは主成分分析により得られた加速度信号の波形、下側のグラフは、加速度信号の片側スペクトルの結果を示す。 53
4.6 音声ノイズ測定の条件（左）と結果（右） 55
4.7 周波数応答測定。左：マネキンの作成に必要な図面情報 (a, b)、マネキンを用いた測定条件 (c–f)。(a, b) のアルファベットは寸法を示し、A = 150 mm, B = 62.5 mm, C = 1100 mm, D = 70 mm である。また (a) の赤線・青線と (b) のそれはそれぞれ対応している。(c)–(f) の緑矢印は加速度センサの x 軸の向きを示す。右：加速度測定結果。 57
4.8 応答時間の測定結果の一例（6 回目の測定）。 58

5.1 (a) 変調手法で用いる極座標系。(b) 具体的な変調例。 64
5.2 音楽刺激として使用した楽曲（Vox・Inst トラック）の波形とスペクトログラム。波形の縦軸は振幅（-1.0–1.0）、スペクトログラムの縦軸は周波数（Hz）を示す。グラフの横軸は楽曲の再生時間（s）を示す。短時間フーリエ変換はサンプル数 8192、50% のハミング窓で計算された。 66
5.3 実験 1 におけるアンケート結果の得点差。得点差は各参加者の得点について、Hapbeat 条件の得点から headphone 条件の得点を引いて計算される。 70
5.4 (a) 実験 2 で参加者に振動がどのように変化したかを説明するのに用いた図。図中の比率は、Hapbeat の帯の左右の振動振幅の比率を示す。なお、この図のターゲットの位置は説明をわかりやすくするためであり、実験でのターゲットの配置を示すものでは無い。実験中ではターゲットはプレイヤーを中心とした半径 2 m の円周上（無段階）に同時に 1 つだけ存在する。(b) 実験 2 のバーチャル環境。(c) 実験 3 のバーチャル環境。(d) (c) の状態の時の俯瞰図。(e) 実験 3 の参加者の様子。 71
5.5 実験 2 の結果。マゼンタ色の枠で囲ったデータポイントは平均値の計算から除外されている。 72

5.6 実験 3 のバーチャル環境の説明。左：参加者がターゲットに到着した時、ターゲットを基準とした次の 8 つの出現箇所候補からランダムな位置に再出現する。右：1 回の施行におけるルート種類の一例。図中の文字の色は［Perfect：Good：Miss：Front/Back err］=［黒：マゼンタ：オレンジ：青］を示し、各色の数字は十字路で誤った回数を示す。最短移動距離は斜め移動を考慮した値である。 74
5.7 実験 3 のアンケート結果 77
5.8 実験 3 におけるアンケート結果の得点差。得点差は図中の一対のナビゲーション条件の間で各参加者の得点を計算したものである。 77

6.1 実験環境。(a) Hapbeat の装着含む実験中の参加者の様子。(b) Haptic・None 条件の VR 環境。(c) Vision・VisHap 条件の VR 環境。図中の赤枠は定義したレーダー描画範囲（6.4.8 節で説明）。(d) ベルト型装置の外観 89
6.2 提案手法の直交座標系および実験環境。極座標系は 5 章と同様（図 5.1(a) 参照）。6.4.5 節で説明するターゲットの動き方の一例を図中の赤矢印（M1）と緑矢印（M2）で示す。 90
6.3 式 6.1 による変調の具体例。左側は方向に基づく変調、右側は高さに基づく変調例を示す。 91
6.4 定量実験結果。青丸のデータは各参加者の平均値を示す。赤いプラス記号は加算平均を示し、その他は一般的な箱ひげ図と同等である。図 6.5–6.11 も同様である。 95
6.5 アンケート結果 96
6.6 Haptic と None における参加者内比較。正の値は Haptic > None を示す。H1 の検証を目的とする。p 値の上のアスタリスクは有意差を示す。p 値および Q 値の導出は 6.4.8 節参照。 99
6.7 Haptic と Vision における参加者内比較。正の値は Haptic > Vision を示す。H2 の検証を目的とする。 100
6.8 視線に関する実験結果。右のグラフは VisHap と Vision における参加者内比較。H3 の検証を目的とする。 101
6.9 VisHap と Vision における参加者内比較。正の値は Haptic > Vision を示す。 102
6.10 アンケートの Q1・Q2・Q5 に関する参加者内比較。上のグラフは M1、下のグラフは M2 の場合である。H4 の検証を目的とする。 103
6.11 移動方法に関して参加者内比較を行った定量実験結果。6.5.5 節で考察。有意差が見られた項目のみ抜粋、すなわち成功率・達成時間・アンケートの全設問について、どの提示条件でも有意差は見られなかった。 104

1 4.3.3 節で実装した回路の周波数応答。Lepy は比較対象のオーディオアンプ（LP-V3S, Lepy）。 133
2 4.3.3 節で実装した駆動回路の回路図。 134

表目次

2.1 全身の神経支配数のまとめ。[5] より引用 15

4.1 実験参加者の体格 47
4.2 実験に使用した衣服の摩擦係数とヤング率 49

5.1 実験 3 提示条件まとめ 73
5.2 ナビゲーションタスクの達成度グループ分類 76

6.1 H4 における同時検定結果 98

第 1 章

序論

1.1　研究の背景

1.1.1　音の世界とサウンドスケープ

音はそれ単体で 1 つの世界を創り上げる。家の中では家電や空調機からの音、人の会話などがプライベートな空間である家を形作る。同じ屋内であっても、モールでは客の喧騒や足音、店員の掛け声や場内で流れるアナウンスが聞こえるだろうし、レストランでは食器から鳴るカチャカチャという音や家族の話声、雰囲気を生み出すバックグラウンドミュージック（BGM）が聞こえるだろう。屋外で聞こえる人々の喧騒や自動車の走行音、木々のざわめきや鳥、虫の声、水の音など、聞こえる音の情報のみで、その場所の特徴や雰囲気、季節や時間帯までもが直感的に把握できる。

現代音楽作曲家である R.Murray Schafer はこうした環境の中の音を風景の一部であると捉え、視覚的な風景を示すランドスケープという単語に対し「サウンドスケープ」という概念を 1960 年代末に提唱した。その定義は「個人、あるいは社会によってどのように知覚され理解されるかに強調点の置かれた音環境。それゆえサウンドスケープは、個人（あるいは文化を共有する人々のグループ）とその環境との間の関係によって決まる」（[19] より引用、原文は [20]）とあるように、サウンドスケープは上述したような音そのもののみを指すのではなく、聴取者がどう感じたか、という社会的・文化的側面までを考慮する。例えば、日本において除夜の鐘を聴いた日本人の多くは年末年始を想起するだろうが、日本文化に詳しくない外国人はただの鐘の音としか感じないだろう。同じ日本人でも地域や性別、年齢や個々人の経験によって、同じ場所で聞こえる音でもその捉え方は異なることが想定される。そのため、聴取者一人ひとりの異なる音の世界、すなわちサウンドスケープが存在する。

1.1.2　サウンドスケープと音楽

サウンドスケープは音楽の在り方にも大きな影響を及ぼしている。Schafer は著作「世界の旋律」[21] にて「音楽家も現実の世界で生活している。よって、彼らの作品には意識的にも無意識的にも、さまざまな時代や文化の音とリズムが、認識できる多様な形で影響をとどめている」（[21] p. 231）と記し、時代の変遷とともに音楽がどのような変化を辿ったかを記している。18 世紀ではアントニオ・ヴィヴァルディの「四季」に代表されるような自然を描写した音楽は、自然のサウンドスケープから切り離れた都市住民に、自然に回帰させる役割を担っていたという。産業革命後の 19 世紀では、楽器が大きな音量を出せるよう発展し、オーケストラには新しい金管楽器や打楽器、ピアノが加わり、工場や大都市の喧騒を表現するかの様に全体的な音量が向上した。特に Schafer が「撥弦楽器のハープシコードを打弦楽器のピアノにおきかえたことは、新しい工程によって、物がたたかれ、打ち延ばされて生まれてくる時代の、より大きな攻撃性を象徴している。」（[21] p. 242）と考察しているのが興味深い。20 世紀では日常に機械が入ったことで、機械の音をイメージした音を発するための打楽器がオーケストラに加わった。「田園曲や夜想曲は姿を消し、蒸気機関車を模倣したネオゲルの “パシフィック 231”、たくさんの飛行機のプロペラを使ったアンタイルの “バレー・メカニック”...（中略）... といった機械の音楽が変わって登場した」（[21] p. 244）と Shafer は語る。現代のポピュラー音楽においても低音の効果が増大しているのは、低周波の環境音—自動車や飛行機の音に代表されるような重く連続的で人を包み込むような低音—の影響を受けていると、Michel P. Philippot の論文 [22] を引用して指摘している。

一方、音楽が人間の活動や情動に適合し特定の場面で定番的に使われるようになると、音楽自体がサウンドスケープとなる。音楽のサウンドスケープ化を積極的に推進したのが 1934 年に設立されたアメリカの Muzak 社（現 Mood Media 社）である。 同社は聞き流すことを前提とした音楽を環境に放送することで工場やオフィスでの労働生産性の向上を試みた。その効果が認められ、1946 年までにはほとんどの主要な米国企業に導入されるようになった [23]。Muzak の放送プログラムは、労働者が 1 日を過ごす中で最も疲労しやすい時間帯に高揚感のある音楽を意図的に流す、複雑なリズム・テンポ・音色を特徴に持つ音楽は徹底的に排除するなど、聴取者にとって無意識的に聞こえる BGM となることを徹底していた。一方、大量生産時代から消費者中心時代へと移り変わるにあたり、BGM と反対に音楽を前面に押し出して場を醸造するフォアグラウンドミュージック（FGM）が台頭した。FGM は特定の施設において、音楽を聴取者に意図的に聴かせることで特定の行動を促すことを目的としている。良く引き合いに出されるのはスーパーマーケットにおける FGM であり、既にこうした音楽が購買意欲にポジティブな影響を及ぼす可能性が示唆されている [24]。例として日本において、スー

パーマーケットで音声 POP「呼び込み君」[*1]（群馬電機株式会社）が奏でる音楽（No. 4）は明るくアップテンポでチープなため、消費者の気分を高めるとともに商品を安く感じさせる効果があるという [25]。また「別れのワルツ」を聴けばスーパーマーケットの閉店時間を想起し、買い物中の客は急いで買い物を済ませようとするだろう。このように音楽は、時に控えめに、時に明示的に空間のサウンドスケープに溶け込み、人々に様々な影響を及ぼしてきた。

1.1.3 サウンドスケープのバーチャル・パーソナル化

ここまで述べてきたサウンドスケープは「場所」に寄り添うものであり、その場にいる人間全員が（少なくとも物理的には）共有するものであった。しかし 1979 年に Walkman（ソニー株式会社）が登場 [26] するとそれは一変する。一人ひとりが周囲の音を遮り、自分の好みの音楽で聴覚を占有することが容易となった。すなわちサウンドスケープは「場所」から「個々人の聴覚空間」に移り、自由に調整できるようになったのである。その潜在的ニーズが非常に強かったことは、現在のスマートフォンに至るまでの携帯音楽プレイヤーの著しい進歩を見れば自明であろう。今や人々は多様な環境や場面で自分の好きなように音楽を楽しんでいる [27]。

イヤホン・ヘッドホンの進歩

さらに現在のイヤホン・ヘッドホンの発展も「個々人の聴覚空間」を自在に調整するのに欠かせない。現在のヘッドホンと同型のものは 1910 年にナサニエル・ボールドウィンによって発明されたが、世界初のイヤホンは Sony 社が 1982 年に発売した MDR-E252 とされている。ヘッドホンやイヤホンの発音ユニットであるドライバーのうち汎用的に使用されているのはダイナミック形とバランスド・アーマチュア形である。これらの構造自体は今日に至るまで大きく変わらないが、使用されている磁性材料や振動板材料の改善によって高音質化・小型化が進んでいる [28]。一方で、1900 年代と今日のイヤホンやヘッドホンを比較して一際目を引く違いは無線技術およびノイズキャンセリング・外音取り込み技術である。

近距離無線技術 Bluetooth を用いた Bluetooth イヤホン・ヘッドホンはユーザーをケーブルによる束縛から解放する。始めて Bluetooth 対応のヘッドセットが出たのは 1999 年 [29] であり、2000 年代半ばには音楽鑑賞用の Bluetooth ヘッドホンが市場に登場し始めた。黎明期では Bluetooth 規格自体の通信帯域が狭く圧縮コーデックが未発達であったこともあり、音質面での劣化は避けられなかったが、技術が進歩した今日では有線と区別できないほどに音質が向上している。さらに 2016 年に発売された AirPods (Apple, Inc.）に代表されるような、ケーブルを完全に廃した左右独立型イヤホンの登場はイヤホンの装着性を著しく向上させ、もはやアクセサリの装着と変わらない域にまで達している。

[*1] https://www.gunmadenki.co.jp/products/products-original/pop

アクティブノイズキャンセリング（ANC）・外音取り込み技術は使用者の音環境を自由に調整できるようにした。ANC の基本原理はヘッドホン・イヤホンに搭載したマイクで環境音を収録し、その音と逆位相の波形を生成して合成することで環境音を相殺する。ANC ヘッドホンはもともと航空機内の騒音を打ち消すために開発され、1950 年代にヘリコプターのパイロット向けに開発されたのが最初だと言われている [30]。その後 Bose 社の創業者である Dr. Amar Bose が 1989 年に発明し、航空機のパイロット向けに販売された Bose Aviation Headset が現代の ANC ヘッドホンの原型となっている。その後半導体技術の発展により、現代では左右独立型イヤホンに搭載されるようになっている。外音取り込み機能はその名の通り ANC とは反対に環境音を取り込んで再生することで、ヘッドホン・イヤホンを装着していも、まるでそれらを装着していないかの様に環境音を聞くことが出来る。すなわち、従来のサウンドスケープに自分好みの音を重畳することが可能となり、これは音の拡張現実（AR）とも言える。

ヘッドホン・イヤホンにおける立体音響技術

ヘッドホン・イヤホンでの再生を前提とした立体音響技術も発展を重ねてきた。現実に聞こえる音は 360° あらゆる場所から聞こえ、聴取者頭部や周囲環境、媒体などによる回折や反射の影響を受ける。ヘッドホン・イヤホンの場合、物理的な音源の位置は左右の耳に固定されているため、左右の音に頭部伝達関数を用いたフィルタをかけることにより、バーチャルな 3 次元音像定位を実現する [31]。また音環境内の遮蔽物や障害物の位置や材質による反射・吸収をシミュレートすることで、現場間のある残響や遮蔽表現が実現可能である。こうした空間的な音響表現は 3D ゲーム、特に一人称視点のものではゲームのプレイ体験に深くかかわる重要なものであり、ゲーム開発では多様な立体音響ライブラリやミドルウェアが提供され、専門のサウンドチームが存在することが一般的になる等、非常に重要視されている。こうした立体音響技術はまさしくバーチャルなサウンドスケープを創り出している。

ここまで記したように、わずか 5 g 程度のワイヤレスイヤホンを両耳に装着するだけで、周囲の音を自由に遮断・増強した上で臨場感のある音を自由に再生することができるようになった。もはや現代の一人ひとりのサウンドスケープは現実の空間と切り離され—あるいは混じり合い—バーチャル化されていると言える。

1.1.4　身体で感じるサウンドスケープ：体感音響

前節に記載した通り、聴覚でのバーチャルサウンドスケープは実現できたと言えるが、サウンドスケープを捉える感覚器は耳だけではない。本来、音とは空気圧変動によって伝達されるものであるため、聴取者の身体表面は空気圧変動による刺激を受ける（図 1.1）。そのうち鼓膜への刺激は聴覚的な音として知覚され、皮膚への刺激は触覚的な振動として知覚される（空気

伝播振動)。また空気圧変動や音源の振動が地面や床・椅子などの構造物を振動させ、それらと身体との接触面からも振動が伝わる（固体伝播振動)。この空気伝播振動と固体伝播振動を合わせた音響体験を本稿では体感音響と呼ぶ。現実世界において体感音響は、太鼓やドラム、花火などの「ドンッ」といった衝撃音や、サブウーファーから発せられる重低音、戦場における発砲音や爆裂音、オーケストラにおけるコントラバス・チューバ・スーザフォンなどによる低音楽器の響き、飛行機が通過するときの大気の唸り、道路を走るたくさんの自動車から伝わる大地の震動、ライオンやクジラ、象などの迫力ある咆哮、激しい川や滝での水の流れ、など様々な場面で感じられ、演奏会場・祭り会場・映画館・飛行場・動物園・渓谷など、その場のサウンドスケープを特徴づけるのに重要な役割を果たす。

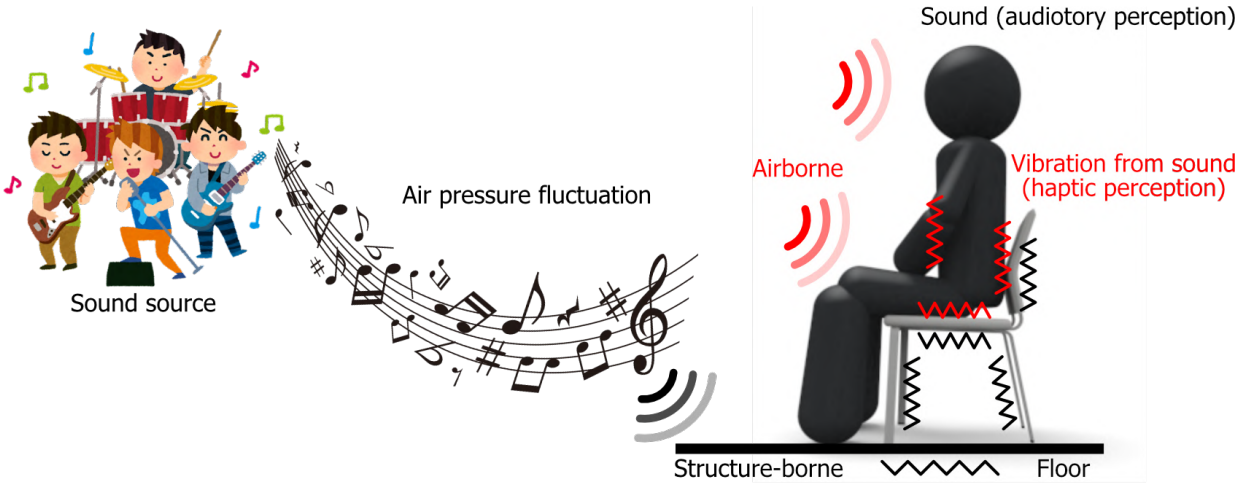

図 1.1　体感音響の概念図。身体には皮膚が空気圧の変化によって刺激を受ける空気伝播振動と、床や椅子などの構造物を介する固体伝播振動が伝わる。

こうした現象は主に音の低周波成分によって生じることが想定されるが、一方でガムラン音楽に含まれるような、20 kHz 以上の超音波成分が聴取者の脳のアルファ波の分泌や主観的な音質の向上に作用する Hypersonic effect が存在することが Oohashi ら [32] によって報告されている。Hypersonic effect はイヤホンでは生じず、スピーカーで再生した場合でのみ生じる [33] ため、この現象も身体で音を知覚する体感音響的な体験であると考えられる。

音楽鑑賞における体感音響の重要性

前節で述べた聴覚関連の技術が成熟した今日、サウンドスケープを豊かにするには体感音響の活用が重要となってくる。本研究ではサウンドスケープのうち音楽に焦点を当て、本小節では音楽鑑賞における体感音響の役割を、人々が音楽鑑賞を行う動機から考察する。音楽を聞く理由について 834 人のアンケート回答結果を分析した Schafer ら [34] の報告によると、その理由は主に以下の 3 つに分類できることが示されている。

- self-awareness：自己を周囲から切り離し、自分の内面に向き合うため。
- social relatedness：音楽を媒介として他人と社会関係を構築するため。
- arousal and mood regulation：自身の気分を調節するため（高揚・リラックスなど）。

体感音響により、音環境への没入感が増加することや、他者と共有する体験の印象が深まることが予想され、そのような観点では self-awareness や social relatedness と関連性が見出せるが、その関連性について具体的な調査はされておらず、現状では可能性の域を出ない。一方で、前述の通り Hypersonic effect によるアルファ波の増加や、2.2.3 節に記すように音楽の低音部を刺激することで聴取者のグルーヴ感が増強されることは実験から示されており、arousal and mood regulation と深く関係することが推測される。

実際に体感音響の影響が人々の行動に現れている例として、音楽ライブ・コンサートが挙げられる。今日ではインターネットを通して無数の音楽を手軽に聴くことができるようになったにもかかわらず、音楽ライブやコンサートといった生演奏の市場規模は縮小するどころか増加傾向である[*2][35]。公演参加への動機について 249 名の参加者に自由記述式のアンケートを行った Brown ら [36] の報告では「生のアーティストを見たい」「同じファンどうしで体験を共有したい」といった社会的な要因に基づく回答の割合が多かったが、ライブ会場における普段とは異なる音楽鑑賞体験を目的とした回答者も一定数存在していた。またライブ演奏に対する参加者の満足度を決定する要因を調査した Minor ら [37] は、音質および音量が最も重要であり、音場環境の改善が満足度向上への近道であると提案している。Reybrouck ら [38] もライブ会場やクラブでの 90 dB を優に超える大音量の音楽が聴衆に快楽をもたらし、人を惹きつけていることを指摘している。こうした調査結果は間接的に体感音響が音楽鑑賞体験の向上に貢献していることを示唆しており、多くの研究者が体感音響の影響を調査している（2.2.3、3.1.1 節参照）。

体感音響を提示する装置

体感音響を人為的に提示する方法として、振動子を組み込んだ振動提示装置を用いる方法が主流である。なお、本稿では体感音響の提示を目的とした振動提示装置を総じて、体感音響装置と呼称する。体感音響は 1980 年代に音楽療法の効果を補強する目的で明示的に活用され始め [39]、椅子やベッド、手術台などの人体系家具に振動子が埋め込まれた体感音響装置が発売された。1990 年代には臨床研究が盛んに行われ、その医療効果について限定的ではあるが、実験参加者には好意的に受け入れられていることが報告されている [40, 41]。2000 年以降、体感音響はエンタテインメント領域でも活用され始め、音楽と同期した振動の提示により音楽の鑑賞体験が向上することが示されたり [42, 43, 44]、SUBPAC[16] や Woojer[17]（図 2.7(e, f)）

[*2] COVID-19 の影響による減少は除く。

のような体感音響装置が継続的に販売されている。その他の既存の体感音響装置については 2.4 節で紹介する。

1.2 研究の目的

本論文ではまず 1.1.3 節で記した、個々人に属するバーチャルサウンドスケープの利用シーンでも、体感音響が自然に利用できるようにすることを目的とする。さらに体感音響による音像定位表現を実現し、音楽鑑賞体験を向上させつつ、情報提示を含めることで、サウンドスケープを豊かにすることを試みる。

1.2.1 新しい振動生成機構の提案

図 2.6、2.7 に示すような多くの体感音響装置には振動源として直動型振動子が用いられている。直動型振動子はスピーカーと似た機構であり、振幅と周波数を独立して制御可能できるため、音の波形を振動として提示するのに適している。しかし重りを動かす反力で振動を生成する原理であるため、振動子の大きさと特に低周波帯域の振動出力にトレードオフがあり、十分な振動出力を得るためには装置が大型化してしまうという課題がある。そのため、現時点で市販されている体感音響装置は設置型（図 2.6(d, e)）やベスト型（図 2.7(e, f)）などが主流となっているが、そうした装置では利用可能ケースが限定的となり、モバイル環境での利用に適しているとは言い難い。Walkman のように体感音響を特定の場所から解放するにはそのようなトレードオフを解消する必要がある。そこでモーターと糸を用いた張力に基づく、原理的に小型化が可能な張力式振動生成機構を提案し、高振幅な低周波振動を身体の広範囲に伝達可能なことを実験にて評価を行う。この機構を用いることで、モバイル環境に適した体感音響効果の高い振動提示装置の開発が可能となる。

なお 1.1.3 節で記した Hypersonic effect について、20 kHz 以上の超音波帯域では、空中超音波触覚ディスプレイ [45] などで用いられる超音波帯域トランスデューサーで表現出来る可能性はあるが、その場合モバイル環境での利用に不向きであり、本研究の目的にそぐわない。そのため本研究では超音波帯域の提示は行わず、「音楽の低音部による体感音響」に焦点を当てる。

1.2.2 日常的に利用可能な体感音響装置の開発

提案した張力式振動生成機構を活用し、モバイル環境での利用に適した振動提示装置を開発する。図 2.7(e, f) に示されるような装置は見た目のインパクトはあり、特定施設やデモ展示などで短期間体験するには良いが、長時間装着し続けることに適しているかは疑問である。我々は振動生成機構を用いて開発したベルト型プロトタイプを用いて数々のデモ展示でのユーザー

インタビューを行い、そこで得られた不満点からネックレス型装置を開発する方針に至った。電車やバスといった公共交通機関での利用を想定した設計要件を定義し、開発したものを評価する。これにより、日常的に使用することを前提とした体感音響装置の開発例を示すとともに、今後新たな体感音響装置を開発する上での指針を示す。

1.2.3　音響振動による立体音響表現の試み

1.1.3 節ではヘッドホン・イヤホンによるバイノーラル再生によってバーチャルなサウンドスケープを実現する技術について紹介したが、こうした技術を体感音響によるサウンドスケープ表現に活用することで、サウンドスケープをより自由に調整できると発想した。本研究ではその中でも音像定位に着目し、音声では無く触覚的な音像定位を実現することを目指す。触覚刺激で位置提示を行う方法は様々な刺激方法や提示部位で提案されているが（5.2.2、6.2.1 節参照）、それらはいずれも正弦波振動などの記号的な刺激を用いており、音楽鑑賞体験を損なう可能性がある。

そこで前節で開発した装置を用い、体感音響として提示する音楽と同期した振動（音楽振動）を、身体の上下や左右で変調させて提示する音像定位表現を試みる。具体的な状況として、音楽を聞きながら「目的に向かって街を歩く場合」「VR シューティングゲームをプレイする場合」においてタスク評価を通して実現性を評価する。体感音響による音像定位が可能なことを示すことで、音楽鑑賞体験を向上させつつ、情報提示を含めたサウンドスケープ表現が可能となることが期待される。

1.3　本論文の構成

本論文では 7 章から構成され、第 2 章以降は以下の様に議論を進める。

2 章「関連研究」では体感音響体験に関わる触覚の基礎的な特性や聴覚と触覚の感覚統合の知見を先行研究を元に整理し、最後に既存の体感音響装置を紹介する。

3 章「モーターと糸を用いた振動生成機構」では従来の直動型振動子が抱える課題を解決するためにモーターと糸を用いた張力式振動生成機構を提案し、身体への振動伝達能力を測定するとともに、体感音響装置として利用した場合の主観評価を行い、その性能を評価する。

4 章「張力式振動生成機構を用いたネックレス型体感音響装置 Hapbeat の開発」では 3 章で提案した張力式振動生成機構を活用した実用的な体感音響装置を実現可能であることを示すため、日常的なモバイルシーンでの利用を想定して設計要件を定義してネックレス型装置を実装し、その性能が要件に適合しているかを評価する。

5 章「体感音響による 2 次元音像定位」では体感音響で立体音響のような音像定位が可能であることを示すため、音楽鑑賞を楽しみながら目的地までナビゲーションを行う場面を題材

に、4 章で開発したネックレス型 Hapbeat を用いて首に音楽振動を変調して刺激することで、方向や距離といった 2 次元的な位置情報を伝達できることを示す。

6 章「体感音響による 3 次元音像定位」では 5 章の手法を 3 次元に拡張し、3 次元的な VR シューティングゲームを題材に、ネックレス型とベルト型の 2 つの Hapbeat を用いることでターゲットまでの方向や高さといった 3 次元的な位置情報を伝達できることを示す。

7 章「結論」では本論文の成果をまとめ、今後の展望について述べる。

第 2 章

関連研究

本章では本論文全体に関連する研究を紹介し、3–6 章それぞれの内容に強く関連する研究は各章内にて紹介する。

2.1 触覚の知見

2.1.1 皮膚の構造

人の皮膚構造を図 2.1 に示す。体感音響で主となる受容部は体幹部や四肢であり、その大部分は皮膚有毛部（以後、単に有毛部や無毛部と記す）である。Vallbo ら [2] の報告から有毛部の触覚受容器は メルケル盤・ルフィ二終末・パチニ小体・field unit・毛包受容器の 5 種類が存在し、その神経活動は皮膚無毛部と同様 FA-I・FA-II・SA-I・SA-II の 4 種類に大別できる（図 2.2)。表記の FA と SA について、FA は Fast Adapting の略であり、刺激に対する順応（感覚器が時間と共に刺激に慣れ、刺激を感じなくなること）が早く、皮膚変形の速度や加速度に対して神経細胞が発火し、皮膚表面の振動や動きのある接触物の知覚等に寄与する。SA は Slow Adapting の略であり、刺激に対する順応が遅く、皮膚変形の変位について持続的に神経細胞が発火し、皮膚への圧力などの知覚に寄与する。表記の I と II について、I は受容器ごとの受容野（感覚器が刺激を感じ取れる範囲）が狭く（直径数 mm 程度)、受容器間の領域が明確である。一方 II は受容器ごとの受容野が比較的広く、受容器間の領域が不鮮明である。

2.1.2 神経系の密度

触覚受容器や神経系の密度を推定する手法として、2 点弁別閾が調べられている。2 点弁別閾は皮膚に提示された 2 点の刺激を、実験参加者が 2 点と判別できる最小距離であり、その調査方法には 2 点を同時に刺激する方法と、時間差をつけて刺激する方法がある。全身における 2 点弁別域は古くから調べられており [46, 47] 最近でも Mancini らの報告 [4] から、有毛部は

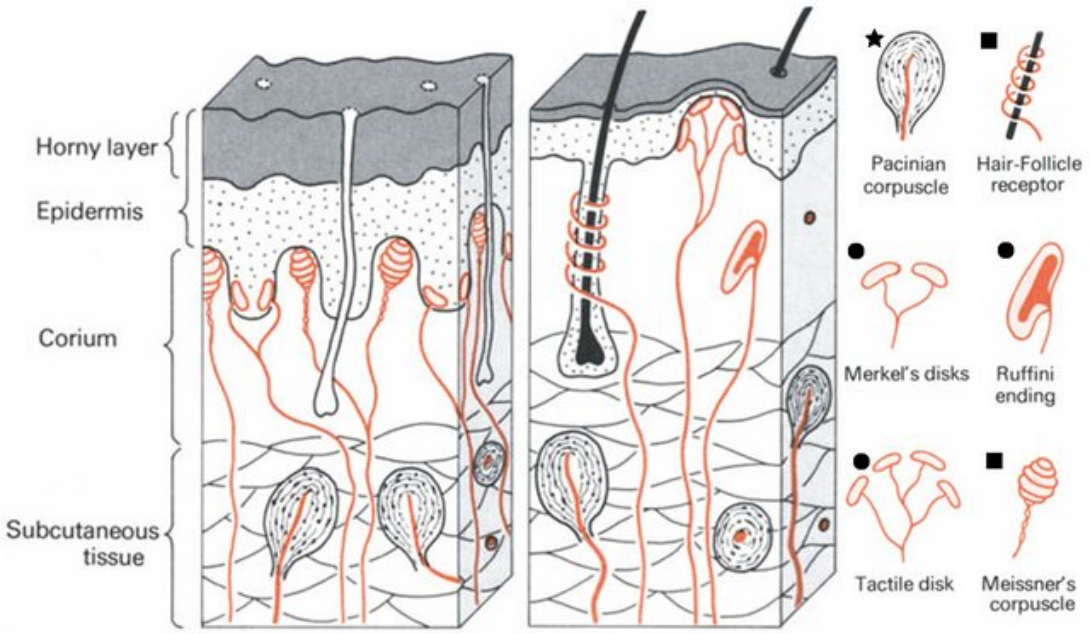

図 2.1 人の皮膚構造。左が無毛部、右が有毛部。[1] より引用。なお、field unit の具体的な組織学的構造は不明 [2]。

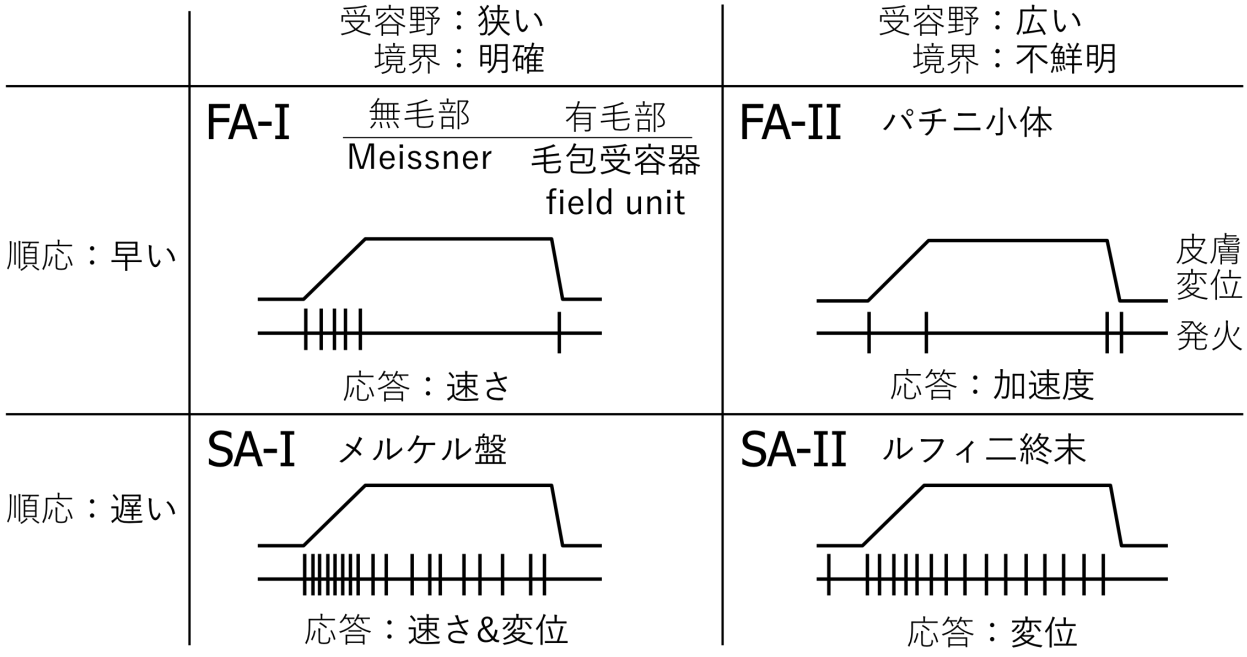

図 2.2 触覚の神経応答の分類図。[3] を元に作成。

無毛部よりも二点弁別閾が大きいことが再度報告されている（図 2.3）。また Corniani ら [5] は

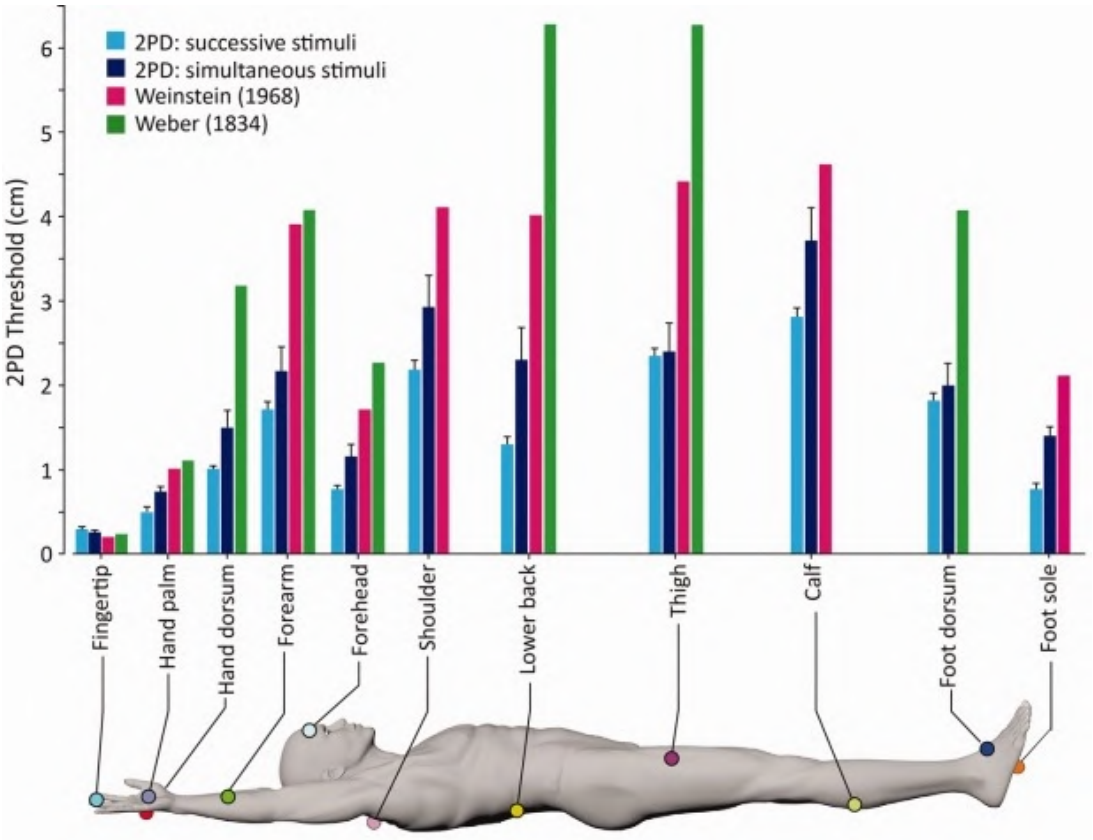

図 2.3　全身における 2 点弁別域の調査結果。[4] より引用。

先行研究から全身の触覚神経数および神経支配密度を推定している（図 2.4、表 2.1）。こうした知見は触覚デバイスを開発する際の、刺激提示位置の決定、振動子の個数や配列間隔を設計するのに有用な知見となる。

2.1.3　有毛部の触知覚

本稿では体感音響と関連性が高い、有毛部での振動知覚に焦点を当てる。

振動検出閾

振動検出閾は人が主観的に検出可能な最小刺激強度のことを指す。図 2.5 に示すように、その検出閾値は振動の周波数に依存し、一般的に無毛部の方が機械受容器の分布密度が高く有毛部よりも感度が良いことが知られている [6, 48, 49]。

一方で、空気の動きを伴う検出能力は有毛部の方が高いという報告もある [50, 51]。これは空気の流れによる体毛の動きが高感度に検知されていることを示しており、その後の古川ら

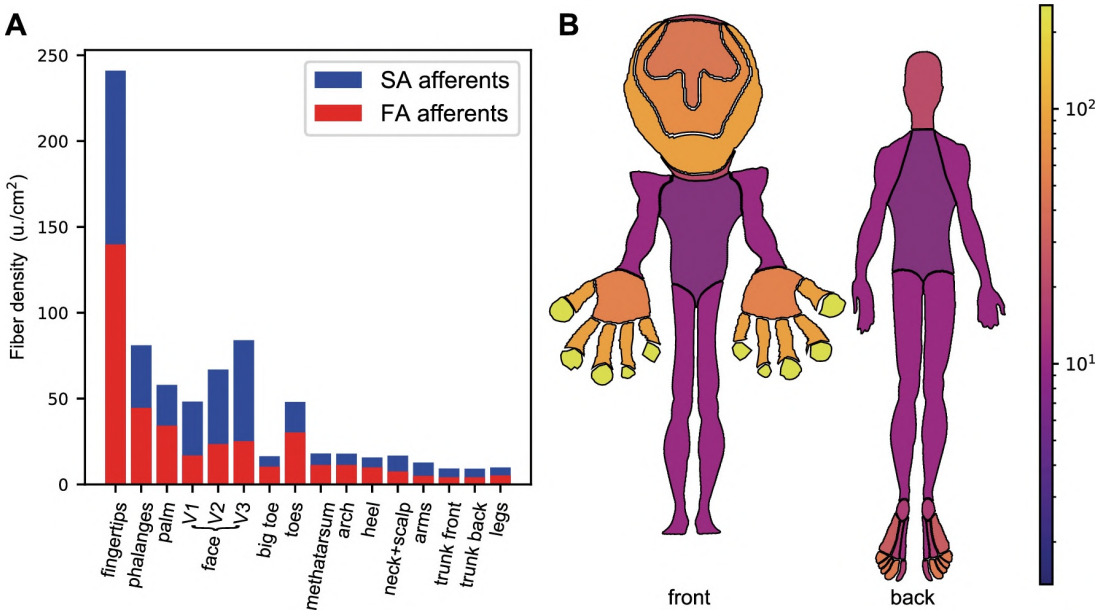

図 2.4　全身の神経密度の推定値。[5] より引用。

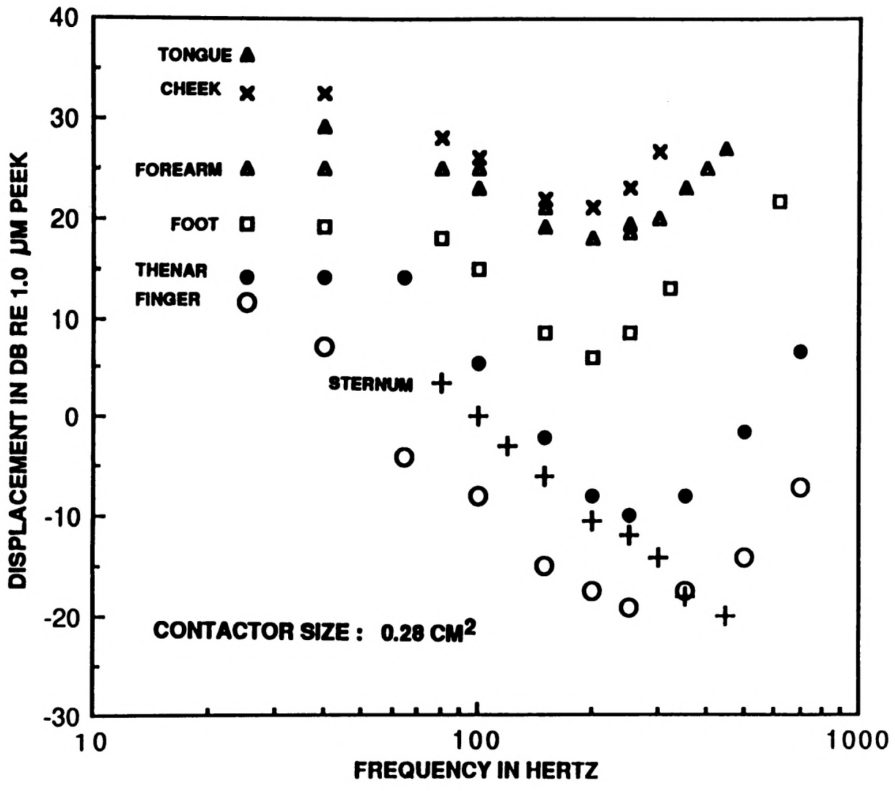

図 2.5　身体の複数部位で計測された振動検出閾値。[6] より引用。

表 2.1 全身の神経支配数のまとめ。[5] より引用

	No. of Afferents	Innervation Density, units/cm^2	Skin Area cm^2	SA Afferents, %
Hand	16,500	90	184	43
Fingertips	5,061	241	21	42
Fingers	6,156	81	76	45
Palm	5,046	58	87	41
Foot sole	3,958	21	200	37
Big toe	261	16	16	37
Toes	913	48	19	37
Metatarsals	912	18	51	37
Arch	1,362	18	76	37
Heel	597	16	38	37
Face	46,000	69	675	65
Face V1	12,307	48	255	65
Face V2	14,676	67	219	65
Face V3	16,820	84	200	70
Neck+scalp	8,625	17	516	55
Front trunk	20,886	9	2,272	55
Back trunk	20,775	9	2,272	55
Arms	35,335	13	2,769	61
Legs	56,186	10	5,722	47

[52] の報告から、体毛の動きは低周波を知覚するのに貢献することが示唆されている。すなわち空気中の低周波振動は、体毛の動きを介して毛包受容体と field unit で知覚されていると考えられ、体感音響における空気伝播振動の知覚は有毛部が重要である可能性が高い。

また刺激面積を拡大すると感覚強度が増大する効果 (spatial summation) が知られている。Schmidt ら [53] は 2 種類の接触子（単一接触子：0.48 cm^2 、行列接触子：9×0.48 cm^2 = 4.32 cm^2）を用いて振動知覚閾値を、上腕・脇下・腰部にて調査したところ、高周波（200 Hz）と低周波（30 Hz）両方において、接触子の面積が大きいほど振動検出閾値が低下することを報告している。

振動強度弁別閾

強度弁別閾は、人がある強度の刺激（原刺激の強度：I）を感じている状態から、刺激の強度が変化したことに気付ける強度差（弁別域：δI）のことであり、一般に強度弁別閾は Weber 比 $\delta I/I$ で表現される。皮膚表面での振動触覚における Weber 比は、無毛部で測定した母指球で 0.07–0.34 程度 [54]、足裏で 0.17–0.34 程度であり周波数に依存しないことが報告されている [55]。一方で、有毛部における振動強度弁別はほとんど研究されていない。Stronks ら [56] はコイン型の偏心モーターを背中側の腰部に装着し強度弁別比を調査したところ、Weber 比は 0.1–0.2 程度であること、刺激持続時間が長くなるほど Weber 比が低下することを報告している。Shah ら [57] は前腕部の複数部位で偏心モーターを用いて振動強度弁別を調査しており、その報告から Weber 比は 0.3–0.4 程度であることが推定される。また皮膚表面への振動刺激とは大きく異なるが、座面型の加振装置（図 2.6(c) など）を用いた全身振動における振動強度弁別については数多くの報告があり [58, 59, 60, 61]、それらによると Weber 比はおよそ 0.05–0.2 程度であった。以上をまとめると、有毛部の振動触覚における振動強度弁別についての体系的なレビューはまだ無いが、その Weber 比は概ね 0.1–0.4 程度の範囲に収まり、部位や刺激方法によってばらつくことが推測される。

周波数弁別閾

周波数弁別閾は連続して提示される 2 つの刺激の周波数を区別できる最小の周波数差である。Mahns らの報告 [49] から、有毛部（前腕部）と無毛部（指先）の周波数弁別閾は類似していることが示されている。これは振動触覚の周波数情報をコード化するメカニズムが、有毛部と無毛部で共通であるためと考えられる。その Weber 比は有毛部で 0.17–0.38、無毛部で 0.14–0.32 であった。Czopek ら [62] も手首の周波数弁別を調査しており、Mahns らの結果と類似の傾向を示している。また Branje ら [63] は背中での周波数弁別閾を測定したところ、指先や前腕での結果よりも優れた周波数弁別閾を示したことを報告している。Branje らはその理由として振動子の大きな接触子（直径 101.6 mm）を用いていることで、spatial summation が生じた可能性を挙げている。

本節をまとめると、振動刺激強度が検出閾を十分に上回っていれば、有毛部は無毛部と同程度に振動の強度・周波数を弁別できることが推測される。

2.2　聴覚と触覚の感覚統合

聴覚と触覚はその心理物理特性が類似し [64]、それらの相互作用が神経画像研究により一次体性感覚野でも生じていることが示されている [65, 66, 67] ほどに親和性の高い感覚であり、

その相互作用についても盛んに研究が行われている。聴覚触覚の相互作用に関する体系的なレビューは Occelli ら [68] の報告に任せ、本稿では聴覚と触覚の感覚統合について記す。感覚統合とは複数の感覚が身体に入力された際、それらを別々の刺激では無く同一の刺激として受け取ることを指し、聴覚と触覚の統合を聴触覚統合と記す。聴触覚統合は体感音響の根幹でもあり、単に聴覚のみで音を聞く場合に比べて様々な効果を及ぼす。

2.2.1　時系列統合

聴触覚統合において最も重要なのが時間的同期である。聴覚と触覚が刺激を知覚した時間差が一定時間以内だと、両者は統合されて知覚されることが知られている。その時間差を測る手法として、聴覚刺激と触覚刺激を時間的にずらして提示した場合に、両者の刺激を同時に知覚したか否かを測定する同時性判断（simultaneity judgment task, SJ)、どちらの刺激が先に現れたかを測定する時間順序判断（temporal order judgment, TOJ）が測定されている。同時性と時間順序判断では神経活動が異なることが Miyazaki ら [69] により指摘されているが、両者の聴触覚統合が生じる時間差は大きく変わらないようである。これまでの研究によると、実験手法によって変化するものの、同時性判断は 30–40 ms 程度 [70, 71] 時間順序判断は 20–82 ms 程度（40 ms 程度の報告が多い）であることが示されている [68]。つまり体感音響装置の設計において、システム全体の遅延がこの値以下となるよう心がける必要がある。この時間的な統合は聴覚と触覚の相互作用において非常に重要な要素であり、後述の知覚強度・周波数弁別の相互作用に繋がる。

また感覚統合は単純な時間の同期だけではなく、音楽的な時間要素によっても生じることが知られている。Bernard ら [72] は時間と共に連続的に変化するリズムによっても聴触覚統合が起きることを報告している。Daub ら [73] はチェロ演奏時に、触覚を音よりも 29 ms 早く提示したときに、最も「同期して感じられた」と回答している。Balandra ら [74] は波形包絡線（エンベロープ）の形状に注目し、非同期と感じる 75% JND（Just Noticeable Difference）を測定したところ、波形の立ち上がり時間（Attack）の長さの違いを弁別できるのは 54 ms、波形の減衰時間（Decay）の長さの差異弁別は 265 ms、音の終了時刻（Release）の差異弁別は 57 ms であることを報告している。

こうした研究での聴覚刺激はほとんどの場合指先で実験されており、有毛部での知見は不足しているものの、2.1.3 節で述べたように、認知的な指標である Weber 比が無毛部と有毛部で大きく変わらない、すなわち機械受容器以降の神経処理プロセスは類似している可能性が高いことから、閾値を十分に上回る刺激強度であれば、これらの知見は有毛部でも同傾向であることが考えられる。

知覚強度の向上

時間的な聴触覚統合により、聴覚・触覚の知覚強度がそれぞれ向上することが多くの研究で報告されている。触覚刺激により聴覚の知覚強度が増加した研究例として、Gillmeister ら [75] は、時間的に同期した人差し指への触覚刺激は聴覚の検出やラウドネス知覚（聴取者が感じる音の大きさ）を向上させることを示した。さらに触覚刺激が聴覚と同期していない場合は触覚刺激無しの場合とラウドネス知覚が同程度であることを示し、両刺激の時間的同期性の重要性を示している。Schürmann ら [76] も聴覚のみ条件と聴触覚条件で等ラウドネスを測定し、聴触覚条件の場合は音量を小さくしても聴覚のみ条件と同程度の大きさに聞こえることを示した。

反対に聴覚刺激による触知覚への影響については、聴覚刺激が触覚検出に寄与することが報告されている。Ro ら [77] は同時に提示された聴覚刺激が、検出閾値に近い皮膚電気刺激に対する感度を増加させたことを示した。Wilson ら [78] も触覚検出タスクにて、聴覚と触覚を両方同時に提示した方が、触覚刺激を正しく検出できる確率が向上することを示している。

上記の知見は主に無毛部（指）で行われているが、100 Hz 以下の低周波帯に関しては全身振動により報告されており、Simon ら [79] は全身振動の強度が 8 dB 増加すると、低音イコライゼーションの好ましいレベル (dB) が 3 dB 減少すること報告している。Merchel ら [80] は全身振動装置を用いてラウドネスマッチング実験を行った結果、聴覚刺激に振動触覚重 k い（10/20/63/200 Hz）を伴う場合、聴覚刺激のレベルは平均して 1 dB 高く知覚されたことを報告している。また Burton ら [81] は音楽鑑賞において、スピーカーからの 50 Hz 以下の低域成分（infra-subwoofer によって振動としても知覚される）が増加すると、好ましい聴取レベルが低くなることを示している。そのため低周波かつ全身への触覚刺激においても、聴触覚統合による知覚強度の増加は十分起こり得ることが考えられる。

2.2.2　周波数統合

聴覚と触覚の周波数の類似も聴触覚統合に寄与することが知られている。Ro ら [77] は参加者に、提示された振動触覚刺激が高周波（200 Hz）または低周波（100 Hz）かを識別させる課題において、同時に提示した聴覚刺激（100/200 Hz）と触覚刺激の周波数が一致した場合に触覚刺激の振動周波数の識別率が向上したことを報告している。Wilson ら [78] は振動触覚検出タスクにて、聴覚刺激と触覚刺激の周波数が一致していた方が正しく検出できる確率が向上することを示している。Yau ら [82] は触覚刺激の周波数弁別課題を行う際、聴覚刺激を同時に提示することで、聴触覚の相互作用について検証した。標準の触覚刺激を 200/400 Hz、聴覚刺激の条件を 100–1500 Hz として実験を行った結果、聴覚の周波数が触覚の周波数と類似する場合（[触覚のベースライン周波数：聴覚刺激の周波数] = [200：100 Hz]、[400：100–300 Hz]）

のみ、触覚の周波数弁別能力が有意に低下することが示された。つまり、触覚刺激と聴覚刺激の周波数が類似する場合に聴触覚統合が生じていることを示唆している。一方で触覚の強度弁別については、周波数の類似性は影響しないことも併せて報告している。

Yau ら [83] は上述の研究の後、聴覚の周波数弁別や強度弁別に対する触覚刺激の影響を調査したところ、聴覚の周波数弁別は振動周波数の類似性による影響を受けるが、聴覚の強度弁別には振動周波数の影響は見られないことを報告している。また聴覚刺激と触覚刺激の同時性は、聴覚の周波数弁別に影響を及ぼさないが、聴覚の強度弁別には影響を及ぼすことを報告している。Yau らはこの 2 つの研究結果から、周波数知覚と強度知覚における聴触覚の統合メカニズムが別々であることを主張している。

この報告は後の Crommett ら [84] の研究結果からも裏付けられる。Crommett らは常に聴覚刺激を触覚刺激に先行させた非同期条件で、触覚の周波数弁別および強度弁別実験を実施した。結果、聴覚刺激は触覚の周波数弁別に影響を及ぼしたのに対し、強度弁別には影響しなかったことが示されたことから、Crommett らは触覚の周波数知覚が聴覚信号も処理する神経回路に依存しているという仮説を支持している。

2.2.3 音楽鑑賞への影響

ここでは音楽的な聴触覚統合による影響を記す。Aker ら [85] は正弦波からなるメロディーに対し、聴覚–触覚間の強度・周波数・タイミングを一致させた場合と不一致の場合で実験を行った結果、聴覚刺激と触覚刺激のタイミングをずらすことが、使用したメロディに対する評価に最も大きな負の影響を与えることを記し、タイミングと強度の類似性が音楽振動の知覚に重要であることを示した。Huang ら [86] は音楽の拍子の認知に関する聴触覚統合の影響を調査したところ、触覚刺激と聴覚刺激の拍子を一致させて提示した場合、聴覚刺激のみ／触覚刺激のみよりも拍子の知覚が向上したことを報告している。

いくつかの研究により、低周波帯の音楽振動を提示することで音楽鑑賞体験にポジティブな影響を及ぼすことが知られている。Merchel ら [42] は実験参加者を座面型の全身振動装置に座らせ、音楽鑑賞時に音声信号を元にした振動を提示した場合の音楽鑑賞体験に与える影響を評価した。実験では 4 種類の音楽が用意され、いずれの楽曲についても振動有りの場合は無しの場合に比べて音楽鑑賞体験の質が良いと評価されたが、特に 20 Hz 以下の周波数成分を強く含むポップ音楽の場合の評価が最も良かった。Hove ら [43] は実験参加者に音楽の低周波振動を音楽と同時に提示することで、参加者の音楽に対するグルーヴ感（3.1.1 節にて説明）を増強させられると仮説を立て、SUBPAC M2X（図 2.7(e)）を用いて検証した。実験参加者に鑑賞中、音楽に合わせて指をタップするよう指示し、鑑賞後の楽曲に対する印象をアンケートで尋ねたところ、振動有りの方がタップする強度が強くなり、アンケート結果では楽曲に対するグルーヴ感・楽しさが向上したことを報告している。

2.3　音楽

2.4　既存の体感音響提示手法

ここでは体感音響装置に関する Remache ら [87] のレビューを参考に、既存の体感音響装置の大まかな分類とそれぞれの定性的な特徴を説明し、装置外観を図 2.6、2.7 に示す。なお以下に記す各分類の特徴は筆者の見解であり、定説では無いことに注意されたい。

2.4.1　設置型

設置型の形状としては図 2.6(a)–(c) に示す椅子型のものや図 2.6(d) のような床状のもの、図 2.6(e) のようなベッド状のものが存在し、振動子の組み込み方法としては、身体を支える構造物の裏側に振動子を固定する（図 2.6(a, d, e)）または振動子自体を身体を支える構造物とする（図 2.6(b, c)）のいずれかである。設置型体感音響装置の利点は、大きな振動子を利用できるため比較的高振幅な低周波振動を出力できること、装着の手間が無いこと、身体と広範囲に接触でき、広範囲に振動伝達が可能などがが挙げられる。欠点は、可搬性に乏しくモバイル環境での利用に適さないこと、装置と身体が適切に接する必要があり、使用者の姿勢や行動が制限されること、などが挙げられる。

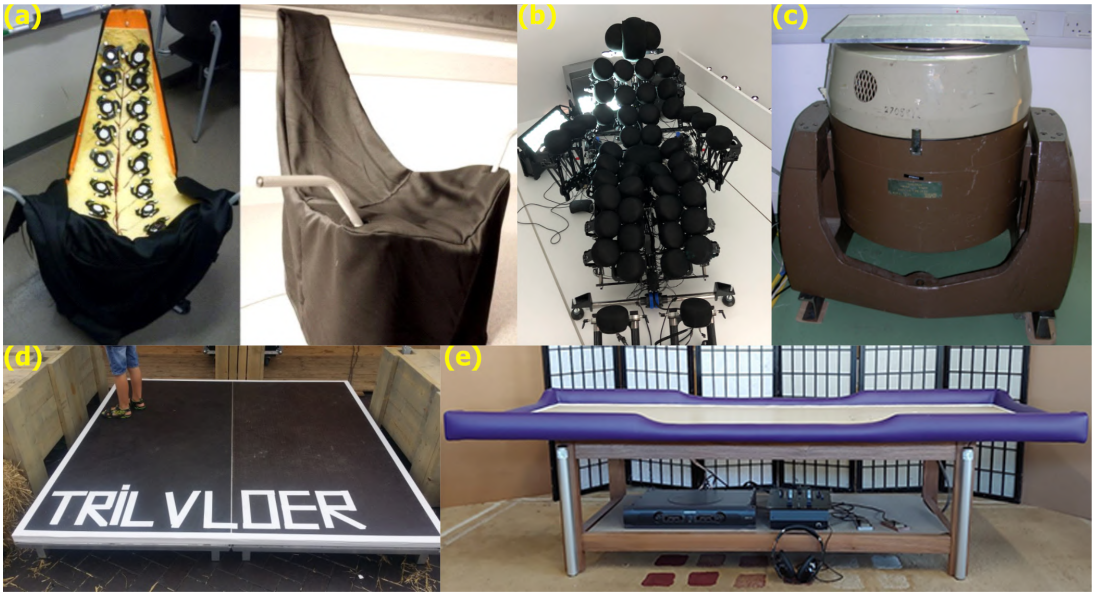

図 2.6　設置型体感音響装置の例。(a) Emoti-Chair [7]。写真は [7] より引用。(b) Synesthesia X1-2.44 [8]。写真は筆者撮影。(c) Derritron VP85[9]。写真は [9] より引用。(d) Vibrating Floor [10]。写真は [10] より引用。(e) InnerSoul Tranquility Liquid Sound Table [11]。写真は [11] より引用。

2.4.2　装着型

装着型装置全般に言える利点として、装置と身体が装着により密着しているため、参加者の姿勢や行動が比較的自由であること、場所を選ばずに使用可能なこと、などが挙げられる。欠点としては、常時体に密着させるために身体を圧迫する必要があり、装着感が良くない、振動出力と装置の大きさが振動子や消費電力などの面で両立しない、などが挙げられる。装着型装置の形状は多様であるが、一般的な傾向として、図 2.7(a–d) のような小型の装置は装着が容易で使いやすい代わりに振動が伝わる範囲が狭く、図 2.7(e–g) のような大型の装置は身体の広範囲に振動を伝えられる代わりに装着負荷が高い。また使用している振動子の種類によっても異なり、振動子が大きいほど低周波帯でも高振幅な振動を伝達できるが、空間分解能の低下や消費電力の増加といった欠点が生じる。これらはいずれも、衣服で身体に密着するように固定した振動子から振動を伝える、という仕組みの点では同一である。

図 2.7　装着型体感音響装置の例。(a) Armband-based Musical Haptic Wearables[12]。写真は [12] より引用。(b) Haptic Bracelets[13]。写真は [13] より引用。(c) Mood Glove[14]。写真は [14] より引用。(d) The Hedonic Haptics Player[15]。写真は [15] より引用。(e) SUBPAC M2X[16]。写真は SUBPAC 社が配布しているプレス用画像から引用。(f) Woojer Vest[17]。写真は [17] より引用。(g) Synesthesia suit[18]。写真は [18] より引用。

第 3 章

モーターと糸を用いた張力式振動生成機構

本章ではモバイル環境で利用しやすく効果の高い体感音響を提示可能な装置を実現するため、高出力な低周波振動を広範囲に伝達可能な、原理的に小型化が可能な振動生成機構を提案し、その評価を行う。

3.1 体感音響装置に用いる振動生成機構の要件

体感音響で重要な要素として以下の 4 項目を挙げ、各小節でその理由を説明する。

(1) 低周波振動が十分に出力できること。
(2) 広範囲への振動伝達が可能なこと。
(3) 入力に対する応答速度が速いこと。
(4) 原理的に小型でも (1)–(3) が成立すること。

3.1.1 低周波振動の重要性

なぜ体感音響を感じると鑑賞体験が向上するのかについて考察する。空気伝播振動に対して、人の胸部では 63–100 Hz で共振がおこることが Smith ら [88] によって報告されている。この周波数帯は音楽における低音部にあたる [89]。多くの音楽は低音でリズムを刻んでいるが、これはただ慣習的なものではなく、生理学的に根拠があることが報告されている。Hove ら [90] は人のリズム知覚について、脳が音の予期せぬ変化に自動的に反応する、ミスマッチ陰性電位 [91] の測定を通し、人間の脳は高音よりも低音のタイミングのずれをより良く検出すること、および音に合わせて参加者に指をタップさせる実験から、タップの同期は高音より

も低音の影響をより強く受けることを報告している。Lenc ら [92] も低音でリズムを伝えた方が、高音で伝えるよりも、そのリズムの周波数における大脳皮質活動が選択的に増強されることを報告している。

聴取者の行動を観測した Van ら [93] の実験では、スピーカーで再生されるバスドラムの音圧の増加につれ、聴取者がより身体を活発に動かし、高度なテンポ同調を示すことを報告している。このように、音楽の低音はリズム感覚の向上や身体の動きの誘発に繋がり、グルーヴ感の向上に貢献することが考えられる。グルーヴ感について、Senn ら [94] は先行研究を元に「音楽心理学では一般に、グルーヴ感は音楽に反応して身体を動かしたいという内的衝動であると定義され、数多くの研究がグルーヴが快楽体験と関連していると指摘する。」（筆者により和訳[*1]）と述べており、音楽鑑賞体験に重要な要素であることが伺える。そのため、体感音響で音楽の低音部が触覚的に知覚されると聴触覚統合が起こり、低音の知覚が増強された結果、音楽のグルーヴ感が向上し、音楽鑑賞体験の向上に貢献していることが考えられる。その根拠として、2.2.3 節で示した Merchel ら [42] や Hove ら [43] の研究が挙げられる。

以上をまとめると、体感音響の効果を効果的に発揮するためには音楽の低音域を十分に再生できること、つまり低音楽器が担う 20–100 Hz での再生に適しつつ、聴覚で捉えづらい 20 Hz 以下でも十分な強度の振動を出力出来ることが望ましい。

3.1.2　広範囲への振動伝達の重要性

一般に体感音響を体験する状況では全身が音場の中にあると考えるのが自然であるため、身体の大部分で空気伝播振動を感じていることが考えらえる。実際に演奏会場での空気伝播振動を測定し、演奏者からの距離に関わらず触覚で十分知覚可能な強度で伝わっていることが Merchel ら [95] によって報告されている。そのため、振動伝達範囲が広い方が実際の体験に近づき、より良い体感音響体験となり得ることは十分に考えられる。

また触覚的に知覚しやすくする目的もある。一般に振動子と皮膚との接触面積が大きくなるほど触覚の感度が上がることが知られており [6] それは腕や背中などの無毛部でも FA-I・FA-II 共に起こることが報告されている [53]。接触面積と音楽鑑賞の関係について報告した研究は見当たらないが、触覚の知覚強度が上昇することで周波数や弁別能が向上したり [63] 刺激のダイナミックレンジが広がることで音楽鑑賞にポジティブな影響を及ぼすことは十分に考えられる。

[*1] 原文：the definition of groove as music listeners' inner urge to move their bodies in response to the music is unanimously accepted in music psychology, but a great majority of studies investigating groove perception also point out that groove is associated with an experience of pleasure

3.1.3　応答時間の重要性

2.2.1 節で記したように、聴触覚統合において時間的な同期は必須である。聴覚と触覚の許容時間差はおよそ 40 ms 程度であるが、この時間は触覚刺激が聴覚刺激に先行した場合も含まれる [73] ため、体感音響装置の応答時間は短いことに越したことは無い。研究や製品に用いられている直動型振動子の応答速度は 5 ms 以下 [96] であるため、応答時間はそれと同程度の数 ms 程度であることが要件となる。

3.1.4　小型化の重要性

本研究では 1.2.1 節で述べたように、バーチャル化されたサウンドスケープに体感音響を利用できるようにすることを目的とする。従って、外出中に歩きながらスマートフォンで音楽を聞くようなモバイルシーンでも利用できる体感音響装置を製作できることを前提とする。そのため、振動生成機構は原理的に小型化しても (1)–(3) を満たす必要がある。

3.2　直動型振動子の課題

従来の体感音響装置は Ramache ら [87] のレビューにも記される通り、大多数がボイスコイルモーター、すなわち直動型振動子を使用しているため、本章では従来振動子の代表として直動型振動子を比較対象とする。直動型振動子の利点として、直動型振動子は振幅と周波数を独立して制御でき、かつ駆動方法が容易（音声波形を入力すればよい）で入手性が良いことが挙げられる。しかし直動型振動子は図 3.1 に示すように、重りを動かしその反力によって振動を生成する、という振動生成原理であるため、物理的な限界が生じる。

直動型振動子は、おもりを直動させた反力で振動を生成する。そのため運動方程式 $F = ma$ に基づき、振動出力（F）はおもりの質量（m）および加速度（a）に依存する。ここでおもりの加速度は、特に低周波において、重りが筐体内で動ける距離（最大ストローク量）によって制限される。具体的にどの程度の質量やストローク量があれば充分であるかを判断するのは難しく[*2]、定性的な説明となってしまうが、おもりを同じ加速度で動かすためには周波数が低くなるほど動かさなければならない距離が大きくなる。例えばおもりを 10 m/s^2 の加速度で動かす場合、ストローク量が 20 Hz では 1.27 mm、10 Hz では 5.07 mm 必要になる[*3]。そのため低

[*2] 振動子メーカーが、おもりの質量やストローク量といった内部構造を公表していないため。具体的な周波数応答を示しているメーカーも少ない。

[*3] $$A = 2a \times 10^3/(2\pi f)^2$$ より算出。ここで、A はおもりの全振幅（mm）、a は加速度（m/s^2）、f は周波数（Hz）。

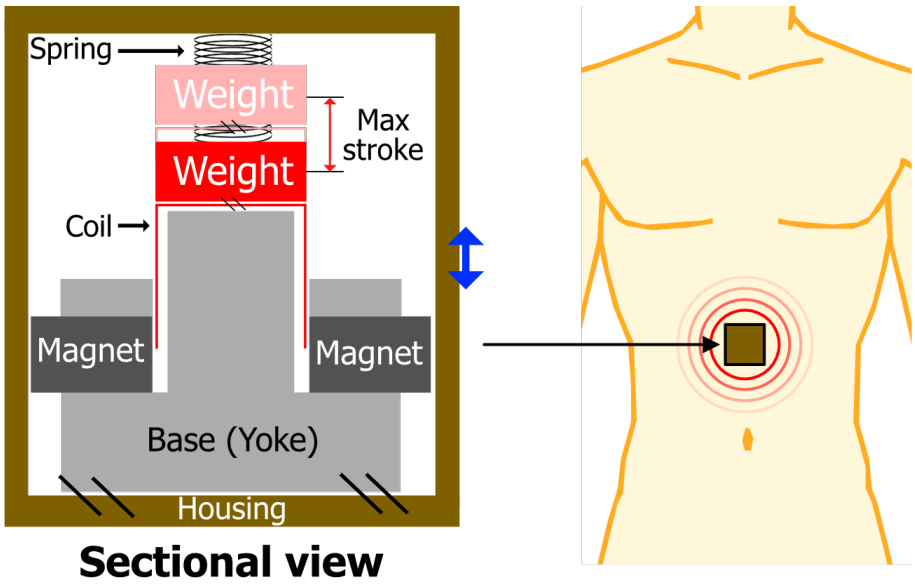

図 3.1　直動型振動子の振動生成機構と身体への振動伝達イメージ

周波帯で大きな加速度を得るためには最大ストローク量を大きくすることが望ましいが、必然的に振動子は大きくなってしまう。なお、皮膚表面への伝達振動は被駆動部（振動子の筐体および装着箇所周辺の皮膚）の質量に依存するため、目標とする伝達振動に対する必要十分なストローク量を正確に求めるのは容易では無い。またおもりの質量を増加させると、駆動のための電磁力の増加が必要となり、それに伴う消費電力や発熱の増加応答性の悪化、といった課題が生じる。

また振動伝達範囲に関して、皮膚表面では振動が大きく減衰するため [97] 伝達範囲を広くするには身体と装置を広く接触させる必要があり、これも装置の大型化の要因となる。この課題に対し、伝達範囲の向上を試みた研究がある。Sakuragi ら [98] は骨伝導を音でなく振動を伝達するのに利用し、鎖骨に振動子（図 3.2 中 Vp210）を接触させることで振動を広範囲に伝えられることを示した。Kurihara ら [99] はスピーカーから発せられる振動を粒状の発泡スチロールによって伝えることで、小型かつ少数の振動子から広範囲に振動伝達を行う手法を提案している。Withana ら [100] は人体の低周波音響波伝播特性を利用し、臀部への振動提示のみで腹部や頭といった所定の身体部位での触覚刺激を提示する手法を提案している。これらはいずれも何らかの物体を媒介として振動子で発生させた振動を広範囲に伝達するというアプローチであり、少数の振動子での振動伝達範囲の増加や装置の簡略化に貢献している。一方で振動子自体は従来のものと同様であり、20 Hz 以下の再生は依然として厳しい。以上より、直動型振動子は 3.1 節で記した要件を全て満たすことが極めて困難であり、本稿で目的とする体感音響装置の作成に適さない。

3.2.1 直動型振動子の振動出力の測定

直動型振動子の周波数応答の一例を示す目的で、市販されている 4 つの直動型振動子（Tactuator BM3C[*4], Foster ACTUATOR_639897[*5], Vp210[*6], TL-002-14R Haptuator Redesign[*7]）の振動出力を測定した。使用した振動子の外観、測定条件と測定結果を図 3.2 に示す。なお振動出力結果は測定条件に大きく依存するため、公式のデータとは異なることに注意されたい。

入力信号の振幅は、振動子の消費電力が 1 W となるように調整された。振動子はいずれも、230 × 290 mm 大のゲルシート上に約 1 × 1 cm 大に切られた両面テープ（AD&F WIG 両面ハードテープ、アデランス）で接着された状態で、加速度センサ（ADXL354C, Analog Devices, Inc.）を図 3.2 上のように貼り付けて測定した。周波数は E12 系列の値に基づく周波数で 1–1000 Hz まで測定を行った[*8]。

3.3 提案機構

前節（3.2 節）で説明した課題を克服するため、新しい振動生成機構を提案する。提案機構を図 3.3 に示し、以下で動作原理を説明する。

本機構は 2 つのモーター[*9] と 1 本の糸で構成される。モーターシャフトに取り付けられたボビンに糸の一端が結び付けられ固定される。糸の他端はボビンに何重か巻き付けられた後に繰り出され、装着者の身体に接触するよう周回したのち、他方のモーターのボビンに巻き付けられて固定される。この状態でモーターに信号が印加されると、モーターシャフトに発揮されたトルクによって糸が並進運動し、糸と接触している皮膚を変形させる。これにより間接的に、モーターに印加された電気信号に基づく力が皮膚に伝達される。

この駆動原理の利点は糸の体積がボビンの収納部に比べて十分に小さい[*10] ため、糸の変位（図 3.3 中 Stroke）すなわち皮膚の変位量を装置の大きさに対して十分に大きくできることである。そのため、同程度の大きさの従来振動子と比較して高振幅な低周波振動を皮膚に提示することができる[*11]。また、この糸をユーザの身体の広範囲に接触させることが可能なため、2

[*4] http://tactilelabs.com/products/haptics/tactuator-bmxc/
[*5] https://www.foster.co.jp/products/pdf/Vibration_Actuators.pdf
[*6] http://www.acouve.co.jp/product/pd_vp2.html
[*7] http://tactilelabs.com/products/haptics/haptuatorredesign/
[*8] 1.0/1.2/1.5/1.8/2.2/2.7/3.3/3.9/4.7/5.6/6.8/8.2、これらの値を 1/10/100 倍した 1–1000 Hz の計 37 種類
[*9] 単一のモーターでも同機構の実装は可能だが説明の便宜上割愛する。
[*10] 例えば図 4.2 に示す収容体積 179 mm^3 のボビンには、直径 0.5 mm の糸を 3.4 m 収納可能である（充填率 0.75 で計算）。これは振動による皮膚変位が、大きくても数 10 mm 程度であることを考慮すると十分な長さである。
[*11] 低周波振動出力に優れる BM3C においても、ストローク量は 6 mm 程度である。

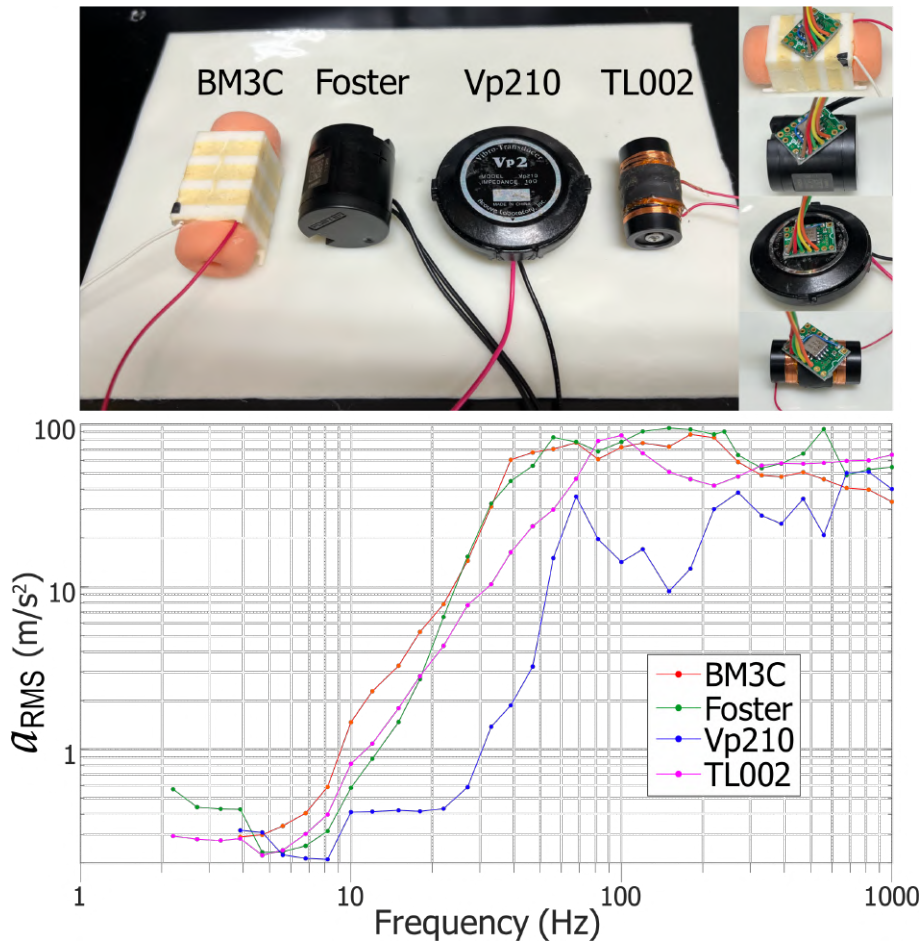

図 3.2　直動型振動子の周波数応答測定。上：測定に使用した直動型振動子の外観および測定条件。下：測定結果。加速度振幅 a_{RMS} の算出は式 4.1 参照。なお 100 m/s^2 近辺の値は加速度センサの検出上限（各軸約 78.4 m/s^2）に達している可能性が高いことに注意されたし。

つのアクチュエータのみで広範囲の皮膚を変形させることが可能である。これらの特性について、次節で評価を行う。

3.3.1　部品の要件

モーター：提案機構は音楽信号を印加して使用するのが前提であるため、モーターは入力された交流信号に応じて正転逆転を素早く繰り返す必要がある（数 10 ms 程度のタイムスケール）。また 3.1.3 でも記した通り、応答速度が数 ms 程度である必要がある。そのため回転子に鉄心を含まず、慣性モーメントが小さいコアレスモーターがアクチュエータとして適しており、その応答時間は 3 ms 程度 [96] であることから、応答時間の要件を満たす。また慣性モーメントが小さいことにより、提案装置は体感音響における高周波帯（100–400 Hz 程度）の入力にも応答でき、広帯域に渡る出力が可能である。

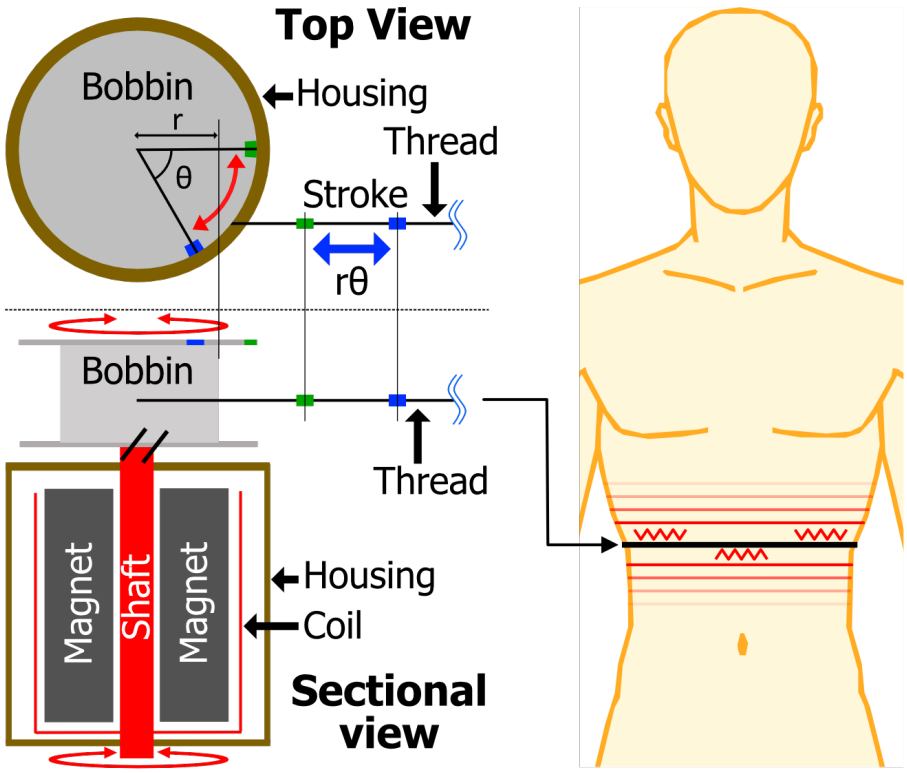

図 3.3　モーターと糸を利用した振動生成機構と身体への振動伝達イメージ。

糸：ボビンに固定する糸は、モーターシャフトのトルクを忠実に伝えるため、剛性が高い材料である必要がある。なお身体に接触する部材は、ボビンに固定されている糸と結合でき、高剛性のものであれば別のものでも良い。

3.4　評価

提案機構の振動伝達能力と体感音響装置としての性能を検証するため次の実験を行った。3.4.1 節では提案機構を用いた胴体巻き付け型の実験装置と直動型振動子を用い、実験参加者の身体に装着した状態で駆動し、体表に伝達される振動を複数点で測定した。3.4.2 節では参加者に、提案機構または直動型振動子による音楽振動を伴った音楽鑑賞体験についてアンケートを用いた主観評価を行った。

3.4.1　身体への伝達振動の測定

実験参加者

実験参加者は 23–33 歳の男性 5 名であった。皮膚表面での伝達振動の振幅を測定するため、参加者の同意の元、実験時は上半身が裸の状態とした。

刺激装置

提案機構を用いた実験用装置 Wearable Tension-based Vibroacoustic device (WTV) の外観および固定方法を図 3.4 に示す。WTV は 2 つの DC コアレスモーター（RE-max 24, Maxon Motor Co., Ltd.、 機械的時定数 6.48 ms、ロ―タ慣性モーメント 4.37 gcm^2、停動トルク 59 mNm)、アルミ製ボビン（フランジ直径 19 mm、内径 10 mm）および超高分子量ポリエチレン繊維を用いた釣り糸（ウルトラダイニーマ 3 号、YGK YOZAMI Co. Ltd.）で構成されている。モーターに取り付けられている樹脂部品（図 3.4(a) 半透明部材）は、ボビンから糸が繰り出される際のガイドおよび柱 (Autopole 032B, Manfrotto Co., Ltd.) への固定を安定させる役割を担っている。身体に装着させる際は、図 3.4(c, d) のように糸を身体前面から 1 回転巻き付けるようにした。そのためモーターが糸を巻き取る場合、胴体は圧縮されるよう力を受け、モーターが糸を繰り出す場合はその力が解放されることで、皮膚が変形し振動が伝達されることとなる。

提案の機構との比較のため直動型振動子の代表として Haptuator (TL-002-14R, Tactile Labs Inc.）を用いた。Haptuator の外観および固定方法を図 3.5 に示す。図 3.5(b) に示すよう、Haptuator は身体の前面と後面に 1 つずつ両面テープで仮止めし、図 3.5(c) のようにキネオロジーテープ (NKHB5、日東電工株式会社) を用いて図 3.6 の胸部または下腹部の青い点の位置に固定した。

測定条件

装置の装着箇所および測定箇所を図 3.6 に示す。測定は胸部と下腹部の 2 領域とし、WTV と Haptuator それぞれについて測定を行った。以後、特定の測定点を 1-L のように図中の行列表記で記す。加速度の測定には加速度センサ (KXR94-2050, KIONIX Inc.) を 1 つだけ用い、加速度センサを各測定点（図 3.6 黒点）ごとに 1 回ずつ、両面テープで接着して測定を行った。なお測定中、加速度センサがケーブルの重さで剥がれてしまわないよう、実験者がケーブルを把持した。測定では z 軸方向（身体表面に対して鉛直）の加速度をデータロガー (NR-2000、株式会社キーエンス) によりサンプリングレート 1 kHz で記録した。記録は各計測点につき 1 回・3 秒間行い、集計したデータの二乗平均平方根（RMS）を加速度の値とした。

提示振動

本実験では低周波信号として 30 Hz、高周波信号として 150 Hz の正弦波を用いた。30 Hz はマイスナー小体の固有振動数 [101] であることを理由に決定した[*12] 。150 Hz は大型直動型振

[*12] 今回の実験では有毛部で行われるため、マイスナー小体の代わりに毛包受容体が存在することである。しかし両者の性質は類似している [102] ため、30 Hz を毛包受容体の固有振動数と見なす。

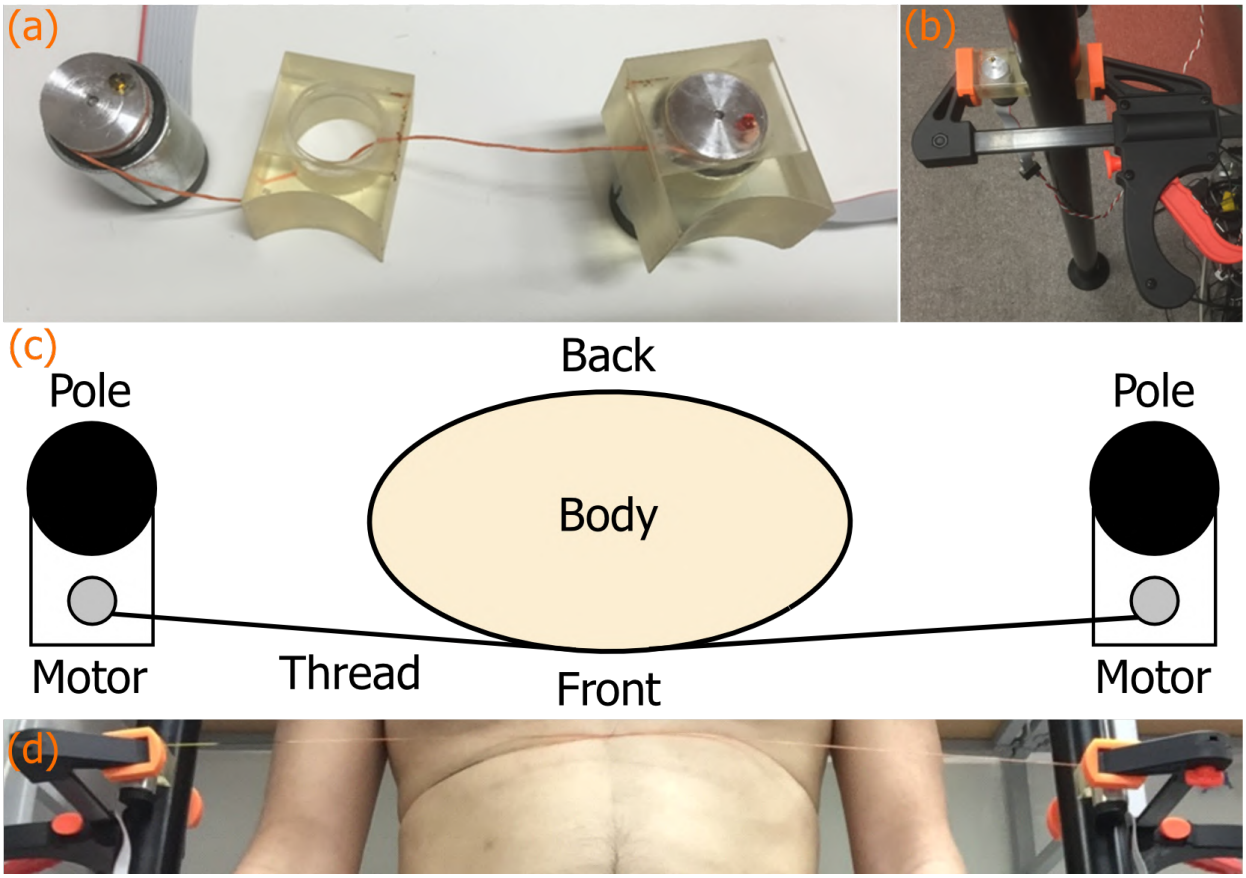

図 3.4 振動提示装置の外観。(a) WTV の外観 (b) WTV の固定方法 (c) WTV 装着状況の説明図 (d) WTV 装着時外観（胸部）

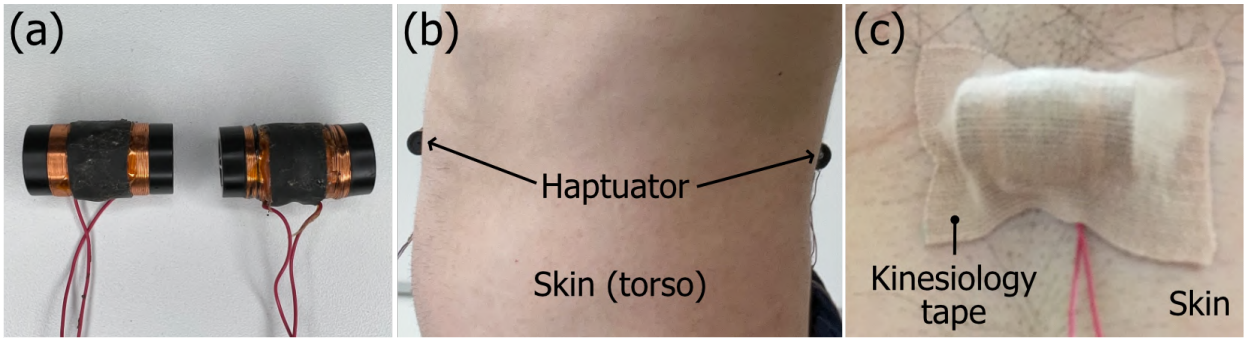

図 3.5 Haptuator の説明図。(a) 外観 (b) 装着位置の例（下腹部の場合）(c) 固定方法

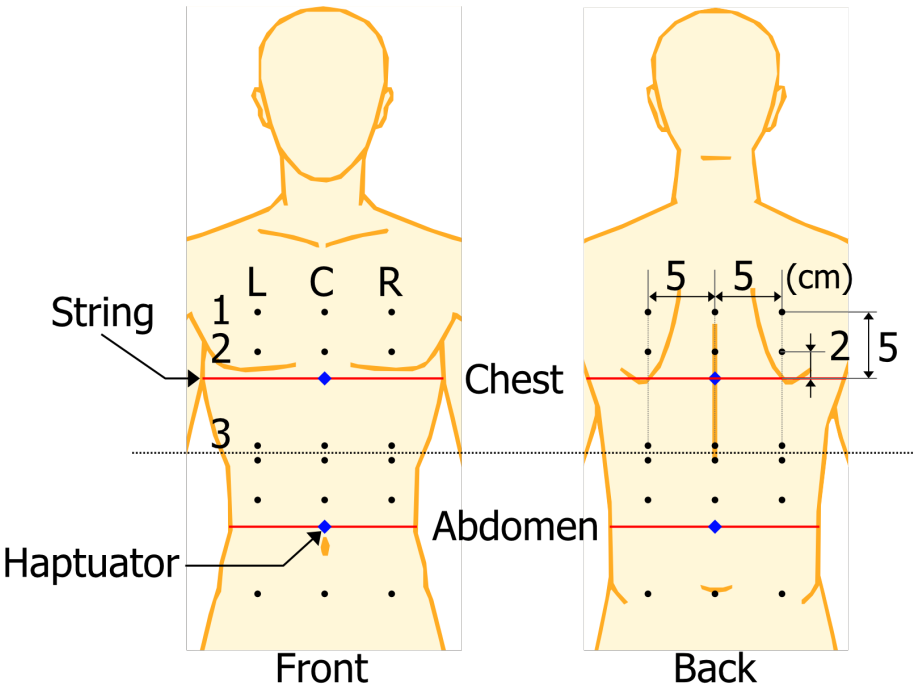

図 3.6　刺激装置の装着箇所および測定箇所。黒点は加速度センサを密着させて測定する箇所、青点は Haptuator の接着箇所、赤線は WTV 装着時の糸の場所を示す。胸部における装着位置の目安は参加者の鳩尾部、下腹部では臍から 1 cm 高い位置である。

動子を内蔵した、椅子型体感音響装置の出力範囲の上限 [103, 104] であることを理由とした。アクチュエータ駆動時の電圧振幅は Haptuator、WTV いずれも 30 Hz で 3.0 V_{RMS}、150 Hz では 5.4 V_{RMS} であった。また WTV では締め付けのためのトルク（5.5 mNm）を生じさせるため、入力電圧にオフセットを印加した。

実験手順

実験では同意の元、参加者の上半身を裸にさせ、油性ペンで計測点の場所に印を皮膚に直接記入した。測定では始めに Haptuater を体の胸部の高さで前面・背面に一つずつ固定し、150 Hz で前面・背面の順に計測した。次に周波数を 30 Hz に変更し同様に測定した後、Haptuater を下腹部の前面と背面に付け替え、30 Hz・150 Hz の順に同様に測定を行った。その後 Haptuator を WTV に着け替え、同様の順番で計測を行った。測定の順番は装置の付け替えや周波数の変更の回数を極力減らすためであり、順序効果は考慮していない。

実験結果

全参加者の測定結果の加算平均値を図 3.7 に示す。

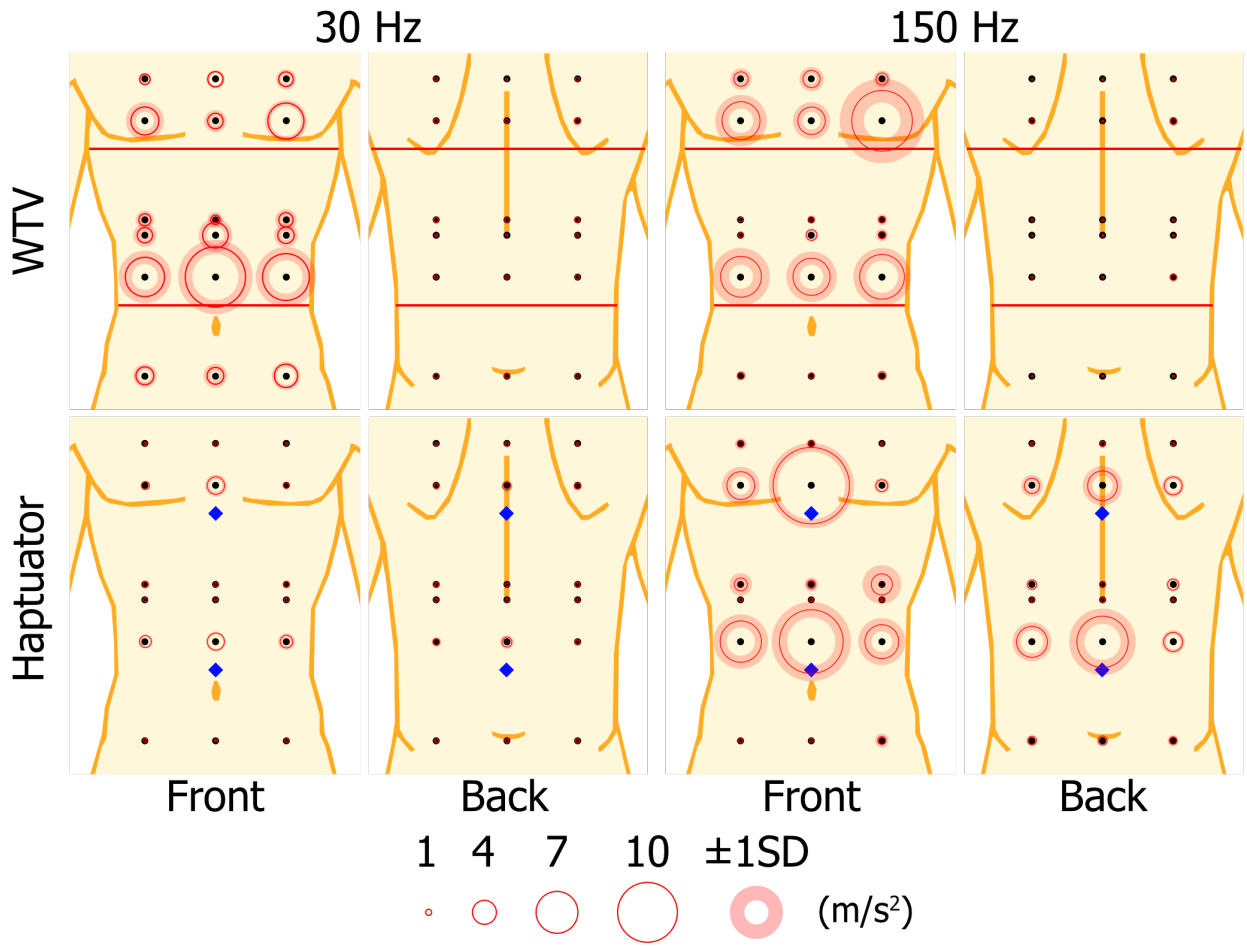

図 3.7　伝達振動測定結果。測定結果は 1 軸（体表対して鉛直方向）のみである点に注意。

3.4.2　音楽鑑賞体験への影響

実験参加者

実験参加者は 23–33 歳の 10 名（男性 7 名）であり、そのうち 5 名は伝達振動測定にも参加していた。参加者は全員 T シャツ程度の薄着であった。

音楽刺激

今回の実験では 20–100 Hz の低音が比較的強いジャズ楽曲 (Tribal Tech, Nite Club, 5:25–5:55, 123 BPM) と、低音が比較的弱いピアノ楽曲 (Chopin, Fantaisie-Impromptu, 0:34–1:07, 65 BPM) を使用した。それらの信号波形およびスペクトログラムを図 3.8 に示す。

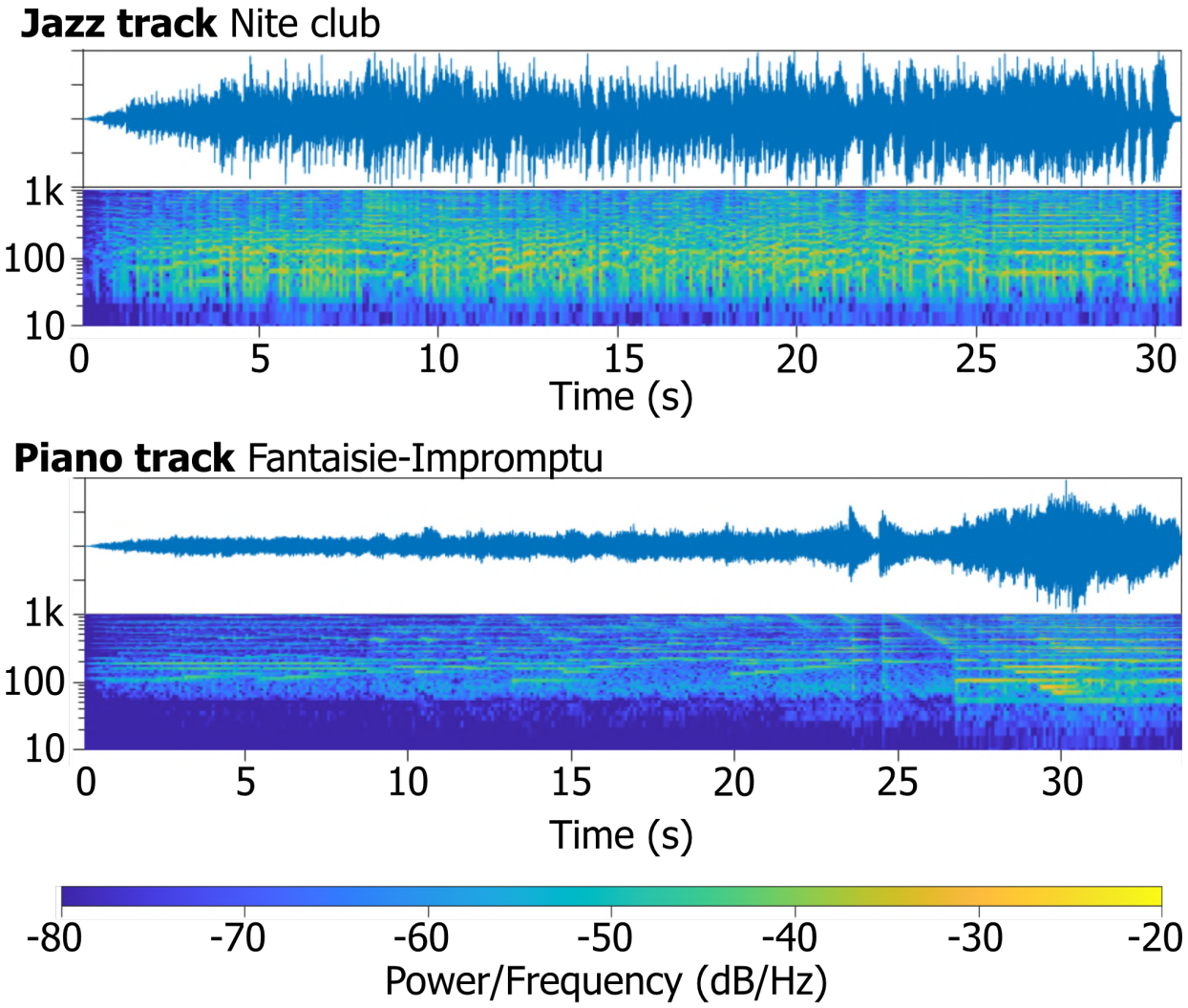

図 3.8　音楽刺激。それぞれの楽曲の上半分は波形（縦軸：-1.0–1.0 の振幅）、下半分はスペクトログラム（縦軸単位：Hz）を示す。短時間フーリエ変換は、50 %オーバーラップのハミングウィンドウを用いて 8192 サンプルで計算された。

アンケート

次に記す 4 つの設問について Visual Analog Scale を用いて評価した。WTV または Haptuator のいずれかとヘッドホンを併用して音楽鑑賞を行った場合に、ヘッドホンのみの場合（ヘッドホン条件）と比較して：

- Q1：好きか嫌いか。
- Q2：音楽をよりリズミカルに感じられたか否か。
- Q3：音楽との一体感が強まったか否か。
- Q4：より臨場感を感じられたか否か。

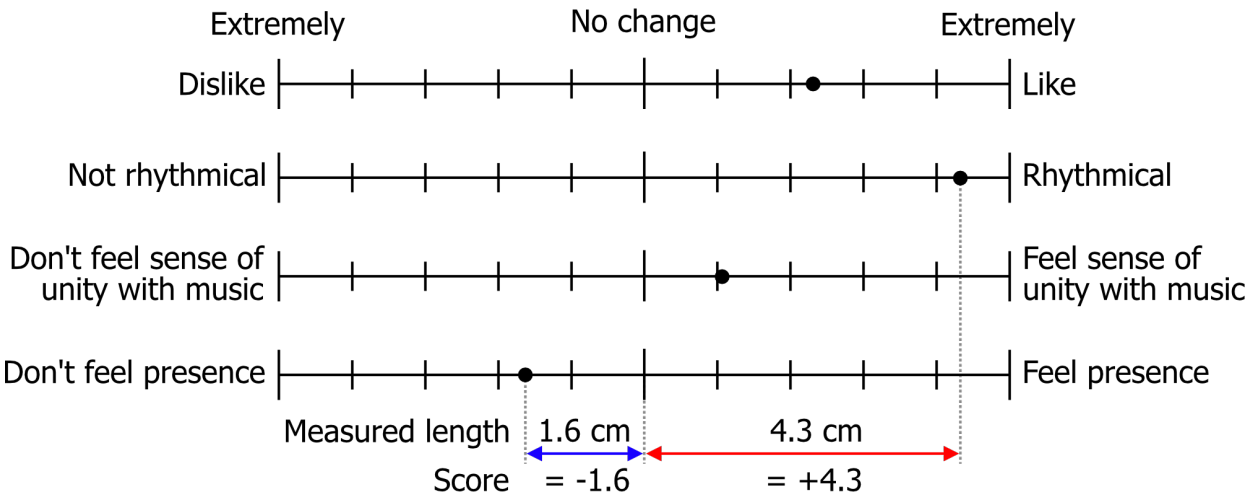

図 3.9　アンケート回答用紙および回答例。中央を基準とし、記入点までの距離を得点とする。

図 3.9 アンケート回答用紙および回答例を示す。中央の 0 は音楽と比べて装置を使用しても何も変化が無かったことを示し、5 では著しい差異を感じたことを示している。なお参加者には線上であれば目盛の上に限らず自由に記入して良いことを伝えた。参加者が記入した点と中央の 0 点との距離を定規で計った値を得点とする。

実験手順

参加者は始めにヘッドホンのみで音楽を聞き（ヘッドホン条件）、その後 WTV または Haptuator を装着した状態で再び音楽を聞いた後（WTV 条件／ Haptuator 条件）、ヘッドホン条件と比較した。その後もう片方の装置に取り替え同様に音楽のみの場合と比較した。装着する順番は特に定めず、参加者は自由に WTV または Haptuator を装着し直し、繰り返し同じ楽曲を聞くことが出来た。なお、装置の装着箇所は胸部（図 3.6 Chest）の場合のみとした。

実験結果

全参加者の得点を図 3.10 に示す。また使用した音楽のうち、好みのものについて口頭で質問したところ［ジャズ：ピアノ：両方＝ 4：3：3］人であった。なお楽曲ごとの評価の違いについて評価するため、ジャズ楽曲の得点からピアノ楽曲の得点を差し引いた結果（参加者内比較）について、次節に示す手順で仮説検定を行ったが、いずれの装置、設問でも有意差は見られなかった。

統計的仮説検定

図 3.10 について、有意水準 $\alpha = 0.05$ で「中央値が 0 である」という帰無仮説を立て、ウィルコクソンの符号順位検定を行った。得られた p 値を図 3.10 中に記す。WTV の場合は 8 つ

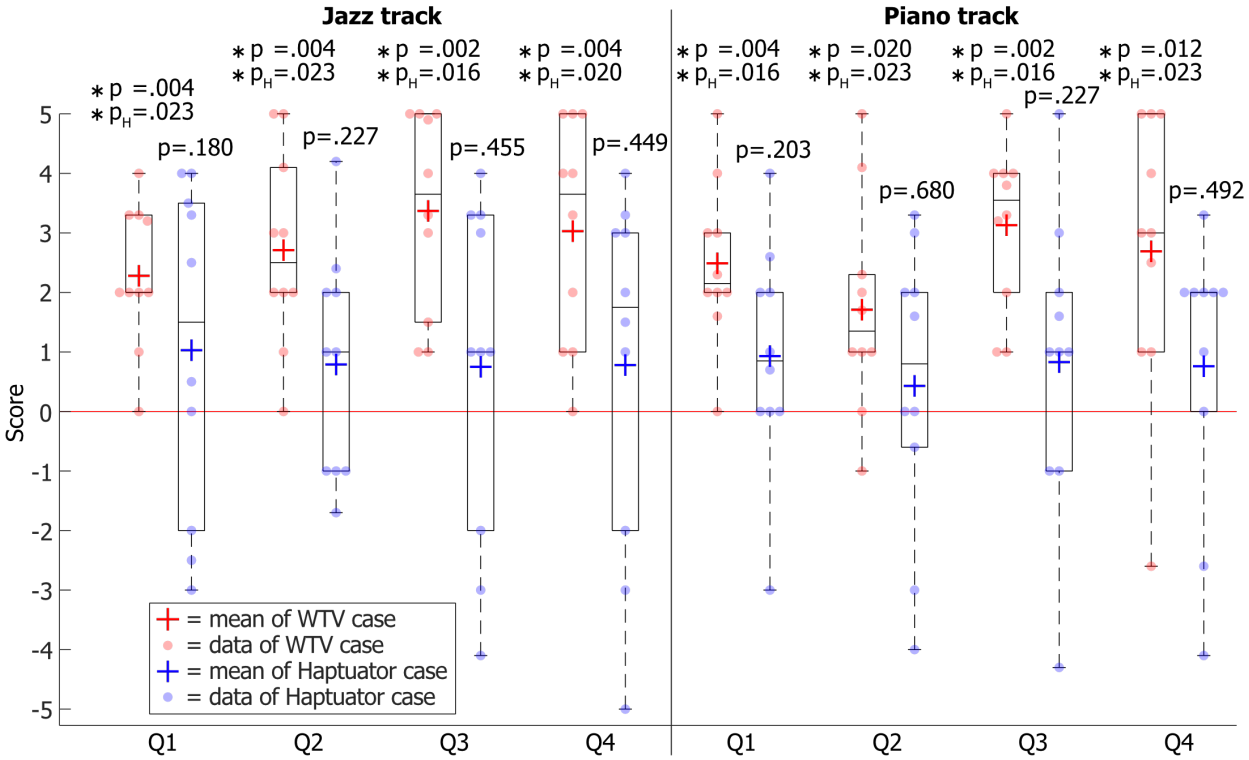

図 3.10　アンケート結果。図中データは各参加者の得点を示す。*は有意であることを示し、p 値はウィルコクソンの符号順位検定の結果、p_H 値は WTV の 8 つの帰無仮説族について Holm 法で調整した値である。

の帰無仮説（4 質問 × 2 楽曲）全てが棄却されたが、これらが全て同時に棄却されるかを検証するためにはファミリーワイズエラーを考慮した調整が必要となる [105]。その調整法として Holm 法 [106, 107] を選択し p 値の調整を行った。調整後の p 値を p_H として同じく図 3.10 中に記す。結果、8 つの帰無仮説は全て同時に棄却されることが示された。これらの統計処理ソフトウェアには MATLAB R2022a を用いた。

3.5　考察

測定結果から伝達振動は身体と糸との接触領域から伝達されることが観測され、WTV が高振幅な低周波振動を広範囲に伝達できていることが明らかとなった。特に 30 Hz における Haptuator との差は顕著であり、Haptuator が 30 Hz の振動をほとんど伝達できていないのに対し、WTV は 150 Hz の場合と同程度の強度の振動を伝達できており、低周波帯域で優れた周波数特性を有していることが示された。また 150 Hz においても前面に関しては、WTV は Haptuator と同程度に振動を伝達できており、高周波帯の振動伝達にも優れていることが確認された。

また音楽鑑賞体験について、図 3.10 から WTV 条件における全ての場合で同時に有意差が認められ、ヘッドホン条件と比べて音楽鑑賞にポジティブな影響を及ぼすことが示された。一方 Haptuator 条件では平均値は 0 より大きかったものの、ヘッドホン条件と比べてネガティブな影響を感じた参加者も一定数おり、いずれの楽曲・設問においても有意差は見られなかった。これにより、いずれの提示装置も音楽鑑賞体験の向上に寄与する傾向にあるが、WTV の方がより多くの参加者に受け入れられやすく、その効果量も大きいことが示された。以下、実験で得られた知見について考察する。

3.5.1 皮膚上での振動伝搬

皮膚上の伝達振動は提示装置との接触領域から離れるほど減衰していた。振動体から遠方点への皮膚内部の振動伝達は、触知覚域の周波数帯では主に軟部組織を伝わるせん断波によって伝達されることが知られている [108]。Dandu ら [109] は、弾性体の運動方程式、粘弾性体である皮膚軟部組織の減衰率および運搬速度が振動の周波数に依存する [110, 111] こと、線形粘弾性モデルにおける軟部組織内の時間及び振動体からの距離に関するひずみベクトルの解から、任意の平面に対する偏極のフーリエ級数展開を行い、皮膚のひずみベクトルに関して次式を示した。

$$\xi(x,t) = \int_{-\infty}^{\infty} df\ \phi(f)\, e^{-axf}\ e^{j2\pi f(x/c(f)\ -\ t)}$$

ここで、$\xi(x,t)$ は時間変化するひずみベクトルであり、x は振動源からの距離、t は時間、f は周波数、$c(f)$ は伝搬速度である。また、線形粘弾性モデルでは減衰は周波数とともにほぼ直線的に増加すると考えられるため、減衰率 $\sigma = \alpha f$ としている（α は任意定数）。これより、振動波は距離、周波数の増加に伴い指数関数的に減衰することが分かる。

この現象は実験で得られた結果と一致しており、WTV における 150 Hz と 30 Hz の結果を比較すると、30 Hz の方が伝達振動の減衰が小さい傾向にあり、特に下腹部での結果において顕著であることから、皮膚の粘性による減衰が生じたことが示唆される。これより振動を広範囲に伝達するにあたり、振動源の振動強度を強くするよりも接触面積を広くした方が効果的であり、振動体である糸を広範囲に接触させる提案手法の合理性が示された。

3.5.2 振動を伝達できなかった領域

WTV の胸部・糸近傍（2 行目）において、中央の伝達振動は左右よりも振幅が小さいかった。これは鳩尾部の高さを基準に糸を接触させたため、左右に比べて中央部分は凹んでおり、身体意に対する糸の接触状態に差があったことが起因すると考えられる。

WTV は背面に振動をほとんど伝達できなかった。これは身体への糸の巻き付け方に起因することが考えられる。両側から糸の巻き取りや繰り出しによって、胴体が一様に圧縮・解放さ

れるのを繰り返すのが理想的であるが、胴体は楕円状であるため、身体の側面が疑似的な固定端の役割を果たしてしまい、皮膚変形の大部分が前面でのみ生じてしまった可能性が高い。この解決方法として、左右のモーターに逆位相の電圧を印加し、片方が巻き取る際はもう片方が繰り出すようにすることで、糸が身体上を並進運動するようになり、背面の皮膚まで振動が伝達されることが期待される。

3.5.3　楽曲による違い

全体的にジャズ楽曲の方がピアノ楽曲よりも低域が強いにもかかわらず（図 3.8）アンケート結果からは両楽曲間で差異は見られなかった。これは音楽の低周波帯を振動として刺激することの有効性を報告した Merchel ら [42]、Hove ら [43] の結果とは異なる。この理由として、ピアノ楽曲の終盤は低域が強くその印象が強く作用したこと、両楽曲に対する参加者の好みが均一的に分散していたこと、比較対象が音楽のみの場合であり、楽曲同士を直接比較していなかったこと、などが考えられる。

今回の実験結果から WTV に適した楽曲について一般化することはできないが、音楽の好みとその理由についてインタビューしたところ興味深いコメントを得た。ジャズ楽曲を好んだ参加者は「ジャズ楽曲では振動の強弱を、特にバスドラムの振動によって、はっきりと知覚出来たことでリズム感が向上した。一方ピアノ楽曲では振動が一定の大きさで知覚されリズム感を感じることができなかった」と述べていた。ピアノ楽曲を好んだ人によれば「ジャズ楽曲ではその中に多くの楽器が含まれており、知覚している振動がどの楽器であるかを分別することができず、それが嫌悪感に繋がった。一方ピアノ楽曲では楽器の種類がピアノ一種類であり、簡単に音と振動とを同調させて知覚出来たため、好ましい」と述べていた。このことから単純に楽曲全体を振動として体験させるのではなく、楽曲に含まれている特定の楽器音を抽出して振動を提示することによって、体験者それぞれの好みに合わせた体感音響提示が可能であることが期待される。

3.6　3 章のまとめ

本章では体感音響装置によく用いられる直動型振動子の課題である、振動子の小型化と広範囲への高振幅な低周波振動伝達の両立を実現するため、モーターと糸を組み合わせた張力式振動生成機構を提案した。その評価として伝達振動を測定したところ、提案機構は低周波帯において高周波帯と同程度の強度の振動を、巻き付けた糸を中心に伝達できることが示された。また装置の主な用途である音楽鑑賞に使用した場合の、鑑賞体験に与える影響についてアンケート調査をおこなったところ、提案機構を利用したほとんどの参加者の鑑賞体験にポジティブな影響を及ぼすことが確認された。本章により、モバイル環境で利用しやすく効果の高い体感音

響装置の製作が可能となった。

第 4 章

張力式振動生成機構を用いたネックレス型体感音響装置 Hapbeat の開発

本章では 3 章で提案した張力式振動生成機構の実用化を目的とし、同機構を用いたネックレス型触覚デバイス Hapbeat の提案および評価を行う。

4.1 胴巻き付け型の課題

我々は 3 章で提案した機構を用いて、胴体巻き付け型のプロトタイプを開発した（図 4.1(a)）。そのプロトタイプを国際会議 Euro Haptics 2016 でデモ展示を行ったところ、ベストデモ賞を受賞した[*1]。それを機に製品化を目指し、首都大学のインダストリアルアート学科の馬場哲明教授および同研究室の学生達と協力し、外観を作り込むとともに、電子回路やバッテリーを全て内蔵してスタンドアロンで動作する巻き尺型デバイスを開発した（図 4.1(b–d)）。資金調達のため Kickstarter にてクラウドファンディングを行ったが、目標額に届かず失敗に終わった[*2]。その原因は多岐に渡るが、要因をデバイスに限ると、同プロトタイプを体験した以下のユーザのコメントが印象的であった。

- 「単体での見た目は格好良いが、装着すると変身ベルトみたいで恥ずかしい。」
- 「身体に接触させる糸が細くて絡まりそう／切れてしまいそうで使いづらそう。」

そこで服装に馴染みがあるベルト型デバイス（図 4.1(e, f)）を開発し、国際会議 SIGGRAPH ETech 2017 でデモ展示を行ったり [112] 一般ユーザに試用してもらったところ、以下のよう

[*1] http://eurohaptics2016.eurohaptics.org/

[*2] https://www.kickstarter.com/projects/469394403/hapbeat-wearable-body-speaker

なフィードバックを得た。

- 身体に巻き付けた後、締め付け具合をベルトの長さ調整などによって調節する必要があり、装着までの手間が多い。
- 厚手の服の上からでは振動伝達が弱まってしまうため、場合によっては服を脱いだり捲る手間も生じる。
- 常時身体を締め付けるため圧迫感が生じ、長時間の利用に向かない。

このような経緯で一般ユーザに使用してもらうには利便性と装着時の自然さ、快適さが最重要であると判断し、胴巻き付け型からの変更を決断した。本章では「車や電車の中といった日常的なモバイルシーンでの利用」を想定し、提案機構を用いたネックレス型デバイスの設計、実装および振動出力の評価を行う。

図 4.1　胴巻き付け型のプロトタイプ写真。(a) Euro Haptics 2016 でデモを行った巻き付け型（アクチュエーター部分のみ、別途駆動用アンプが必要）(b) (c) 巻き尺型の装着図。(d) 巻き尺型の側面図。(e) ベルト型。(f) ベルト型装着写真。

4.2　設計方針

日常的なモバイルシーンでの利用可能な、低周波振動を広範囲に伝達可能な装置の設計要件を以下に記し、詳細を以下の小節に記す。

(1)「基準値」（4.4.1 節で説明）を超える強度の低周波振動が広範囲に伝達可能なこと。
(2) 公共の空間で取り出して簡単に装着して使うことができること。

(3) 公共交通機関で利用しても問題が無い程度の音声ノイズであること。
(4) 使用時間の延長および発熱を抑えるため消費電力を極力少なくすること。

4.2.1 装置の形状

設計要件を満たす形状としてネックレス型を選択した。ネックレス型では首に吊るすだけでよく長さ調節の必要がないため、ベルト型の様に上着を脱いだりズボンのベルトを緩めたりといった更衣の必要が無く、公共の空間で取り出してすぐ装着できる。また振動伝達部である帯（4.3.1 で説明）が胸部から首の後ろにかけて接するため、広範囲への振動伝達が期待される。大きさと重さについて、一般的に首に吊るすデバイスとしてスマホネックストラップを基準とし、ネックレス部分はスマホよりも小さく、軽いことを要件とした。また駆動用回路ユニットは一般的な衣服のポケットに入るサイズとした。

4.2.2 音声ノイズの抑制

想定した利用シーンのうち、電車やバスなどの公共空間では他者の妨げとならないよう音声ノイズに配慮する必要がある。走行する電車やバス内の騒音レベルは 70–80dBA 程度であることが想定される [113, 114]。ISO9921:2003 によると 1 m 離れた位置での一般的な会話の騒音レベルが 60 dB 程度であるため、その値以下となることを目標とする。試作機を動作させたところ、音声ノイズ源は主に駆動部の摩擦音やモーターから生じる磁励音であることが分かった。そのため駆動部のガイドとして摩擦が少ないテフロンチューブを用いること、回路の入力段にローパスフィルタを実装することを提案する。

4.2.3 省電力化

デバイスの消費電力を軽減させることは、使用時間の長期化や発熱の低下に寄与し、装置の利便性の向上に重要である。3 章で使用した WTV は、糸を身体に巻き付けるための定常トルクを発生させるために直流（DC）をモーターに流し続けていたため、余計な消費電力が発生していた。この定常トルクはネックレス型装置でも、装着時に糸がボビンに巻かれている状態を維持し、適切な振動出力を実現するのに欠かせない。糸が全て繰り出された状態では、モーターシャフトが正転・逆転のいずれの場合にも糸の巻き取りが生じてしまい、入力された交流信号を正しく出力できない。例えば $\sin \omega t$ の交流信号を入力したとき出力される振動は $|\sin \omega t|$ となり、振幅が半分かつ波形が歪になる。我々は消費電力を少なくするため、直流を流す代わりにモーターのボビンにゴム紐を用いて定常トルクを発生させることを提案する。

4.3　実装

本節では提案手法で挙げた要件を満たす実装手法を（1）振動伝達部（2）定常トルク（3）駆動回路に分けて記す。実装した装置 Hapbeat の構造とその構成要素を図 4.2 に示す。筐体部の寸法は 55 × 58 × 15 mm、質量は 58.5 g であり、一般的なスマートフォンより小さく軽い。

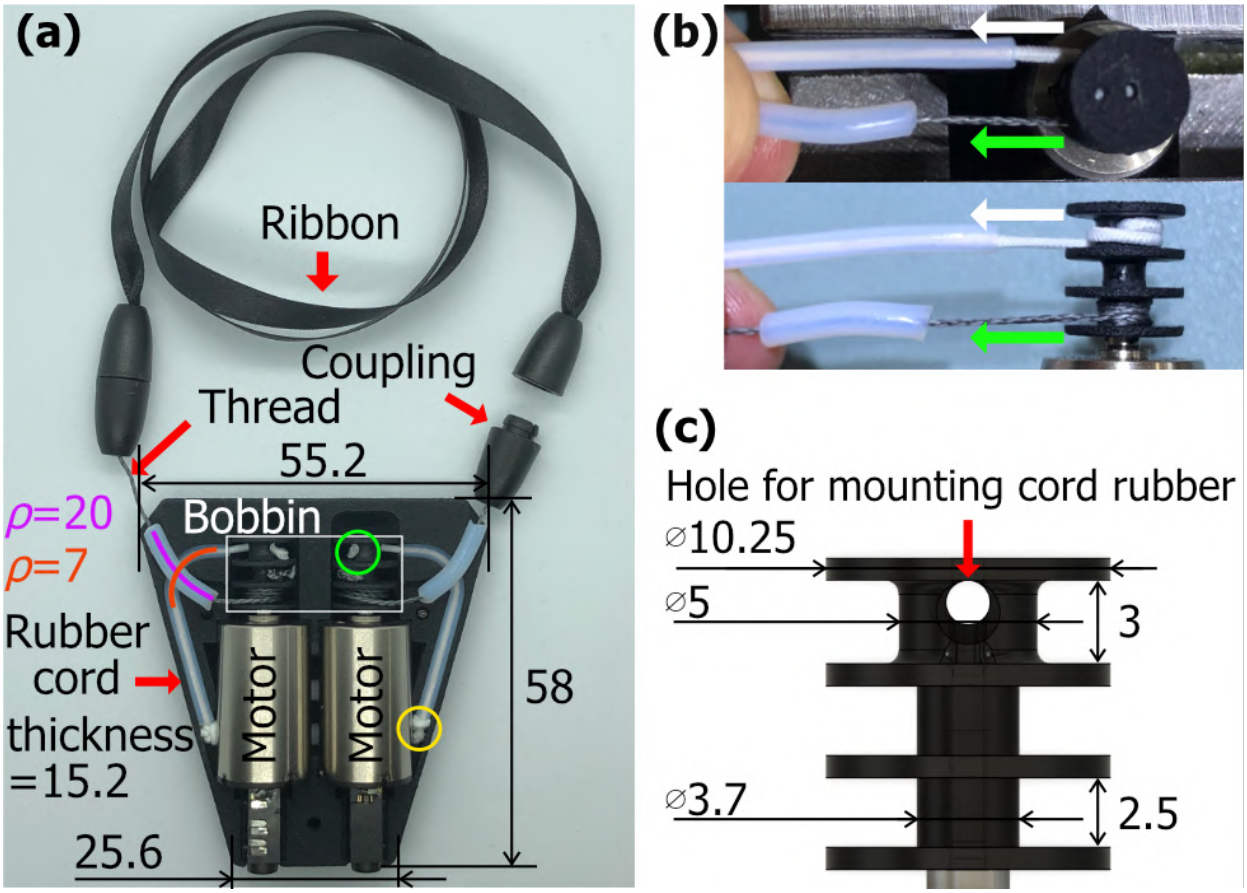

図 4.2　Hapbeat の構造の詳細。図中の数値の単位は全て mm。(a) 図中の ρ は糸が通っているチューブ（紫のライン）とゴムが通っているチューブ（赤のライン）の曲率半径を示す。(b) 図中の緑色の矢印は糸が繰り出されたときボビンにかかる張力の向きを示し、白色の矢印はその時ゴム紐がボビンに掛ける張力の向きを示す。(c) ボビンの寸法。

4.3.1　振動伝達部

3.3.1 節で記述した糸をそのまま体に接触させても問題無く振動を伝達できるが、糸が細く装着感が良くない。また皮膚に接触する部分は発汗などにより汚れるため、簡単に洗えるよう筐体部と分離できると便利である。そのため身体に接触する部分には剛性の高いサテンリボン

（幅 6 mm、ポリエステル 100%）を用い、プラスチック製の結合部品を用いて筐体から繰り出される糸と結合できるようにした。

筐体の内から外へ糸を繰り出すにあたり、繰り出し方向を変えるためのガイドが必要である（図 4.2 左）。このガイドは糸と常時接するため、摩耗や摩擦音を抑えるため低摩擦係数である必要がある。我々はそのガイドとしてテフロンチューブ (内径 1 mm、外形 3 mm、中興化成工業株式会社) を用いた。摩擦力を極力小さくする目的で、筐体を小型に保ちつつガイドの曲率を極力大きくした（図 4.2(a)）。

モーターは 3.3.1 節で記したように、入力された交流信号に応じて正転逆転を素早く繰り返す必要があるため、慣性モーメントが低いコアレスモーターである必要がある。本章で利用したコアレスモーターは次の特性を得るようにメーカーに発注した：定格 3 V、端子間抵抗 1.1 Ω、最大出力 1.92 W、手移動トルク 6.8 mNm、機械的時定数 10 ms、慣性モーメント 0.6 gcm^2、角加速度 110 $.10^3 rad/s^2$。

4.3.2 定常トルク機構

定常トルクを掛けるにあたり、バネ材として細さと高い伸び率を両立できるゴム紐（直径 1 mm、長さ約 36 mm、川村製紐工業株式会社）を利用した。このゴム紐の一端をボビンに、もう一端を筐体に固定されるガイドに固定することで、糸がボビンから繰り出される際に逆方向のトルクが生じる（図 4.2(b) 白矢印）。この実装のためフランジが 4 枚ある 3 段ボビンを設計した（図 4.2(c)）。この機構により装着時に糸が全て繰り出されるのを防ぐことができる。ゴム紐のガイドには糸のガイドと同じ素材のもの（内径 1.5 mm、外形 2.5 mm）を用い、ゴムチューブの曲率半径は 7 mm とした。

4.3.3 駆動回路設計

駆動回路は電池駆動を前提とし、音声信号入力でモーターを最大実効出力で駆動できるものであることが望ましい。一般的な 5 V 出力の USB 充電器で充電することを想定し、回路に用いる電池には回路構成がシンプルになる、1 セルのリチウムイオン電池（3.7 V）を採用した。入力された音声信号を増幅するのには D 級アンプ IC（PAM8403, Diodes Incorporated）を用いた。しかし本章で用いるモーター（定格 3 V、端子間抵抗 1.1 Ω）を最大実効出力（ 1.92 W）で駆動させためには最大 1.93 A の電流を流す必要があり、アンプ IC 単体では不可能である。そこで我々はアンプ IC の出力端子に FET (TPC8408、東芝デバイス&ストレージ株式会社) のゲート端子を接続した H ブリッジ回路を構成した。また 4.2.2 節で述べたノイズ対策として、アンプの入力段に RC ローパスフィルタ（C = 2.2 μF、R = 1 kΩ、カットオフ周波数 72 Hz）を設け、スライドスイッチでローパスフィルタの ON/OFF を切り替えられるようにした。実

装した回路図および周波数応答の図は付録に添付する。

4.4　評価

4.2 節・4.3 節で提案、実現した Hapbeat が、4.2 節冒頭に整理した要件を満たすことを評価するため次の実験を行った。4.4.2–4.4.3 節 では Hapbeat の装着者に伝わる振動を加速度センサを用いて測定した。目的は Hapbeat が張力式生成機構の特徴を継承しており、4.4.1 節で示す「基準値」を超える低周波振動が広範囲に伝達できていることを示すためである。また伝達振動の入力信号に対する忠実性を周波数成分から評価した。4.4.4–4.4.5 節 では消費電力を少なくするために 4.3.2 節にて実装した定常トルク機構の省電力化の効果およびこの機構によって副次的に発生してしまう内部摩擦力の影響を評価した。4.4.6 節 では Hapbeat が公共の交通機関で使用しても問題が無いか評価するため、Hapbeat から発せられる音声ノイズの測定およびローパスフィルタの効果を評価した。4.4.7–4.4.8 節 では、読者が張力式振動生成機構の利用を検討するための情報を提示することを目的とし、Hapbeat の周波数応答・応答速度を測定した。

4.4.1　伝達振動の基準値の定義

Hapbeat の体感音響効果が有用であると判断するために具体的にどの程度の振動振幅を身体に伝達すべきかを検討する。本章では体感音響を感じる状況の代表例として、クラブハウスのスピーカーの付近で音楽を聴いている場合を想定する。また、一般的に可聴域の下限とされる 20 Hz を「低周波」と定義する。クラブハウスでは最大 130 dB ほどの音圧が放射される [115]。Takahashi ら [116] の実験結果より、スピーカーから周波数 20 Hz、音圧 100/105/110 dB、のサイン波を再生したところ、それぞれの音量に対し参加者の胸部では約 80/85/90 dB の振動レベル（VAL）が測定された。これより、音圧が 130 dB 時は 110 dB の VAL に線形増加すると推測でき、胸部の体表面に垂直な 1 軸加速度の値は 20 Hz で最大 0.32 m/s^2 となる。この値を超えていればクラブハウスで体に伝わる空気伝播振動よりも強い振動が伝わることが推定されるため、0.32 m/s^2 を体感音響として十分な振動が伝搬できている「基準値」と定義する。

4.4.2　着用者上での振動伝達測定

実験参加者

実験参加者は男性 6 名であり、それぞれの参加者を sub-1、sub-2... のように表す。参加者の身長・体重・体脂肪率・Body Mass Index (BMI) の値を表 4.1 に掲載する。参加者の体重および体脂肪率は体組成計（innerScan Dual RD-802、株式会社タニタ）で測定した。

表 4.1 実験参加者の体格

	sub-1	sub-2	sub-3	sub-4	sub-5	sub-6
Height (cm)	185	160	164	165	178	174
Weight (kg)	61.8	47.3	52.4	56.8	61.1	74.1
BMI (kg/m^2)	18.1	18.5	19.5	20.9	19.3	24.5
body-fat (%)	12.1	12.3	16.9	18.7	18.8	24.3

測定点

測定箇所は図 4.3 のように、領域を胸部（Chest）、首側部（Neck-side）、項部（Nape）の 3 領域に分けて測定点を配置した。複数の参加者で振動伝達測定を行う際の必要十分な測定点を決定するため、予備実験として 1 人の参加者（sub-6）において図 4.3 の黒丸の箇所にて伝達振動を測定した。その結果を踏まえて選択した測定点を図 4.3 の黄色の点に示し、その選択理由を以下に記す。

- （全領域）帯近傍点を選択：伝達振動が大きく、知覚上重要と想定されるため。
- （胸部）右側を省略：左右とも距離に応じて減衰する傾向を持ち類似していたため。
- （胸部）鎖骨上の点を選択：Sakuragi ら [98] の報告のように骨伝導による振動伝達が生じるかを観察するため。
- （胸部）筐体に垂直な列を選択：筐体と帯からの伝達振動が合成される点を観察するため。
- （胸部）A・C から 4 cm 離れた点を選択：接触条件が異なる A と C からの減衰傾向を観察するため。
- （首側部・項部）中央列を選択：帯からの減衰傾向を観察するため。代表として中央列に限定。

入力信号および測定方法

ファンクションジェネレータ（FY6600-30, FeelTech）から入力した正弦波の電圧は、1 つのモーターの消費電力が 20 Hz で 0.5/1/2 W となるよう調整した。以後、信号の種類を、周波数-消費電力、と記し、例えば周波数 20 Hz、モーターの消費電力が 1 W となるよう振幅を調整した入力信号の場合、20Hz-1W とする。なお左右のモーターに入力される信号は同位相であり、それぞれのモーターは同時に糸の巻き取り・繰り出しを行う。

振動計測にはアナログ 3 軸加速度計（MMA7361LC, NXP Semiconductors、寸法：10×10 mm、質量：0.4 g）を用いた。測定値はオシロスコープ（MDO4024C, Tektronix Inc.）で記録し、サ

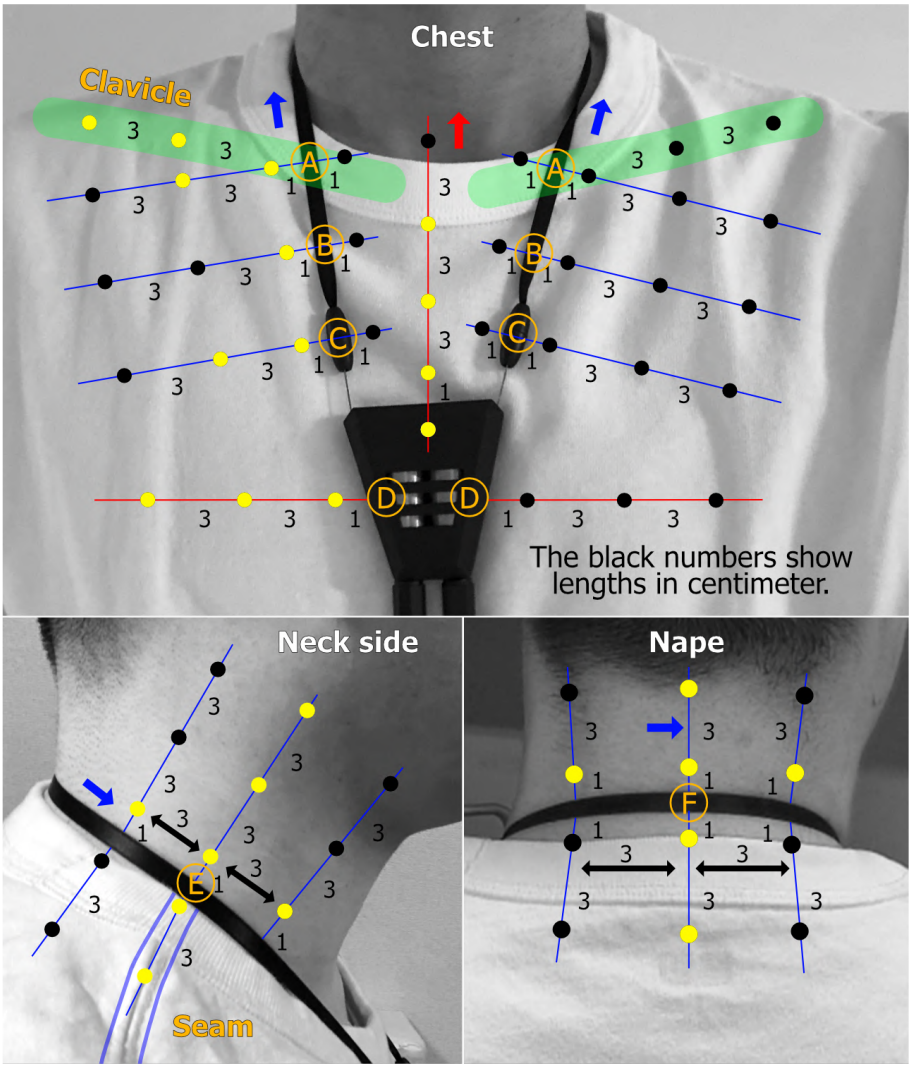

図 4.3　計測箇所の説明。予備実験で計測した計測点のうち、本実験で採用した測定点は黄色、それ以外の測定点は黒丸で示す。赤矢印は赤線上の測定点、青矢印は青線上の測定点での加速度センサの方向を示している。橙円で囲った文字は各列の基準点であり、以下の基準で決定した。A：リボンと鎖骨の接点、B：A と C の中間点、C：結合部品の中心、D：ハウジングの中間点、E：帯と縫い目延長線の交点、F：頸椎の中心（目視で決定）。

ンプリングレートは 10 kHz、測定時間は 1 秒とした。伝達振動の大きさの評価には、式 4.1 の a_{RMS} を用いた。「基準値」との比較には z 軸（体表面に垂直な方向）のみの加速度から RMS を算出した式 4.1 の z_{RMS} を用いる。

$$a_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{N}\left(|x_k - \mu_x|^2 + |y_k - \mu_y|^2 + |z_k - \mu_z|^2\right)} \tag{4.1}$$

$$z_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{N}(|z_k - \mu_z|^2)} \tag{4.2}$$

$$\mu_x = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{N} x_k \tag{4.3}$$

ここで x_n・y_n・z_n は各軸のサンプル（加速度の測定値）であり、$n = 10 \times 10^3$（記録するサンプル数)、式 4.3 は y 軸と z 軸で同様である。

衣服

Hapbeat の利用シーンである日常的な場面を想定し、T シャツ（U Crew Neck short-sleeved t-shirt、以下衣服は全て UNIQLO 製)、Y シャツ（men's 100% extra-fine cotton broadcloth long-sleeved shirt）および下着（AIRism Micro Mesh V-neck short-sleeved singlet 83% nylon and 17% spandex）を着用した状態で測定を行った。参加者の身長が 170 cm 以下は M サイズ、それ以上は L サイズを着用させた。

表 4.2 に T シャツと Y シャツの摩擦係数とヤング率を示す。摩擦係数は表面試験機（KES-FB4-A、カトーテック株式会社）を用いて測定した。20 × 20 cm の試験片を用意し、400 g の張力を加えて試験を 6 回行い、得られた結果から平均値を導出した。ヤング率は引張試験機（RTF-1250, A&D Company Limited）を用いて測定した。Tensile Test of Fabrics (JIS L 1096 Strip Method) に基づき、試験片を 50 × 300 mm 切り出し、つかみ間隔を 200 mm とし、T シャツは 5 回、Y シャツは 3 回測定しその平均値を算出した。

表 4.2　実験に使用した衣服の摩擦係数とヤング率

衣服	繊維方向	摩擦係数	ヤング率（N/mm^2）
T シャツ	縦	0.188	573
	横	0.203	546
Y シャツ	縦	0.179	17.6
	横	0.178	11.0

主観評価

参加者の主観的な振動知覚と a_{RMS} の大きさとの関係を検証するため、主観実験を行った。図 4.3 の説明用の数字や文字を省き、点を全て黒丸にした画像を用いて、各測定点上において、

- 集中しなくても振動が明確に感じられる箇所は赤丸
- 集中することで振動が微かに感じられる箇所は青丸

を記入させることで、主観的な振動知覚を評価した。主観実験中は常に該当の信号による振動を提示し続け、制限時間は設けず、参加者は十分に時間をかけて回答した。そのため参加者は長時間振動に曝されることになるが、Hapbeat を用いて音楽を聞く場合も長時間音楽振動に曝される、すなわち実用時の状況と同様であるため、順応や疲労効果が生じることを許容する。なお、参加者は振動によって生じる音声ノイズを聞いている状態であった。

実験手順

最初に測定点の位置と、実験中に Hapbeat の位置がずれても初期位置に戻せるよう装着時の筐体の輪郭を各衣服上に水性ペンで記入した。その後、加速度センサを測定点に両面テープ（AD&F WIG 両面ハードテープ、アデランス）で接着し、x 軸の正方向が図 4.3 の青・赤矢印の向きとなりセンサが体表に対して垂直になるよう、実験者がセンサ部から 20 cm 離れたケーブル部分を把持し、センサの姿勢を調整した。各測定点において、20Hz-0.5W・20Hz-1W・20Hz-2W の入力信号でそれぞれ 1 回ずつ測定を行い、その後別の測定点に加速度センサを取り付けた。この手順を各領域内（胸部・首側部・項部）の全測定点で連続的に繰り返した。測定時、参加者は椅子に座って上半身を座面に対して垂直にし、姿勢を正すため椅子の真後ろに固定されたオートポールに背中と頭を軽く押し付け、正面を見ながら息を吐いて止めた状態にするよう指示を受けた。領域単位で測定を一気に行い、終了後、次の領域に移行する合間に主観実験の実施および適宜休憩を挟んだ。これらを一連の手順とし、全ての参加者に対し T シャツ・Y シャツについてそれぞれ 1 回ずつ測定を行った。

実験結果

代表例として、20Hz-1W の結果図 4.4 に示す。なお、肌色以外の領域での測定結果は服上で測定したものであり、皮膚上での伝達振動を計測したものでないことに注意されたし。各信号での参加者間の z 軸（体表面と垂直）の加速度の RMS 最小平均値は両方の服を通して 20Hz-0.5W で 0.8 m/s^2、20Hz-1W で 1.2 m/s^2、20Hz-2W で 1.7 m/s^2 であった。

考察：定量評価

結果より全測定点において、4.4.1 節で導出した基準値 0.32 m/s^2 よりも z_{RMS} は大きい値となった。よって Hapbeat は張力式振動生成機構の特徴を維持しており、胸部からうなじまでの広範囲に 20 Hz の振動を十分な強度で伝達できていることが示された。また、a_{RMS} は首側部で最も大きかった。その理由として、首側部では胸部や項部よりも身体の接触部分の曲率が大きく、帯と身体との摩擦力が大きいことで帯から効率的に力が伝達されたと考えられる。鎖骨上に伝達された振動について、減衰の傾向は特に他の場所と変わらなかった。これは帯が鎖骨を十分に振動させられていなかったことや、測定箇所が服の上だったため骨伝導が計測結果に反映されなかった可能性が考えられる。

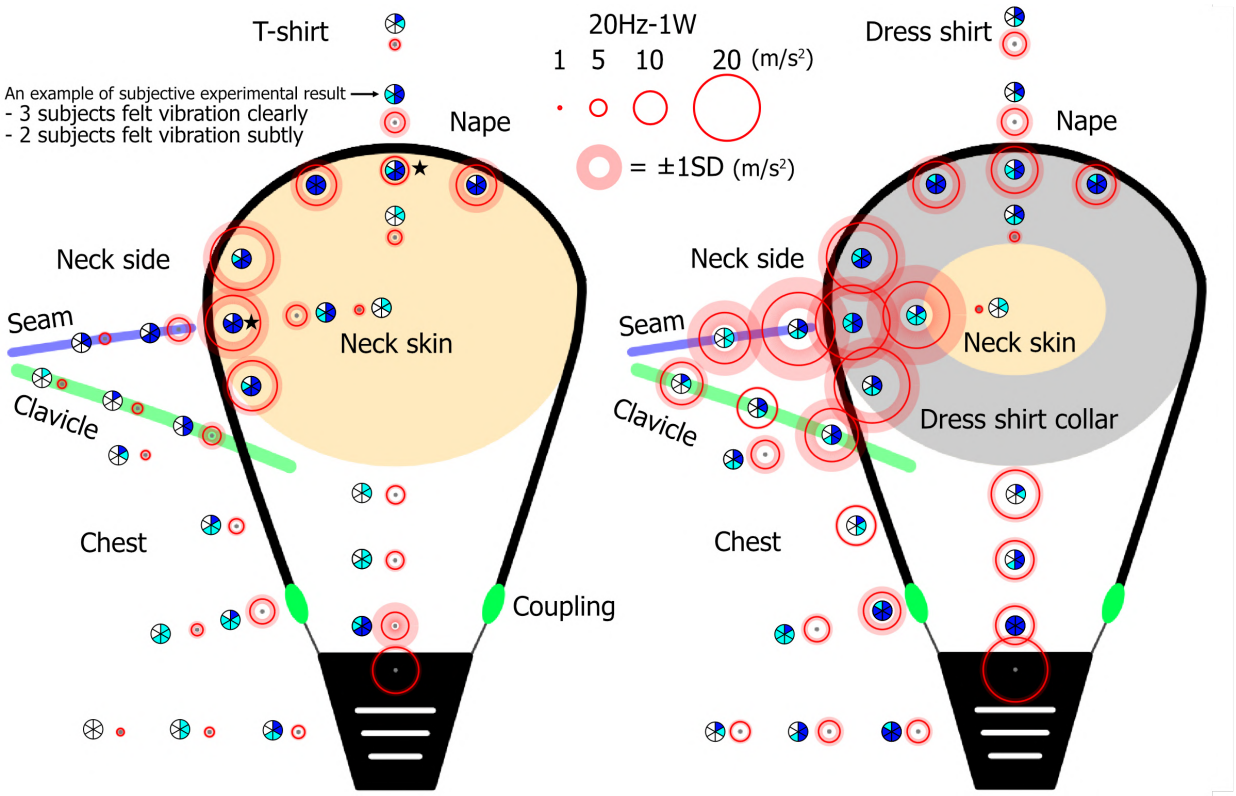

図 4.4　参加者へ伝達された振動の加算平均値（$n = 6$）と主観実験の結果。赤の実線は a_{RMS} の大きさ表し、赤い半透明の領域は標準偏差（±1SD）の範囲を示す。肌色の領域の測定結果は皮膚上で計測されたもの、灰色の領域は Y シャツの襟上、それ以外の領域での測定結果は服上で測定されたものを示す。各測定の位置、もしくは傍にある円グラフは主観実験の結果を示し、青が「明確に感じられた」と回答した人数、水色が「微かに感じられた」と回答した人数を示す。図中の青線は服の縫い目、緑線は鎖骨を示す。Hapbeat の線と帯の間の緑色の楕円は結合部品を示す。図中の星印は 4.4.3 節で注目した測定点を示す。

T シャツと Y シャツを比較すると、全体的に Y シャツの方が T シャツよりも a_{RMS} が大きい。これは今回用いた Y シャツの方が T シャツよりもヤング率が高く硬かったため、振動減衰が起こりにくかったことが推測される。また筐体自体の a_{RMS} も Y シャツの方が T シャツよりも大きかった。これは T シャツが柔らかいことによって、筐体が引っかかりその動きを妨げてしまったことが考えられ、このような現象は他の一般的な振動子を服上から装着する場合にも生じることが予想される。一方で Y シャツの首側部では帯近傍以外でのばらつきが特に大きかった。この領域は肩幅や胸部といった体型の差によって、着衣時の衣服の状態に個人差が出やすかったことが要因であると考えられる。

考察：主観評価

主観実験結果（図 4.4 中の円グラフ）より、首側部や項部の帯近傍では、ほとんどの参加者が振動を明確に知覚できていたことが示された。T シャツと Y シャツを比較すると、胸部の遠方点（帯や筐体から 4・7 cm 離れた点）では Y シャツの方が振動を知覚できている人が多く、明確に感じられている人の割合も多かった。これより、服自体が振動することで知覚的な振動強度が強まっていることが示唆された。

また、胸部の結合部品や筐体付近の近傍点では a_{RMS} の値が首側部や項部と比較して小さいにもかかわらず、ほとんどの参加者が振動を知覚できていた。これは結合部品が帯に比べて硬かったことが要因として考えられる。もう一つの要因として、筐体内での摩擦音や結合部品が身体とぶつかる音を主要素とする音声ノイズが考えられる（4.4.6 節参照）。参加者は実験中、その音声ノイズを聞いている状態にあり、聴覚が振動知覚に影響を及ぼした可能性がある [117, 118]。一方で、参加者は音声ノイズの発生源で無い遠方点でも皮膚表面の振動分布を回答できていることから、皮膚上の振動分布とその強弱を分類できる程度には伝達振動を知覚できていることが示されたといえる。

4.4.3　出力波形の忠実性の評価

身体に伝達された振動の周波数成分を高速フーリエ変換により求めた。使用するデータは前節で得られた首側部と項部の測定点（図 4.4 中、星印）の加速度データを元に、主成分分析により x・y・z の 3 軸を 1 軸に変換したものを利用した。周期的なピークサンプルを検出し、最初の 2 周期を抽出することで 1 周期の波形を得た。

実験結果

得られた結果のうち、代表例として高調波の割合が多かった参加者（首側部 sub-2、項部 sub-1）と少なかった参加者（いずれも sub-6）の波形および FFT の結果を図 4.5 に示す。

考察

いずれの場合も入力信号である 20 Hz の振動が皮膚へ伝達されていると同時にその高調波も出力されていた。図 4.5 中の sub-6 のように 20 Hz が主成分となる傾向は比較的体脂肪率が高い参加者に見られ、sub-1・sub-2 のように高調波が主成分となる傾向は比較的体脂肪率が低い参加者に見られた。本実験の参加者数では体脂肪率との相関を論じるには不十分であるが、参加者によって皮膚上に伝達された振動波形の主要な周波数帯が異なったことから、参加者の体格や体組成、または装着の状態によって刺激の知覚が異なる可能性が示唆された。

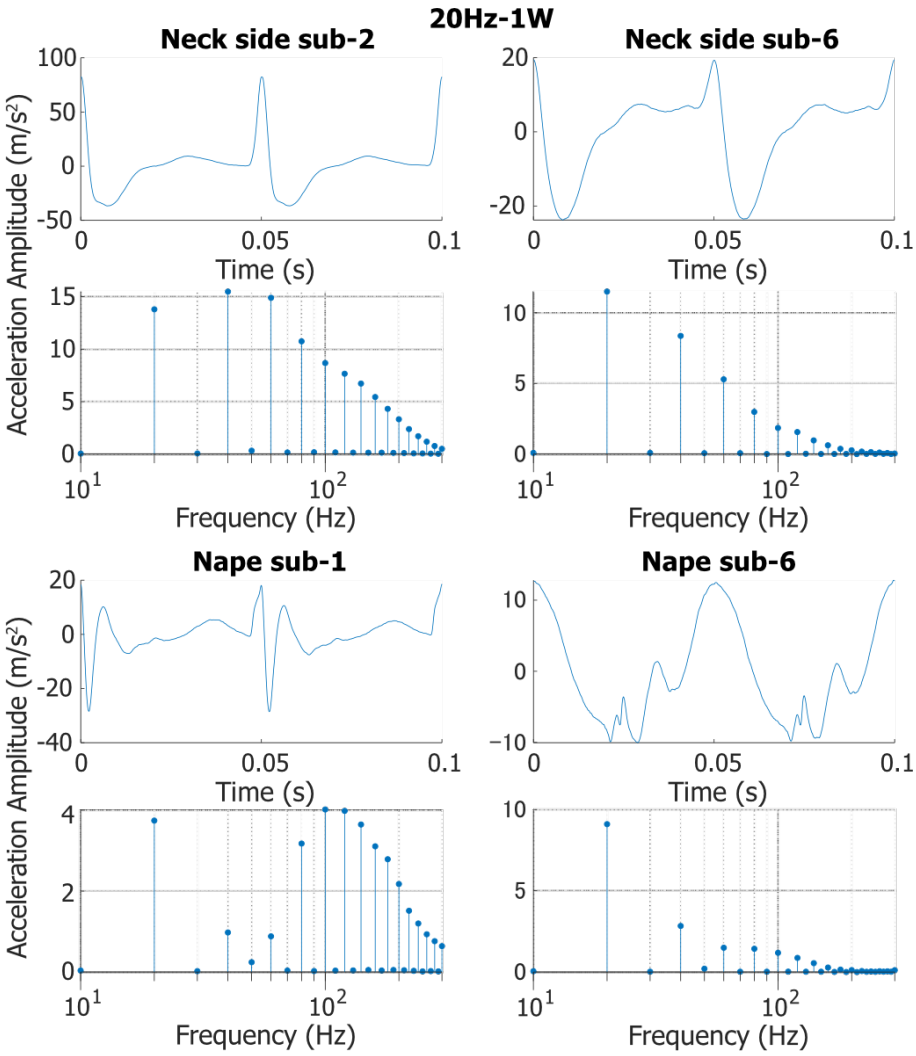

図 4.5　20Hz-1W 出力時の伝達振動の波形と周波数成分。四隅それぞれの上側のグラフは主成分分析により得られた加速度信号の波形、下側のグラフは、加速度信号の片側スペクトルの結果を示す。

4.4.4　定常トルク機構による省電力効果の検証

定常トルク機構による省電力効果を評価するため、Hapbeat で使用しているモーターに DC を印加して定常トルクを生じさせた場合における消費電力を測定した。今回の実験では筐体から取り外したモーターを使用し、そのボビンには糸のみが取り付けられていた。ボビンで糸を 3 周巻き、糸先をデジタルフォースゲージ（FPG-5、日本電産シンポ株式会社）に取り付けた。電圧の印加および電流値の計測には安定化電源（PW18-1.8Q, Kenwood TMI Corp.）を用いた。今回の実装では筐体質量が 58.5 g で一つのモーターに約 0.3 N の張力によるトルクがかかることが想定されるため、この値を測定対象とした。測定開始時の印加電圧は 0 V とし、そこか

ら印加電圧を徐々に増加させ、デジタルフォースゲージが 0.3 N を示したときの電源装置に表示される電流値（分解能は 0.01 A）を記録した。この測定を 5 回行った。

実験結果

Hapbeat のモーターで定常トルクを生成するため DC 電圧を印加すると、全ての測定でモーターには 0.32 A の電流が流れた。すなわち、定常トルク機構は Hapbeat の使用時、消費電力をモーター 1 つにつき常時 0.11 W（モーターの抵抗 1.1 Ω、オームの法則 $P = RI^2$ より計算）削減するのに貢献することとなる。

4.4.5　始動電流の比較

図 4.2(a) に示されるように、筐体を小型化かつネックレス形状で組み込むにあたり、ボビンから繰り出される糸やゴム紐の方向を変化させたことで生じるガイドとの静止摩擦力によって、駆動開始時に糸の動きが妨げられてしまうことが想定される。その摩擦力による影響を調査するため、Hapbeat（実装済み）と、モーター・ボビン・糸のみの状態（組込前）とで、いずれの場合も 1 つのモーターのみを駆動し、始動電流値を測定した。始動電流の定義は Hapbeat の場合、吊り下げた状態で電流値を上げていき、糸が初めて動いた時の電流値とし、組込前の状態の場合、静止状態から軸が回り始めた時に流れていた電流値とした。糸の動きを検知するために、Hapbeat をフックに吊り下げた状態で駆動したモーター側の結合部品に加速度センサを両面テープで接着し、その出力をオシロスコープに表示した状態で実験を行った。電圧の印加および電流の測定は 4.4.4 節と同様の電源装置を使用した。

実験結果

10 回測定した結果、DC モーターの始動電流はいずれも 0.01 A、Hapbeat の始動電流は平均 0.55 A（標準編差 0.02 A）となった。Hapbeat の場合に抵抗 1.1 Ωのモーター両端に印加される電圧は、オームの法則より 0.61 V である。この結果より、静止状態から Hapbeat を駆動するためには、駆動回路は 0.55 A より大きな電流を流せる必要があり、モーター端子へは 0.61 V より大きい振幅を持つ信号を入力する必要があることが示された。なお、ここでの具体値は個体差が生じることが想定されるが、本研究では個体差について議論しない。

4.4.6　音声ノイズの測定

4.4.2 節で用いた T シャツを着た sub-6 が Hapbeat を身に着けた状態で、静かな室内（LAeq = 38 dBA）で Hapbeat から生じる騒音を測定した。測定には騒音計（GM1356, Shenzhen Wintact Electronics Co., Ltd.）を用い、筐体と同じ高さで 15 cm 離れた位置に設置した。入力信号には

ファンクションジェネレーターによって生成された、E12 系列の値に基づく周波数（3.2.1 節参照）の正弦波を、振幅がモーターでの消費電力が 1 W となるように調整したものを用いた。各入力信号で A 特性で 20 秒間測定し、その平均の音圧レベルを求め、ISO 1996-1:1982 に基づき暗騒音補正を行った。測定はローパスフィルタを適用した場合とそうでない場合それぞれ行ったが、ローパスフィルタを適用した場合はそのカットオフ周波数より大きい 82 Hz 以上の周波数の場合のみ行い、入力信号の振幅はローパスフィルタが無い場合と同様とした。

実験結果

測定を行った結果の騒音レベルを図 4.6 に示す。発生した音の種類は定性的に以下の通りであった。

- 1–3.3 Hz：結合部品と筐体との衝突音および筐体と衣服の衣擦れ音。
- 3.9–82 Hz：筐体が上下運動をする際に筐体から生じるガチャガチャとした音。
- 100–1000 Hz：モーターから生じる磁励音（入力信号をスピーカーで鳴らした場合と同じ音）。

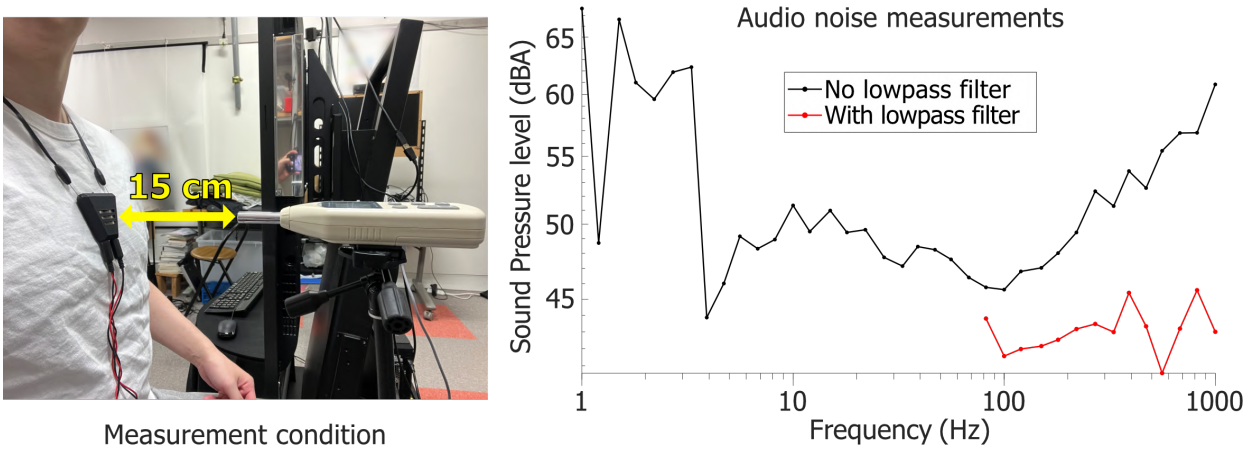

図 4.6　音声ノイズ測定の条件（左）と結果（右）

考察

結果より Hapbeat から発生される音声ノイズはローパスフィルタを用いることで 50 dBA 未満となることが示された。公共交通機関内の騒音レベルが 70–80 dBA 程度であることを考慮すると、Hapbeat の音響ノイズはそのような場面で使用するのに問題が無い可能性が高い。ローパスフィルタを使用する場合、100 Hz 以降の入力信号情報が損なわれてしまうが、この帯域では Hapbeat の振動出力が下がる（図 4.7 右）。また Merchel らの実験により、音楽振動にローパスフィルタを掛けた方が主観的な音楽鑑賞体験の評価が向上することが示されている

[42]。そのためローパスフィルタをかけることによる音楽振動を提示した時の主観的な影響については更なる検証が必要ではあるが、上述の理由よりその影響は小さいか、あるいはポジティブな影響を及ぼすことが推測される。また 1–3.3 Hz で大きく発生していたノイズは筐体の素材や設計を改修することで抑制することが可能だが、一般的な音楽では用いられない帯域であるので、今回の用途では無視できる。

装着者への影響については、想定した利用シーンではヘッドホンやイヤホンで音楽を聞いているため、今回測定した筐体から発生する音声ノイズについては無視できることが考えられる。一方で、今回の実験方法では骨伝導のような参加者の体内を介した音声ノイズの評価はできていない。この音声ノイズが知覚可能かは検証を要するが、Sakuragi らの実験により鎖骨への音楽振動提示は体験に好影響を及ぼすことが示されているため [98] 体験に悪影響を及ぼす可能性は低いと推測できる。

4.4.7　周波数応答の測定

Hapbeat の周波数応答を、マネキンとゲルシートを用いた再現可能な方法で測定した。実験環境を図 4.7(c–f) に示し、詳細を以下に記す。

- マネキンの 3D データには AIST/HQL 人体寸法・形状データベース 2003[119] の「haf020.obj」を使用した。
- 作成方法は図 4.7 のようにモデルを分割してそれぞれを印刷（素材：Z-PLA Pro、積層板厚：0.29 mm、インフィル：10% 六角形）したのち、厚さ 1 mm の両面テープで貼り合わせた。
- ゲルシート（H0-3K、EXSEAL 社製）は片面が粘着質、もう片面はウレタンフィルムで覆われた非粘着質のものである。50 × 500 mm と 230 × 290 mm のサイズでカットし、前者はマネキンの首周りに、後者は胸元にそれぞれ粘着質の面をマネキンに接着させた。

測定は、筐体（図 4.7(d)）・胸部（同図 (c)）・首側部（同図 (f)）・項部（同図 (e)）の 4 箇所に対し、1 か所ずつ測定を行った。1000 Hz までを測定するにあたり、周波数帯域が広い加速度センサ（ADXL354C, Analog Devices, Inc. 寸法：18x12.7 mm、重さ：1 g）を用いた。加速度センサを Hapbeat のリボンや筐体に直接両面テープで貼り付け、センサに繋がっているケーブルを、センサから 20 cm 離れた部分をマネキンにテープで貼り付け固定した。使用する信号は 4.4.6 節で用いた入力信号と同様の周波数・振幅のものを用いた。

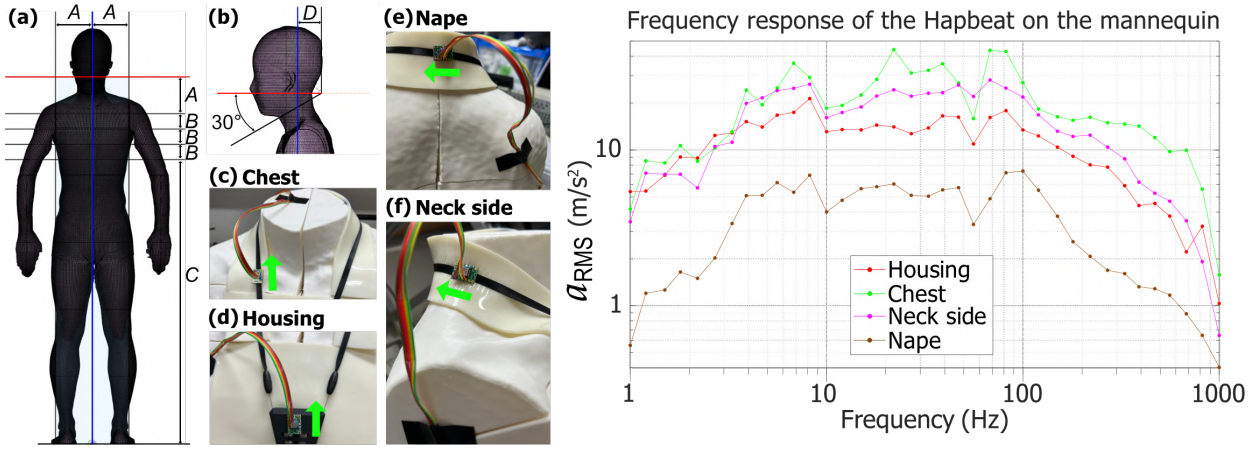

図 4.7　周波数応答測定。左：マネキンの作成に必要な図面情報 (a, b)、マネキンを用いた測定条件 (c–f)。(a, b) のアルファベットは寸法を示し、A = 150 mm, B = 62.5 mm, C = 1100 mm, D = 70 mm である。また (a) の赤線・青線と (b) のそれはそれぞれ対応している。(c)–(f) の緑矢印は加速度センサの x 軸の向きを示す。右：加速度測定結果。

実験結果

結果を図 4.6 右に示す。10 m/s^2 より大きい周波数範囲は、筐体で 2.2–150 Hz、胸部で 2.2–470 Hz, 首側部で 2.2–270 Hz であったが、項部で測定した a_{RMS} は 10 m/s^2 を超えることはなかった。

4.4.8　応答時間の測定

Hapbeat の応答時間を導出するため、Hapbeat にステップ電圧を印加したときの帯の張力変化を力センサ（208C01, PCB Piezotronics, Inc.）で測定した。測定では Hapbeat を力センサの先端に取り付けたフックにぶら下げた状態で行った。ステップ電圧の印加は 1.2 V の単三電池を 2 本直列に入れた電池ボックスの電源を入れることで行った。測定データを正規化するために、ステップ電圧をかける前の張力と電圧の値を 0、入力後の定常状態（電圧の変動が 0.1 V/s 以内の状態を示す）の平均値を 1 とし、入力電圧が 0.9 を超えてから張力値が 0.9 を超えるまでに要した時間を応答時間とした（図 4.8 中、赤矢印）。

実験結果

試験を 10 回行い結果を加算平均で導出したところ、平均 2.74 ms、最大 3.00 ms であった。例として応答時間が平均値に近かった 6 回目の測定結果を図 4.8 に示す。

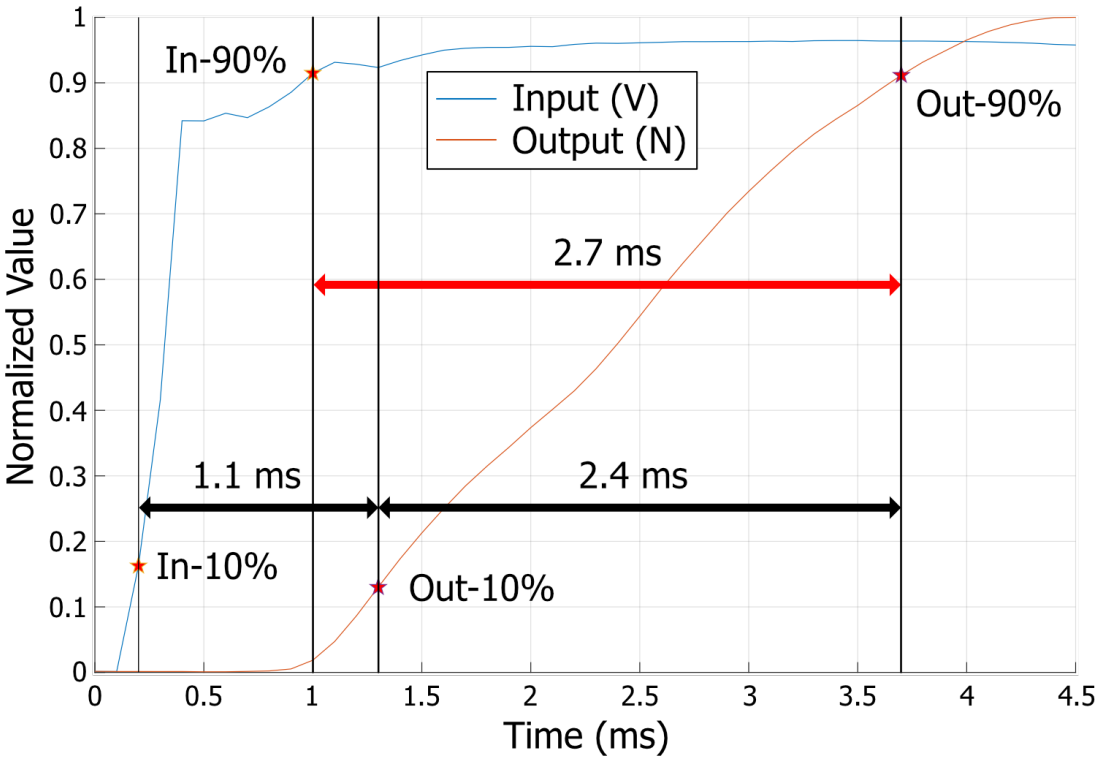

図 4.8　応答時間の測定結果の一例（6 回目の測定）。

4.5　全体の考察

実験結果より、我々は先行研究で提案した振動生成機構の特徴を維持したまま、日常的なモバイル環境で利用できる装置が作成できることを示した。Hapbeat は首にかけるだけで簡単に 5 秒程度で装着可能でバッテリー駆動であり、音楽用途で Hapbeat が発する音声ノイズはローパスフィルタを用いることで 50 dBA 未満となるため利便性は良好である。

体感音響に重要な低周波の振動伝達能力も高く、胸部から首周りにかけて 130 dB の音圧から伝わる空気伝播振動よりも高振幅と推定される強度で 20 Hz の振動を伝達することが可能である。また低周波以外の帯域についても 470 Hz までは大きく減衰せず、応答速度は 2.74 ms とコアレスモーター単体の場合や直動型振動子と遜色がない [96]。これより音楽における低周波域を広くカバーでき、ドラム音などの瞬間的な入力信号に対しても遅延少なく応答できることから、体感音響装置として高い性能を有している。

4.5.1 Limitation

一方で Hapbeat が現実の体感音響体験を忠実に再現しているとは言い難い。帯近傍では基準値を大幅に上回る 10 m/s^2 以上の大きさの振動が伝達されてしまう。そのため帯近傍で振動が強く知覚され、実際の音楽体験とは異なる。また、この基準値は体表に伝わる空気伝播振動との比較には役立つが、実際の体験を忠実に再現するには床などから伝わる固体伝播振動や体内外の圧力差による感覚も考慮する必要がある。そのため、提案装置による体験と実際のクラブハウスでの体験とを直接比較することはできないが、このような現実と異なる振動提示は体験の迫力や楽しさなどのポジティブな要素に貢献する可能性は十分に考えられるため、伝達振動の大きさと体感音響体験の質の関係について調査が必要である。

また Hapbeat による低周波帯の出力振動には高調波が多く含まれており、入力信号の再現性が悪い。Hapbeat は吊り下げ式であるため、糸繰り出し時の筐体の加速度が重力加速度を超えることはない。これより、糸が巻き取られる向きにモーターシャフトが回転する電圧を正とした場合、負の入力信号は出力電圧に反映されない場合がある。また 4.4.5 節で示されたように、筐体内部の糸やゴム紐とテフロンチューブ間の静止摩擦の影響のため、これらの現象から Hapbeat への入力信号は次の場合のみ出力として反映されこととなる：電圧が正の時はモーター出力が内部の静止摩擦より大きくなる場合のみ、電圧が負の場合はそれに加え、繰り出し時の筐体加速度が重力加速度よりも小さい場合のみ。そのため Hapbeat からの振動波形は図 4.5 に示されるように、高調波が含まれる結果となってしまう。実際の利用シーンでは閾値よりも十分に大きい振動が伝達されるため、ユーザがこの高調波をどの程度感じ取れるかは定かではなく、調査が必要である。

今回の実験では着衣部分の皮膚表面への伝達振動を直接測定することが出来なかった。我々は加速度センサを服の裏に潜りこませて皮膚に貼る方法や、衣服に加速度センサ大の穴を開け露出した皮膚に貼る方法を検討したが、いずれも実際に服を着た状態とは皮膚と服の接触状態が大きく異なってしまうため、その方法を選択しなかった。そのため本章の結果からでは着衣部分の皮膚に振動が伝達されていることを断言することはできないが、主観実験の結果から、遠方点でも振動を知覚できた参加者がいること、また服の種類によって結果に差があることから、参加者は振動する衣服から振動を感じていることが推察され、少なくとも知覚できる程度の振動が皮膚に伝わっていることが示唆された。今後、着衣状態における皮膚表面への伝達振動の適切な測定方法を検討することで、衣服の上から装着する振動提示装置の評価に貢献することが考えられる。

4.6　4 章のまとめ

本章では 3 章で提案した張力式振動生成機構を利用して、日常的なモバイルシーンでも利用可能な体感音響装置の設計要件を示し、ネックレス型体感音響装置 Hapbeat を開発した。Hapbeat は小型軽量で装着が容易ながらも、低周波振動を広範囲に伝達できることが実験から示されたことで、従来の体感音響装置では困難であった、利便性と低周波の振動伝達能力を両立した装置の実現が可能であることを示すことができた。本章により、モーターと糸を用いた張力式振動生成機構の設計・実装方法の一例を示したことで、ネックレス型に限らず多様な形態の装置の開発に貢献することが期待される。

第 5 章

体感音響による 2 次元音像定位

本章では、4 章で提案したネックレス型装置の使用を前提に、体感音響を用いて立体音響のような音像定位が可能であることを示すことを目的とする。その評価のため具体的に「初めての訪問地でも音楽を聞きながら目的地まで歩いてたどり着きたい場面」を想定し、歩行中でも体感音響で音楽鑑賞体験を向上させつつ、体感音響による音像定位で目的地までのナビゲーションが可能であることを実験にて示す。

5.1　背景：音楽鑑賞とナビゲーションの両立

初めての訪問地では、歩行者はスマホのナビゲーションアプリを使用することが想定される。そうしたアプリケーションでは、歩行中に画面を見なくても目的地にたどり着けるよう、音声によるガイド機能が備わっているものが多い。しかしそうしたガイド音声は音楽鑑賞を妨げる要因となり、音楽を聞きながら目的地までたどり着きたいシチュエーションには適さない。こうした背景から、ナビゲーションによって音楽鑑賞が邪魔されないよう、研究者は聞いている音楽を変調させることで目的地までの方向を伝達する手法を提案している [120, 121, 122, 123, 124]。これらの先行研究により、音楽の定位変調は音声ガイドと同程度のナビゲーション能力を発揮できることが示されている。

これらの手法は基本的に左右の音量差を調整することで音像定位の手がかりとしており、2 自由度があれば触覚刺激でも利用可能なことが考えられる。我々が 4 章で提案した Hapbeat は 2 つのモーターを内蔵し左右別々に駆動することが可能であり、先行研究で提案された方法を用いることが可能である。本章ではこうした背景から、目的地までの方向や距離に応じて変調させた音楽振動を Hapbeat で提示することで、体感音響による音楽鑑賞の体験向上と、ナビゲーションを両立して実現することが可能であると着想し、それを示すため以下の仮説を検証する。

- H1：音楽振動のステレオバランスを変調することでナビゲーションを成立させるのに十分な情報を伝えられる
- H2：歩行中の音楽振動提示は音楽鑑賞体験の向上に寄与する。
- H3：歩行中の音楽振動提示は従来の音楽変調による方向提示を妨げない。
- H4：音声を変調するよりも音楽振動を定位させた場合の方が音楽鑑賞体験として好まれる。
- H5：距離情報を振動強度変調で表現することでナビゲーションがより分かりやすくなる。
- H6：距離情報を振動強度変調で表現すると、強度を変調しない場合よりも音楽鑑賞に悪影響を及ぼす。

5.2　関連研究：非視覚的な位置情報提示

歩行中に端末の画面を見ることは安全性の観点から様々な問題を引き起こすため、視覚の代わりに音声や触覚を用いるナビゲーション手法が数多く提案されてきた。

5.2.1　音声（音楽）変調によるナビゲーション

音声によるナビゲーションとして普及しているのは Google Maps に代表されるような、言語的発話によるガイド音声を用いたものである。この手法はトレーニングの必要が無く、詳細な情報を伝えることが可能だが、言語処理が必要となるため、ユーザーが認知的負荷の高いタスクを行っている場合に適していない [125]。Holland ら [126] は認知的負荷が少ない音声ナビゲーション AudioGPS を提案した。AudioGPS では、短い楽器音をナビゲーションキューとして利用し、左右の音量差で方向を、音声を再生する間隔で距離を提示することで、参加者を直感的に目的地に導くことに成功している。

これ以降、音声によるナビゲーション手法をより自然な形で日常生活の中で利用できるよう、音楽を変調させる手法が提案されている。Strachan ら [127] は音楽のステレオバランスを変調させることで目的地までの方向を、音量を変調させることで距離を提示するビーコン誘導システム GpsTune を提案し、Jones ら [120] が類似システム ONTRACK を作成し詳細なユーザー評価を行っている。Jones らの報告によると、目的地に対して 30°の分解能で方向を提示したところ、約 9 割の参加者が ONTRACK のみのナビゲーションで目的地までたどり着くことが出来ていた。一方で音量変調による距離の表現は、連続的な音量の変化が分かりづらかったこと、楽曲の構造や終了時のフェードアウトによって距離と無関係に音量が変化してしまうことによって上手く行かなかったことが報告された。また Yamano ら [121] は音楽の左右の位相差を変調して方向提示を行う EyeSound を提案している。この手法により 45°の分解能で

80% 以上の正答率での方向提示が可能であることを示している（ナビゲーション応用の評価はされていない）。

これらの研究は音楽変調によりナビゲーションが可能であることを示すものであるが、一方で音楽鑑賞体験が自然かどうかについての議論はされていない。特に音楽全体をパンニング（左右の音量差を変化させること）させてしまう方法はターゲットが自分の真横の方向にある場合、必然的に左右の音量差が大きくなり、音楽の感じ方に影響を及ぼす [128]。そこで Heller ら [123] は、より自然に音楽鑑賞を行えるナビゲーション手法として、ボーカルやドラムなど音楽の特定のトラックのみをパンニングさせる方法（Navigatone）を提案した。彼らは初めにその評価のため、実験参加者の前方では 15°、後方では　45°の分解能でランダムに配置された音源を特定する実験を行ったところ、音源の位置とその両隣を正解とした場合（つまり誤差 30°以内）　Navigatone の正答率は 86%、従来のパンニング手法では 90% であることを報告している。また参加者のインタビューから、ほぼすべての参加者が Navigatone の方が音楽を楽しく聞くことが出来た、と回答していたことを報告している。彼らはその後の研究 [124] で現実での歩行におけるナビゲーション実験を行い、Navigatone（[124] では Attracktion と名付けているが同様の手法）と従来の音声によるターンバイターン方式の指示を比較し、経路効率・エラー・精神的負担の観点から同程度の性能を有していることを報告している。しかしこの手法では距離情報の伝達は行っていない。

5.2.2 触覚刺激による 2 次元位置情報提示

触覚刺激を活用したナビゲーションや方向提示に関して数多くの研究が報告されている。その中でも偏心モーターや直動型振動子を用いた振動子アレイを搭載した触覚デバイスを身体に密着させ、駆動させる振動子の位置や振動パターンで方向や距離を伝達させる手法が多く、様々な提示部位で提案されている [129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136] 。この手法の利点は振動刺激を空間的に分布させることで 2 次元情報を直感的に伝えることができることである。また単一の振動子を用いたものでは、使用者が目的の方向を向いた時のみ振動を ON ／ OFF する提示手法 [137, 138] や、音声と振動パターンを組み合わせることにより距離と方向を提示する手法がある [139]。これらの手法の利点は一般的なスマートフォンで利用でき、特別な装置を必要としない点である。振動子を用いた以外の方法では、温冷覚による提示 [140]、皮膚の伸展による力覚提示 [141]、デバイスの形状変化 [142, 143, 144]、牽引錯覚（pseudo-attraction force）[145]、を利用したものが存在し、いずれも直感的に方向提示が可能であることが示されている。ただし我々の知る限り、触覚ナビゲーションと音楽鑑賞体験の向上の両立を主眼とした研究は確認されていない。

5.3　変調手法

ターゲットとプレイヤーの位置関係を取得するにあたり、図 5.1(a) に示すような頭部を基準とした極座標系を用いる。実際の音像定位と同様、ヘッドトラッキングで頭の向きを常時取

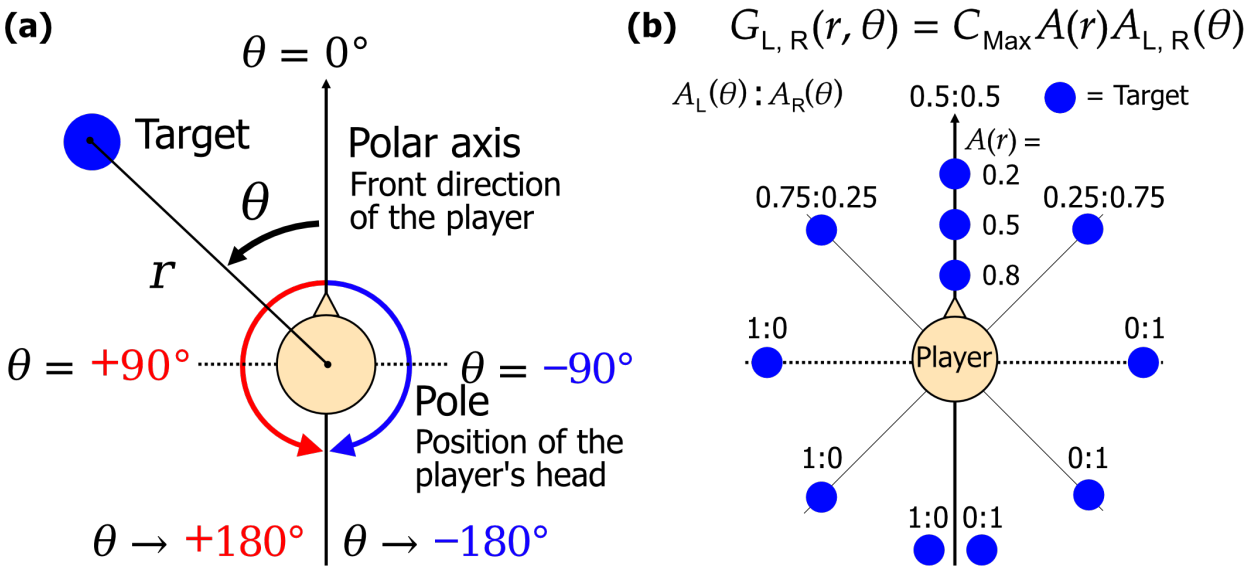

図 5.1　(a) 変調手法で用いる極座標系。(b) 具体的な変調例。

得し、その向きからターゲット（すなわち目的地）への角度（図 5.1(a) 中 θ）によって音楽振動を連続的に変調させる。方向の提示は分かりやすさを重視し、Jones ら [120] の方法を参考に音楽振動全体をステレオパンニングすることで行う（式 5.2, 5.3）。距離の提示はユーザーがターゲットに近づくにつれ線形に増加させることで行う。ただし、距離が大きくなりすぎた場合に両側からの振動振幅が 0 にならないように、距離に応じた場合分けを行う（式 5.4）。以上より、最終的な左右の振動量は式 5.1 によって得られ、距離や方向に応じて $G_{\mathrm{L,R}}$ は 0 から C_{Max} までの値をとる。その具体的な変調例を図 5.1(b) に示す。

$$G_{\mathrm{L,R}}(r,\theta) = C_{\mathrm{Max}} A_{\mathrm{L,R}}(\theta) A(r) \tag{5.1}$$

$$A_{\mathrm{L}}(\theta) = \begin{cases} 0 & (-180^\circ \le \theta \le -90^\circ) \\ \frac{90^\circ+\theta}{180^\circ} & (-90^\circ \le \theta \le 90^\circ) \\ 1 & (90^\circ \le \theta \le 180^\circ) \end{cases} \tag{5.2}$$

$$A_{\mathrm{R}}(\theta) = \begin{cases} 1 & (-180^\circ \le \theta \le -90^\circ) \\ \frac{90^\circ-\theta}{180^\circ} & (-90^\circ \le \theta \le 90^\circ) \\ 0 & (90^\circ \le \theta \le 180^\circ) \end{cases} \tag{5.3}$$

$$A(r) = \begin{cases} 1 - \alpha r & \left(0 \leq r \leq \frac{1}{\alpha}\left(1 - \frac{C_{\mathrm{Min}}}{C_{\mathrm{Max}}}\right)\right) \\ \frac{C_{\mathrm{Min}}}{C_{\mathrm{Max}}} & \left(\frac{1}{\alpha}\left(1 - \frac{C_{\mathrm{Min}}}{C_{\mathrm{Max}}}\right) \leq r\right) \end{cases} \tag{5.4}$$

ここで r はユーザーからターゲットまでの距離、θ はユーザーの正面からターゲットまでの方位角 (deg) を示す。α は任意の実数であり、これと C_{Min}・C_{Max} により、距離による振動変調が行われる範囲が決定される。なお、この手法で変調されるのは音楽振動だけであり、音声は変調されない。

5.4 評価

5.1 節で示した仮説を検証するために次の実験を行った。実験 1（5.4.2 節）では [H2] を検証する目的で、足踏み時の音楽鑑賞時に Hapbeat で音楽振動を提示することによる鑑賞体験への影響をアンケートを用いて調査を行った。実験 2（5.4.3 節）では [H1] を検証する目的で、バーチャル環境内で音楽振動変調による正面同定精度（deg）を評価した。実験 3（5.4.4 節）では [H1]–[H6] を検証するため、バーチャル環境内で 4 種類の位置情報提示手法を用いたナビゲーションタスクを実行し、行動ログ・主観的なナビゲーションの分かりやすさ・鑑賞体験の評価について調査した。なお音楽鑑賞体験の評価については、3.1.1 節に記したように、体感音響の貢献度が高いことが想定される「グルーヴ感」を評価する。

5.4.1 実験条件

実験参加者

聴覚に障害のない 24 名（[男性：女性] = [18：6 人]、[20：30：40 代] = [21:1:2 人]）が、本章で示す実験を連続して行った。参加者は実験開始前に研究倫理に基づく同意書に同意し、1500 円の謝礼金を受け取った。1 人当たりの実験時間は 1.5–2 時間程度であった。以後、各参加者に実験を実施した順番に番号を付け（par 1, 2, ...）のように記す。

音楽刺激

音楽刺激として、マルチトラックで入手可能な、Phoenix の「Lisztomaniz」(track-A) と「Countdown」(track-B) を利用した。マルチトラックのうち、声が入ったトラック群をまとめて Vox トラック、それ以外の楽器やエフェクトが含まれたトラック群をまとめて Inst トラックとし、その波形とスペクトログラムを 図 5.2 示す。両曲ともボーカル・ギター・ベース・ドラムを含んだオーソドックスな楽器構成であり、Hapbeat で音楽振動を体感するのに十分な低音域を含んでいる。ラウドネスの単位として、楽曲のノーマライズで一般にもちいられる、Recommendation ITU-R BS.1770 [146] にて定義された loudness units relative to full scale（LUFS、[146] 中では LKFS と表記）を用いる。2 つの曲を比較すると、track-A はドラムト

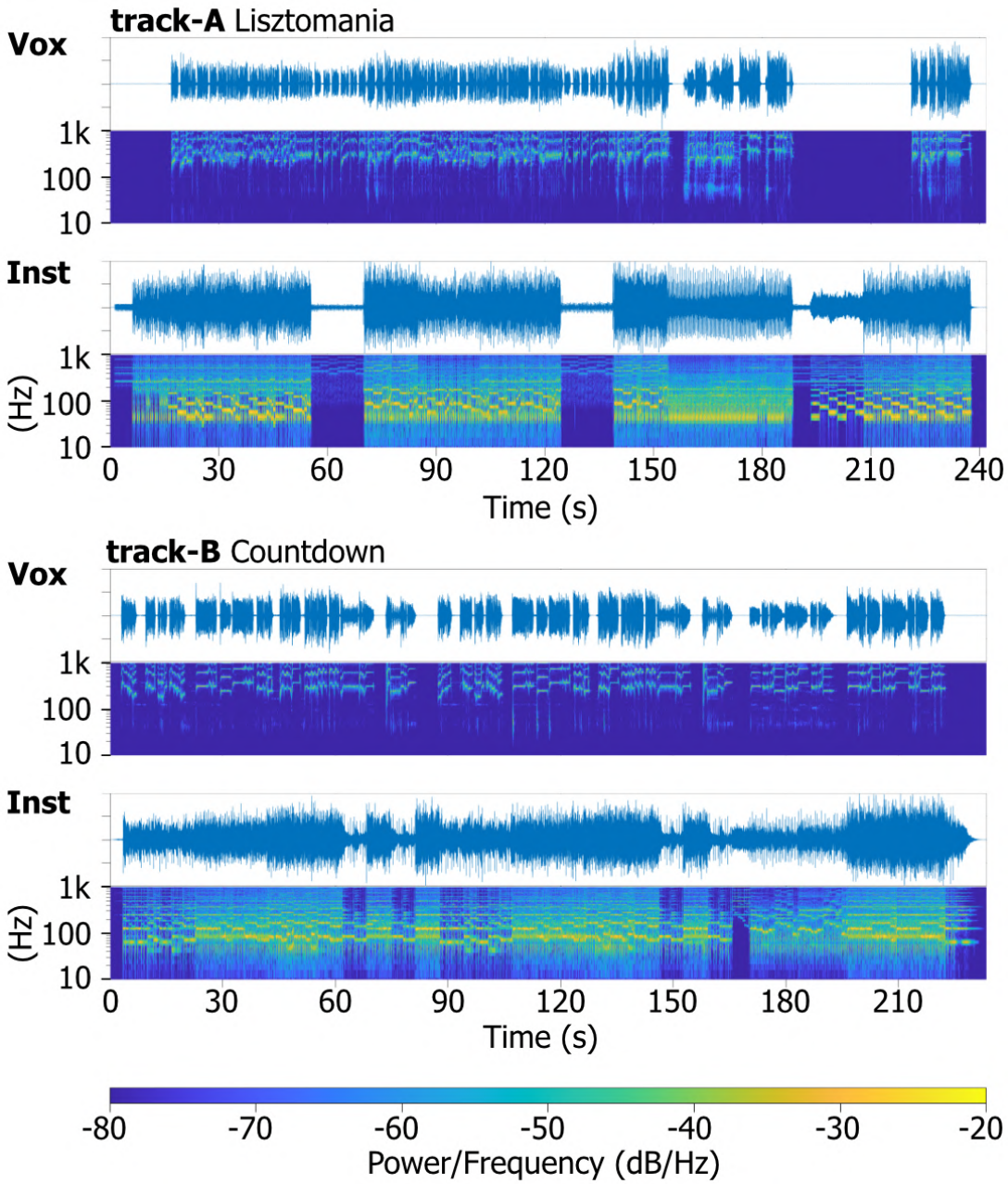

図 5.2　音楽刺激として使用した楽曲（Vox・Inst トラック）の波形とスペクトログラム。波形の縦軸は振幅（-1.0–1.0）、スペクトログラムの縦軸は周波数（Hz）を示す。グラフの横軸は楽曲の再生時間（s）を示す。短時間フーリエ変換はサンプル数 8192、50% のハミング窓で計算された。

ラックのラウドネス（−18.9 LUFS）と、ベーストラックのラウドネス（−18.4 LUFS）は同程度であるが、track-B はドラムトラックのラウドネス（−22.6 LUFS）、ベーストラックのラウドネスに比べて低い（−19.7 LUFS）。そのため 2 つの楽曲を比較した場合、Hapbeat での再生時には track-A では track-B よりもバスドラムのリズミカルかつ衝撃感のある振動が強調され

のに対し、track-B では track-A よりもベースの連続的な振動が強調される。なお、上記のラウドネス測定は無編集のトラックを対象に行っている。また、track-A では Vox・Inst トラック共に信号が無い時間帯が track-B に比べると長時間存在しているのも特徴である。

Vox・Inst トラックの平均 LUFS がそれぞれ –14 となるようにノーマライズし、それらを重ね合わせたものを Mix トラックとして、それらをそれぞれ mp3 形式（192 kbps）で出力した。ラウドネスの測定および調整にはラウドネスメーターの VST プラグイン（TBProAudio、dpMeter5[*1]）を波形編集ソフトの Audacity[*2] と組み合わせて使用した。

聴取条件

音楽振動の提示には Hapbeat を用いる。本手法は外出時に使用することを想定しているため、音楽を再生するヘッドホンには小型軽量なもの（ATH-S100、株式会社オーディオテクニカ）を選択し、イヤーマフを用いるなど特別に周囲からの騒音を遮断する措置は取らなかった。すなわち参加者は Hapbeat から生じる音声ノイズが聞こえ得る状況であったが、後述の実験 1 の後に音声ノイズについて質問したところ、音声ノイズが気になったと感じたのは 1 名（par 5）だけであった。

実験で使用する音声のボリュームを決定するため、参加者は始めにスピーカーから再生される約 80 dBA (± 2 dBA)[*3]、440 Hz の正弦波の音を聞き、その音の大きさを基準としてヘッドホンから聞こえる 440 Hz の正弦波の音が同じくらいとなるよう、実験用アプリケーションのボリューム値（0–1）を調整した。調整は静かな部屋（40 ± 2 dBA）で参加者が座った状態で行われ、スピーカーは参加者の頭部位置から約 1 m、おおよそ同じ高さとなる場所に設置した（誤差は ± 20 cm 未満）。こうして決定した音声ボリュームは、実験 1–3 の全ての条件で共通である。

Hapbeat からの振動の大きさについては、実験用アプリケーションのボリューム値が 0.5 の場合に、80 Hz の正弦波を印加した場合のモーターの消費電力が 1 W となるよう、オーディオ用アンプ（AT-HA2、株式会社オーディオテクニカ）を用いて調整した。伝達振動振幅の大きさを調べるため、各参加者が Hapbeat を装着した状態で、4.4.2 節で用いた加速度センサとオシロスコープを用い、サンプリングレート 10 kHz でリボン上の加速度を測定した。加速度センサは両面テープでリボンに貼り付けられ、測定箇所は首の両側面の曲率が大きい箇所、および項の中央部を目視で決定した。参加者 24 名の測定結果の平均値 ±1SD (m/s^2) は、[Left：Nape：Right] = [42.5±7.4：11.6±3.4：43.9±11.0] となった。参加者は全員襟が無い服を着用しており、Hapbeat のリボンは首の皮膚に直接触れていた。

実験 1 と実験 3 では歩行時に身体に伝わる振動の影響を考慮し、参加者が足踏みをした状態

[*1] https://www.tbproaudio.de/products/dpmeter

[*2] https://www.audacityteam.org/

[*3] 4.4.6 節で用いた騒音計を参加者の頭部位置に設置して測定

で実験を行った。足裏の状態を統一するため、実験中はサンダル（Crocs Classic Clog）を参加者に履かせた。床にはコンクリートに厚さ 6 mm のタイルカーペットが敷いてあった。

ハードウェア

本実験で使用するアプリケーションは、制作にゲームエンジンの Unity (version 2020.3.22f1) を用い、実行にゲーミングラップトップ（CPU: AMD Ryzen™ 4000、RAM: 16 GB、GPU: Radeon™ 5500M）を用いた。ディスプレイには、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）Meta Quest2（Meta Platforms, Inc.）をラップトップとワイヤレス接続（Oculus Air Link を使用）し、音声・振動用の信号出力には 4 チャンネルの出力が可能なオーディオインターフェース（UMC404HD, Behringer）を使用した。

統計的仮説検定

本章での仮説検定では正規性が無いことを 1 標本コルモゴロフ・スミルノフ検定を行い確認した上で、対応のあるデータ（同一の参加者での実験条件間による評価の差分）については、有意水準 $\alpha = 0.05$ で「2 群間の代表値に差が無い」という帰無仮説を立てウィルコクソンの符号順位検定を行った。対応のないデータ（比較対象となるデータが異なる参加者のもの）の比較については有意水準 $\alpha = 0.05$ で「2 群間の代表値が同じである」という帰無仮説を立て、ウィルコクソンの順位和検定を行った。統計処理ソフトウェアには MATLAB R2022a を用いた。

5.4.2　実験 1：歩行時の Hapbeat による音楽鑑賞体験

ヘッドホンで音楽を聞く場合（headphone 条件）と、ヘッドホンに加えて Hapbeat を使用して音楽を聞いた場合（Hapbeat 条件）における音楽鑑賞体験の違いを調査するため、アンケート評価を行った。参加者は 2 つのグループに分けられ、それぞれのグループごとに track-A か track-B のいずれか 1 曲を割り当て聴取させた。ここで鑑賞していない方の楽曲は 5.4.3、5.4.4 節の実験で利用する。また、順序効果を考慮し、半数の参加者は headphone 条件から Hapbeat 条件の順で実験を行い、もう半数は逆順で実験を行った。

アンケート

アンケート項目はグルーヴ感の評価に適した質問事項を調査した Oliver ら [94] の研究結果で有用とされた以下の 6 問について、記載した順番通りに 7 段階のリッカート尺度で各条件ごとに回答させた。リッカート尺度には各回答値に次の説明が記されていた：0—strongly disagree, 1—disagree, 2—slightly disagree, 3—neither/nor, 4—slightly agree, 5—agree, 6—strongly agree.

- Q1: This music evokes the sensation of wanting to move some part of my body.
- Q2: This music is good for dancing.
- Q3: I cannot sit still while listening to this music.
- Q4: Listening to this music gives me pleasure.
- Q5: I like listening to this music.
- Q6: This music makes me feel good.

なお、Hapbeat 条件の場合には設問中の「music」を、振動を含めた「listening experience」と捉えるよう参加者に指示した。また参加者は、2 番目の条件を聴いた後でも、1 番目の条件の答えを編集することができることを指示された。

実験手順

初めに参加者にヘッドホンと Hapbeat を装着し、参加者には音楽鑑賞中その場で足踏みを行うよう指示した。次に割り当てられた楽曲を 1 曲を通して headphone 条件もしくは Hapbeat 条件で鑑賞させ、アンケートに回答させた。次に同じ曲について、もう片方の条件で鑑賞させ、再びアンケートに回答させた。

実験結果

各参加者の Hapbeat 条件と headphone 条件のアンケート結果の差分を図 5.3 に示す。各設問ごとの差分データ (n = 24) についてウィルコクソンの符号順位検定を行ったところ、全ての設問で有意差が見られた。また track-A、track-B を聞いた 2 つのグループ間で、各設問ごとにウィルコクソンの順位和検定を行ったところ全ての設問で有意差が見られなかった。

5.4.3 実験 2：首への変調された音楽振動刺激による方向精度

評価対象

5.3 節で提案した音楽振動変調（$f(r) = 1$ とした場合）による正面同定精度（deg）を評価した。正面同定精度に着目したのは、以下に記す先行研究より、参加者が頭を動かすことでターゲットへの方向を定位することがナビゲーションにおいて重要であると判断したためである。Jones ら [120] の報告により、ステレオパンニング方式の変調の場合、ユーザーが音源の方向を探す際、極座標の原点となる携帯端末（ユーザーの頭に相当）の向き変えながら正しい方向（左右の音量が等しくなる方向）を探索していたことが報告されている。Heller ら [147] は、頭を回すことが耳によるナビゲーション（音源の定位）の鍵となることも報告している。方向提示手法の評価として、参加者の向きを変えずにターゲットの位置を回答させる方法も考えられるが、上述の報告により、この方法による位置特定はナビゲーションにおいてはあまり実践的

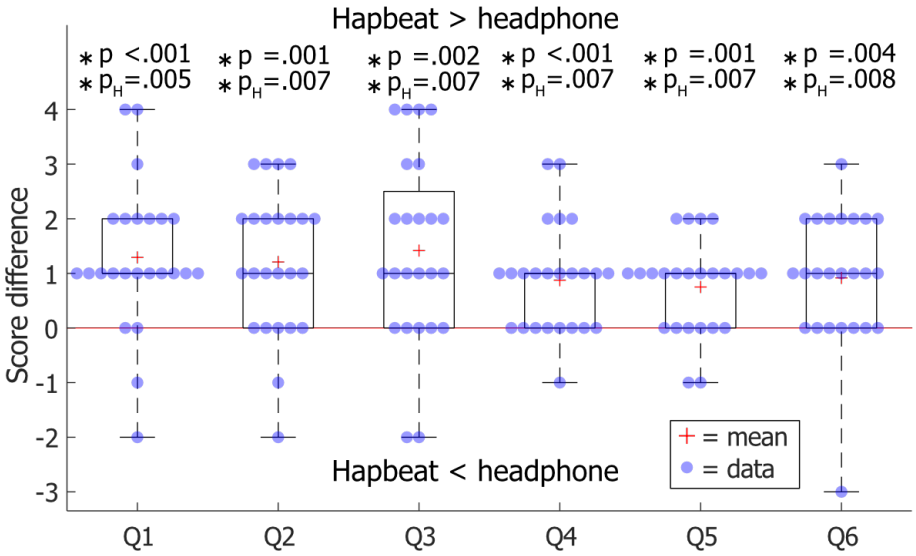

図 5.3　実験 1 におけるアンケート結果の得点差。得点差は各参加者の得点について、Hapbeat 条件の得点から headphone 条件の得点を引いて計算される。

ではないと判断し、本章では評価しなかった。

実験用バーチャル環境

本実験では参加者の身体的な動きに基づいて音楽振動変調を行いたかったため、HMD を用いバーチャル環境内で実験を行った。バーチャル環境の様子を 図 5.4(b) に示す。バーチャル環境内の参加者の正面は HMD の向き、すなわち現実の参加者の顔が向いている方向と同期している。実験は次の 3 ステップで進行する。

1. ターゲットが参加者の位置を中心とした、半径 2 m の円周上（無段階）にランダムに配置される。なお、図 5.4(a) は実験でのターゲットの配置を示したものではなく、参加者への説明のためにターゲットの位置を 45°刻みで示したものである。
2. 参加者は変調された音楽の振動を頼りに、顔（頭だけ、または体全体を動かして）を回転させ、透明なターゲットを探す。
3. コントローラーのグリップボタンを 1 秒間押し続け、参加者が正面と判断した方向を記録する。

ここで上記の 3 ステップを本実験における 1 回の「試行」とし、楽曲が終了するまで試行を繰り返した。つまり参加者間で実験を行う時間は統一されるが、各参加者の合計試行回数はそれぞれの回答に要する時間に依存するため、参加者ごとに異なる。参加者は実験を開始する前に、上記試行をチュートリアルにて練習した。チュートリアル中、ターゲットは青いスフィアとして参加者の目線の高さに表示され、参加者は自分の顔の向きとターゲットとの位置関係を

確認しながら、音楽振動がどのように変調されるかを学習した。

各参加者は実験 1 で聴いた楽曲を次のチュートリアルで使用し、別の楽曲を実験で使用した（例：実験 1 で track-A を聴いた参加者は、track-A でチュートリアルを行い、track-B で実験を実施する）。実験中、参加者が向いている方向とターゲットへの方向の誤差（図 5.1(a) 中の θ）、および経過時間を、回答時および約 33 ms 間隔で常時記録した。

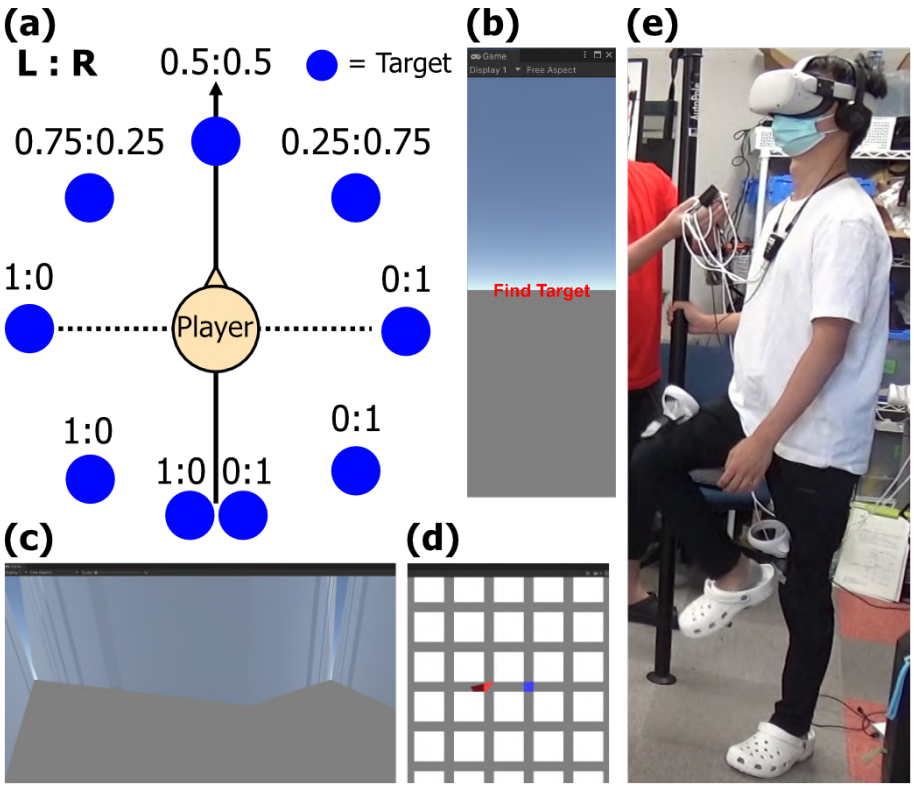

図 5.4　(a) 実験 2 で参加者に振動がどのように変化したかを説明するのに用いた図。図中の比率は、Hapbeat の帯の左右の振動振幅の比率を示す。なお、この図のターゲットの位置は説明をわかりやすくするためであり、実験でのターゲットの配置を示すものでは無い。実験中ではターゲットはプレイヤーを中心とした半径 2 m の円周上（無段階）に同時に 1 つだけ存在する。(b) 実験 2 のバーチャル環境。(c) 実験 3 のバーチャル環境。(d) (c) の状態の時の俯瞰図。(e) 実験 3 の参加者の様子。

実験手順

始めに図 5.4(a) を用いて音楽振動変調方法について口頭で説明を行い、本実験ではターゲットが正面にある場合、すなわち左右の帯の振動が等しくなる方向を向いた時に回答するよう指示した。次に参加者は立位状態で HMD を被り、チュートリアルを行った。参加者が振動の変調方法および上述した試行の実行方法を十分に理解できたことを確認し、回答の速さよりも正確性を重視するように指示した上で、実験を開始した。実験時間は楽曲の再生開始から終了ま

でであり、実験中参加者は試行を繰り返し行った。

実験結果

全試行データおよび、各参加者の平均誤差を平均した値 (n = 24) を図 5.5 に示す。なお、図中の黒枠で囲まれたデータは次の理由で平均値の計算から除外されている。

- *1：参加者が直立不動かつ短期間（3 秒以下）で回答が記録されていたので、操作ミスと判断した。
- *2：回答直前で首を左右に小刻みに動かしていたため、参加者は真後ろのターゲットを正面にあると勘違いした、と判断した。

また各参加者ごとに誤差が 30° 以下となる回答の割合を求め（操作ミスである*1 のみ除外）、それらの平均を取ったところ、全体で 89%、track-A は 85%、track-B は 92% となった。また 1 回の試行に要した時間の平均は全体で 21.1 ± 8.3 s、track-A は 22.0 ± 10.2 s、track-B は 20.3 ± 6.3 s であった。これらについて track 間で有意差は見られなかった（30° 以下の割合について p = .167、要した時間について p = .795）。

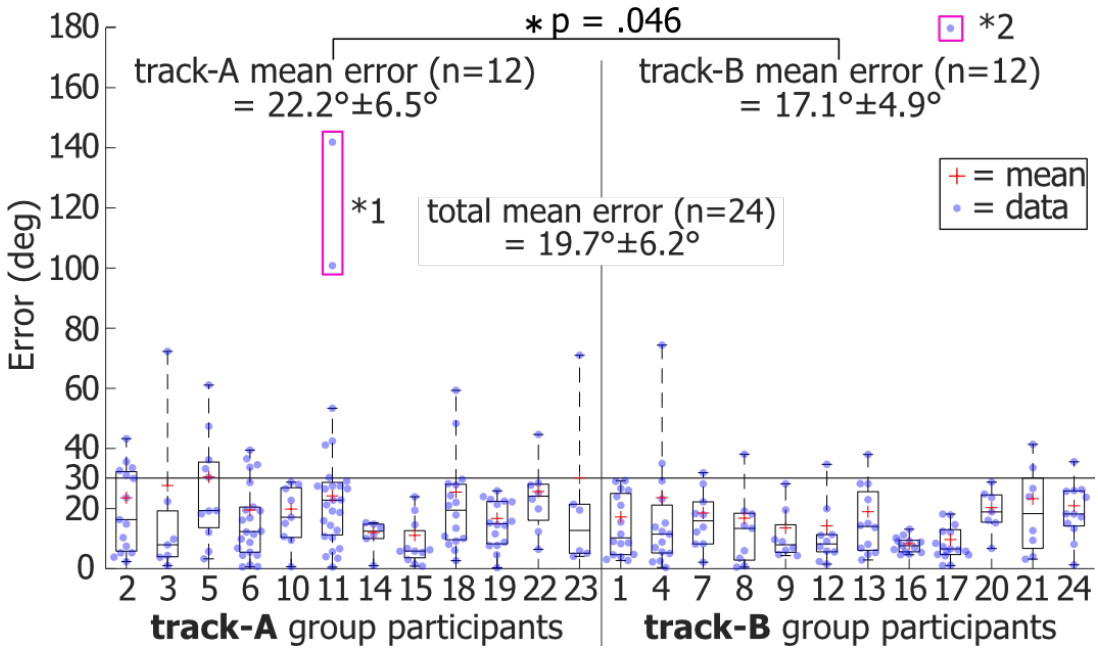

図 5.5　実験 2 の結果。マゼンタ色の枠で囲ったデータポイントは平均値の計算から除外されている。

5.4.4 実験 3：歩行時のナビゲーション能力の評価

提示条件

本実験では表 5.1 と以下に記す 4 種類の提示条件で行った。

- NavigaTone（NT）：Vox トラックのみをターゲットへの方向に定位させた音楽を再生する。この手法は先行研究 [123, 124] に基づいており、空間音響レンダリングには、同研究で使用されていた Resonance Audio framework [148] を利用した。
- NT&Hap：NT 条件に加えて、変調無しの音楽振動を提示する。すなわち、位置情報提示は NT 条件同様、聴覚のみである。
- HapDir：式 5.4 に基づき変調した音楽振動を参加者に刺激すると同時に、変調無しの音楽を再生する。ただし、距離による変調は行わない（式 5.4 $f(r) = 1$）。
- HapDirDist：式 5.4 に基づき変調した音楽振動を参加者に刺激すると同時に、変調無しの音楽を再生する。全ての参加者において、$C_{\mathrm{Max}} = 0.5$、$C_{\mathrm{Min}} = 0.1$ とし、その他は HapDir 条件と同様であった。

表 5.1　実験 3 提示条件まとめ

提示条件	音声	振動
NT	Vox を方向に応じて変調	提示しない
NT&Hap	Vox を方向に応じて変調	変調無し
HapDir	変調無し	方向に応じて変調
HapDirDist	変調無し	方向と距離に応じて変調

それぞれの条件は [H1]–[H5] の仮説検証を目的としており、[H1]・[H4] の検証のため、NT 条件と HapDir 条件を比較、[H2]・[H3] の検証のため NT 条件と NT&Hap 条件を比較、[H5] の検証のため、HapDir 条件と HapDirDist 条件を比較する。これらのうち、本章で最も重要である [H1] の検証を優先して NT 条件と HapDir 条件とで順序効果を考慮し、参加者を NT・HapDir・NT&Hap・HapDirDist の順に実験を行うグループと、HapDir・NT・HapDirDist・NT&Hap の順で実験を行うグループに分けた。

実験用バーチャル環境

本実験では 5.4.3 節と同様、HMD を用いてバーチャル環境内で行った。実験参加者の様子や歩く環境を図 5.4 に、バーチャル環境の詳細を図 5.6 に示す。この実験では、参加者がバーチャル環境内に配置されたターゲットに歩いて到達するまでの流れを 1 回の「試行」とする。実験が始まると、ターゲットはバーチャル環境の原点（プレイヤーの初期位置）を基準に、図

5.6 左中の水色の正方形の位置のうち、ランダムな場所に配置される。参加者がターゲットに接触すると到着と見なされ、到着を示すキュー（Navigatone・NT&Hap 条件の場合、ピコン音、HapDir・HapDirDist 条件の場合、1 秒間の 10 Hz の正弦波振動）が再生される。その後ターゲットはそのターゲットの位置を基準として、上述と同様にランダムに再配置される。

参加者は足踏みを行うことで前進することができ、進みたい方向に顔を向けることで方向を変えることができる。足踏み動作の検出には HMD コントローラーを用い、コントローラーを膝の上の太ももにゴム製ベルトを用いて固定した。歩行動作の検出方法は、立位時のコントローラーの位置を基準とし、コントローラーの高さが一定値（本章では +10 cm）を超え、一定値よりも高さが下回った場合を、バーチャル環境内での一歩とした。その都度バーチャル環境内の参加者の位置を 0.7 秒間で 1.17 m 前進させた（約 100 m/min）。

チュートリアルでは参加者はまずバーチャル環境内での歩行を練習するため、障害物がない環境で可視化されたターゲット（青い四角柱として表示）まで数回移動した。次に図 5.4 に示した、障害物がある環境で歩く練習をした。最後に実験条件の提示手法および到着を示すキューを体験させ、参加者が実験条件を十分に理解するまで学習した。チュートリアルおよび実験に使用された楽曲は実験 2 と同様である（5.4.3 節）。実験中、参加者の座標および経過時間を、到着時および約 33 ms 間隔で常時記録した。

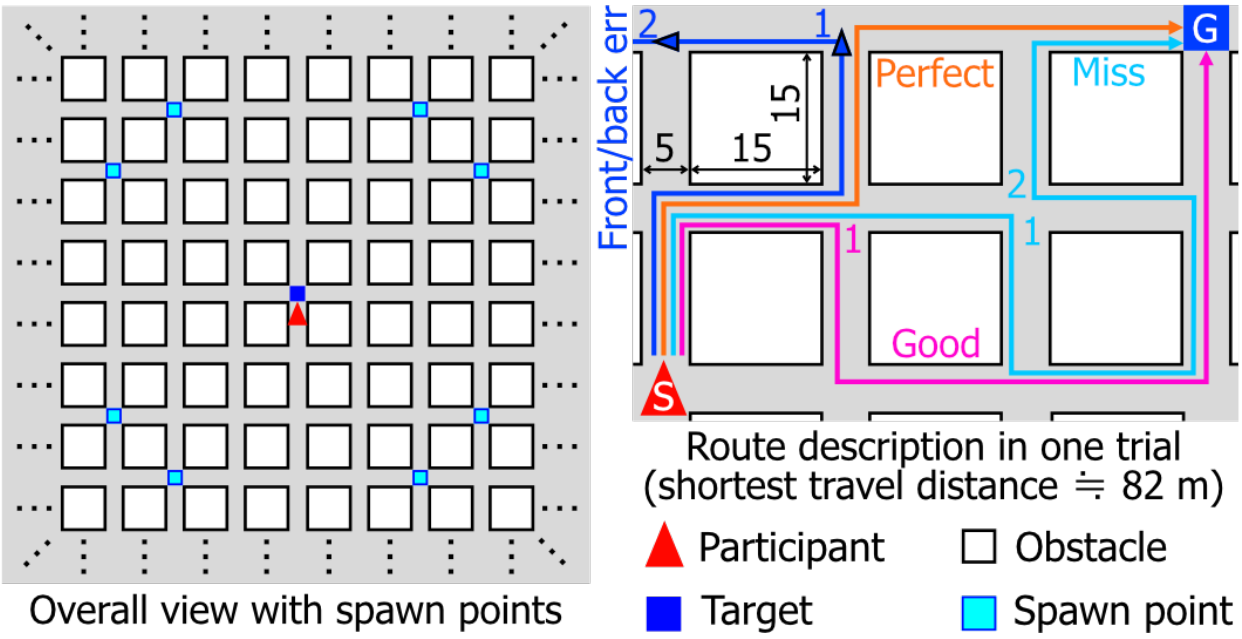

図 5.6　実験 3 のバーチャル環境の説明。左：参加者がターゲットに到着した時、ターゲットを基準とした次の 8 つの出現箇所候補からランダムな位置に再出現する。右：1 回の施行におけるルート種類の一例。図中の文字の色は［Perfect：Good：Miss：Front/Back err］＝［黒：マゼンタ：オレンジ：青］を示し、各色の数字は十字路で誤った回数を示す。最短移動距離は斜め移動を考慮した値である。

行動評価

提示条件によるナビゲーションの達成度合いについて、以下の基準でグループ分けを行い、その割合を評価する。ここで、ターゲットまで最短距離で到達できるルートを正解と定義する。

- Perfect：参加者が全ての十字路で正解のルートを選べた試行。
- Good：参加者が 1 回だけ間違ったルートを選択した試行。
- Miss：参加者が 2 回以上間違ったルートを選択した試行。

Perfect の場合に、試行を完遂するのに要した時間を測定し評価する。また Miss グループで迷ってしまった度合を測るため、Miss グループの平均移動距離を算出するとともに「前後の区別が付かなかった（Front/Back err）」ことを、ターゲットが参加者よりも後ろにある状態で、十字路での選択を 2 回以上続けて間違えた試行、と定義して集計した。

主観評価

アンケートは以下の項目について 7 段階のリッカート尺度を用いて評価した。形式は 5.4.2 節と同様であり、agree/disagree の代わりに使用した形容詞を括弧内に示す。

- Q1：Is it easy to find the target? (difficult/easy)
- Q2：How did the music modulation have an impact (affect) on your musical experience compared to simply listening to music? (negative/positive)

アンケートは各提示条件が終わる度に実施し、評価に変更があればいつでも修正することを許可した。そのため、アンケート評価は提示条件間の相対評価となる。

実験手順

始めに参加者にゴムベルトを用いて彼ら自身の足にコントローラーを装着させた。次に参加者に HMD を被らせ、各提示条件を行う前にチュートリアルを実施した。実験者が、参加者が実験条件を十分理解したことを確認したのち、実験へと移行した。実験中、脚踏みによって参加者がその場から移動してしまわないよう、参加者はオートポールに片手で触れていた。各条件において試行は 3 回行われ、終了後 HMD を脱着しアンケートに回答させた。全条件での実験が終わりアンケートの回答が終了した後、アンケート結果が参加者の評価を正しく反映できているかを確認するため、実験者がアンケートの回答結果を解釈して参加者に伝え、その解釈が間違っていないかを参加者に確認させた。また条件間の評価の違いの理由についてヒアリングした。ヒアリングの際、実験者は参加者の思考を引き出すことだけに集中し、誘導しないように心がけ、参加者は自分の意志で得点を修正することができた。

実験結果

各提示条件のナビゲーションの達成率を表 5.2 に示す。参加者は全ての試行について、提示手法によるナビゲーションのみによってターゲットまで辿り着くことができた。表中の Perfect・Good・Miss 行については、全参加者について集計したもの、それ以外の行は各グループごとの Perfect の割合を集計したものとなっている。また数字の横の括弧内はカウントされた試行数を示す。Perfect グループの参加者の到達時間（s）の平均は［NT：NT&Hap：HapDir：HapDirDist］=［89：82：100：90 s］となり、条件間で有意差は見られなかった。また、track-A、track-B 間で Perfect グループの参加者の到達時間について、各ナビ条件ごとにウィルコクソン順位和検定を行ったところ、いずれも有意差は見られなかった。

また Miss グループの平均移動距離（m）は［NT：NT&Hap：HapDir：HapDirDist］=［162：165：196：283 m］となり、前後の区別が付かなった回数は［NT：NT&Hap：HapDir：HapDirDist］=［0：1：3：7 回］となった。アンケート結果を図 5.7 に示し、条件間の差分結果を図 5.8 に示す。

表 5.2　ナビゲーションタスクの達成度グループ分類

Group	NT	NT&Hap	HapDir	HapDirDist
Perfect	0.89(63)	0.93(67)	0.79(56)	0.81(58)
Good	0.10(7)	0.06(4)	0.11(8)	0.07(5)
Miss	0.01(1)	0.01(1)	0.10(7)	0.13(9)
track-A	0.83(30)	0.89(32)	0.74(26)	0.75(27)
track-B	0.94(33)	0.97(35)	0.83(30)	0.86(31)

5.5　考察

実験の結果より、変調された音楽振動を刺激することによるナビゲーションは十分実用的であり、同時に音楽鑑賞体験を向上させられることが示された。以下、5.1 節で立てた仮説の検証結果を記す。

5.5.1　H1：音楽振動のステレオバランスを変調することでナビゲーションを成立させるのに十分な情報を伝えられる

[H1] は支持されたと判断する。実験 2（5.4.3 節）の結果から提案手法により、参加者はおよそ 20° 程度の精度でターゲットの方向を同定できることが示された。誤差が 30° 未満の割合は 89% であり、これは Heller ら [123] が提案した NavigaTone の精度（ユーザーはターゲッ

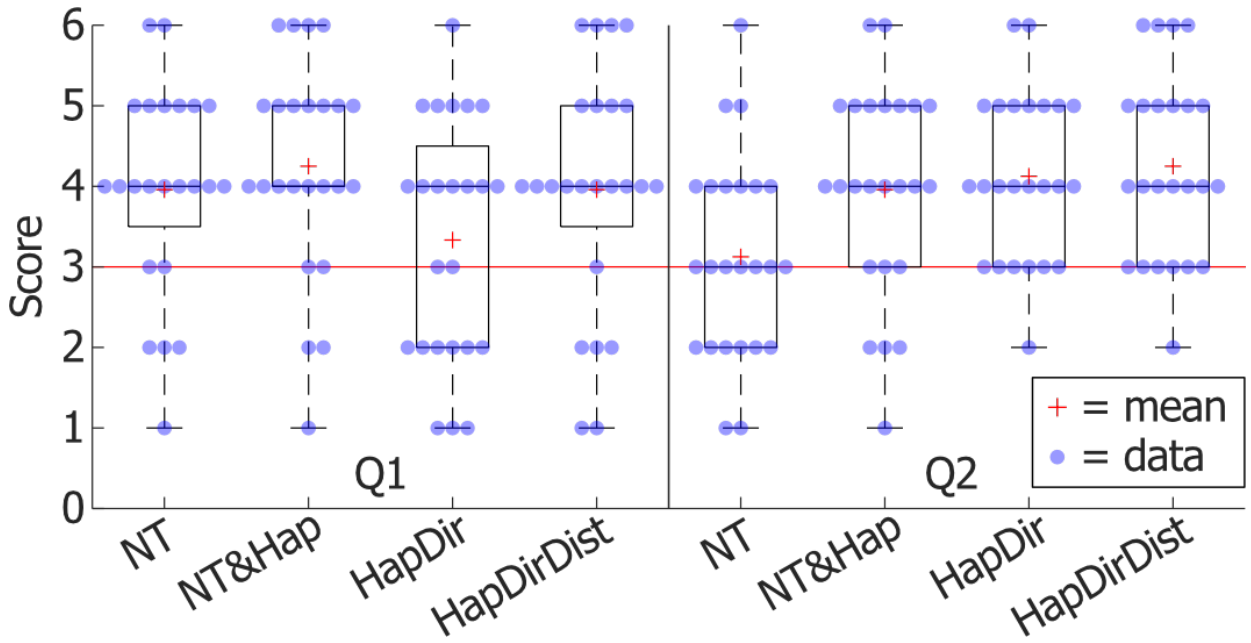

図 5.7　実験 3 のアンケート結果

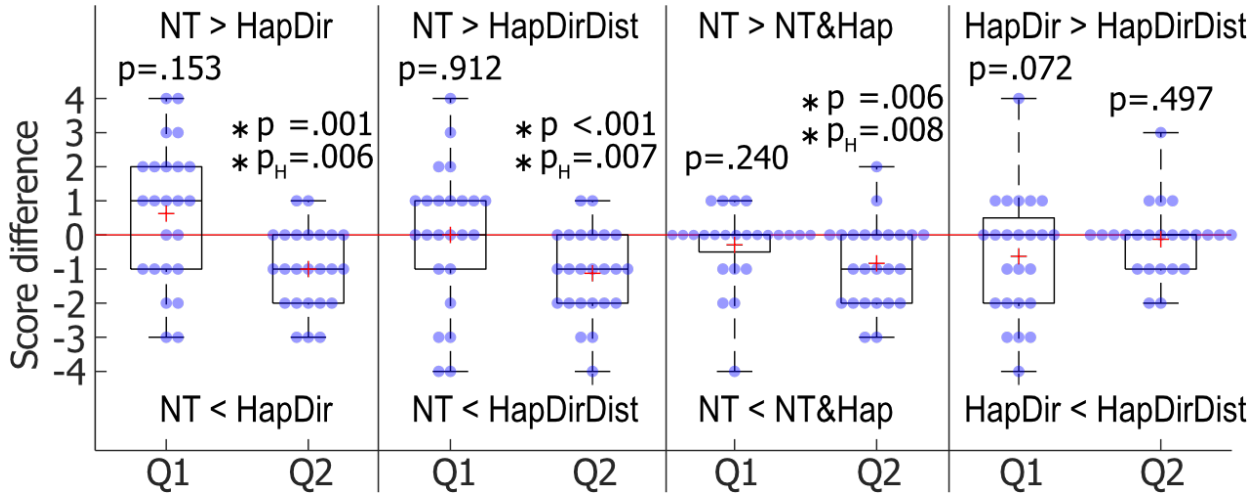

図 5.8　実験 3 におけるアンケート結果の得点差。得点差は図中の一対のナビゲーション条件の間で各参加者の得点を計算したものである。

トの正しい位置を誤差 30° 以内、86% の正答率で回答可）と比較しても遜色は無い。また、Williamson ら [149] により、ナビゲーションにおける方向提示は 60° 程度の精度で検知できれば十分実用的であることが報告されている。実験 3 で行われた音楽振動を用いた HapDir・HapDirDist によるナビゲーションタスクについても、参加者は全ての試行で目的地にたどり着くことができ、そのうち 8 割程度の試行については最短ルートを選択できた。以上より、NT や NT&Hap の結果から NavigaTone と比べると分かりにくいことは否めないが、変調され

た音楽振動による位置情報提示はナビゲーションに必要な情報を提示できていると見て良いだろう。

一方で提示手法には課題もあり、参加者の 3 分の 1 程度は HapDir は分かりにくいと回答している（図 5.7）。その理由について、par 7 は「音声ナビよりも振動の方が方向を定めるのに集中を要する」と述べており、par 21 は「音声ナビの方が分解能が高く分かりやすい」と述べていた。実験 2 では十分な精度で正面を導き出せたにもかかわらず、実験 3 では難しいと感じてしまった要因として、今回の実験環境では図 5.6 に示される通り、障害物が格子状に配置されていたことが考えられる。参加者は十字路に差し掛かると、立ち止まって通路の方向、すなわち 90° 単位で素早く顔を向けることで正しい方向を探索する傾向にあった。低音による音楽振動は正弦波の様に常に振動するわけではなく、ドラムを叩いた時やベースギターの弦をはじいた時のような、音の鳴り始めが強調されて感じられ、音楽振動は離散的に知覚された可能性が高い。そのため、ユーザーが顔の向きを素早く、大きく変化させてしまうと、首の両側で振動の変化を連続的に感じることが出来ず、ターゲットの方向を知覚し辛くなっていたことが考えられる。この改善手法として、音楽鑑賞に邪魔にならない周波数、強度の正弦波を常に振動出力側の音楽信号に混在させることが考えられる。

ボーカルを定位させる NT と NT&Hap では、参加者は同様に十字路で顔の向きを素早く変えて方向を探っていたにも関わらず、ほとんど進路を間違えなかった。この理由として、ボーカルは音の持続時間が長く、参加者が音の変化を連続的に捉えられていたことが考えられる。また頭部運動による音像定位の検出精度は、頭部運動の速度依存性が低い [150] ことから、ゆっくりとした頭の動かし方と同程度の精度でターゲットの場所を知覚できていたことが考えられる。

提案アルゴリズムでは前後の区別が付きにくかった、という感想が 4 名の参加者から寄せられており、実際に実験中、前後を誤ったとみられるケースも観測されている。1 つの理由として、Hapbeat の帯は分離されていないため、片側のアクチュエータのみを振動させたとしても反対側に伝わる振動を完全に排除できないことが考えられる。その他の理由としてターゲットが参加者の真後ろ付近にある場合に左右の振動が小刻みに切り替わってしまい、あたかも両側の帯が振動しているように感じられてしまうことが考えられる。この問題は深刻であり、前後の区別が付かなくなってしまうと参加者を迷わせてしまい、到着までの時間が著しく大きくなってしまう（最長のケースで 819 秒）。そのため、前後を確実に判別できるような改善、例えば後ろにある場合は振動を全くさせないなどの措置が必要である。

5.5.2　H2：歩行中の音楽振動提示は音楽鑑賞体験の向上に寄与する

[H2] は支持されたと判断する。実験 1 の Q1–Q6 および実験 3 の Q2 について NT とそれ以外の 3 条件との比較した 3 項目の計 9 項目の帰無仮説を [H2] が成り立つための帰無仮説族と

し、Holm 法を用いて p 値の調整を行ったところ、全ての項目で同時に有意差が認められた。すなわち本章で行った実験では、全ての場合において音楽振動が無い状態で音楽を聞くよりも、音楽振動がある状態で音楽を聞いた方がポジティブな評価となったことが示された。そのため音楽振動は、歩行動作中やナビゲーション中での意識の分散、足設置時の身体への振動伝達、振動振幅変調といった影響がある場合でも、音楽鑑賞体験の向上に寄与することが示された。参加者からの口頭コメントでは、振動があることで「迫力が増す」「音楽に集中・没入しやすくなる」という意見が多く、これは実験 1 と 3 で共通していた。

5.5.3 H3：歩行中の音楽振動提示は従来の音楽変調による方向提示を妨げない

[H3] は支持されたと判断する。表 5.2 より、NT と NT&Hap の Perfect の割合と到達時間はほぼ同等であり、図 5.8 の Q1 の NT と NT&Hap で有意差が見られなかったことから、学習効果を考慮しても、提示された音楽振動がナビゲーションを妨害したとは考えにくい。そのため、方向提示の観点では既存の音楽変調によるナビゲーション手法と音楽振動を組み合わせても問題が無い可能性が高いことが示された。

一方で、音楽振動はユーザーの音楽聴取への認知負荷には影響を及ぼす可能性がある。NT&Hap を NT よりも高く評価した参加者のうち、5 人（par 4, 8, 16, 17, 24）は「振動によって声が聞き取りやすくなった」と述べた一方で、NT より低く評価した参加者（par 6, 9, 11, 20）は皆「振動により気が散ってしまい、音声に集中しにくくなっていた」と述べている。彼らの感想は、音声と同期した振動を提示することで、音声のラウドネス知覚が上昇することを示した先行研究 [76, 151, 79, 80, 81] の結果を表していると想定される。Hapbeat による振動は低域、すなわち楽曲のドラムやベーストラックが強調されて感じられるため、聴覚的にもそうした低域の部分が聞こえやすくなった可能性が高い。そうした影響の元、par 24 が「振動によって楽曲の低音部と声が分離され、声が余計に浮き出て聞こえる感じがした」と述べたような捉え方ができた参加者と、ボーカルトラックが低音に埋もれてしまったように感じてしまった参加者に分かれてしまったことが考えらえる。そのため、音楽振動として提示する音楽トラックの種類によって、ユーザーの認知的負荷に影響を及ぼす可能性があり、さらなる調査が必要である。

5.5.4 H4：音声を変調するよりも音楽振動をステレオバランスさせた場合の方が音楽鑑賞体験として好まれる

[H4] は支持されたと判断する。図 5.8 より、Q2 において HapDir は NT よりも有意に得点が高い。絶対的な評価について、HapDir でネガティブな評価を付けたのは 1 人のみであり、

左右の振動の大きさが変化することに対する印象を口述した 5 人（par 6, 11, 14, 15, 18）全員が、音楽鑑賞に悪影響は無いと述べていた。一方、NT でネガティブな評価を付けたのは 8 人（par 3, 4, 6, 11, 12, 14, 15, 21）おり、彼らはいずれもボーカルトラックが定位することによって音楽鑑賞体験が損なわれたことを明言していた。そのため、音声を変調することで鑑賞体験が損なわれると感じるユーザーは一定数存在すると考えられ、音楽振動変調の方が広くユーザーに受け入れられる可能性が高い。

とはいえ、NT が良くない変調方法であるというわけではない。NT に肯定的な参加者は 9 人（par 1, 2, 8, 9, 13, 16, 17, 18, 25）おり、理由として「定位することでライブのような臨場感があった」と述べていることから、ユーザーによってはボーカル定位が音楽鑑賞にポジティブな影響を及ぼし得る。また、NT でネガティブな評価を付けた 8 人のうち 4 人（par 3, 4, 14, 21）は NT&Hap において「振動が提示されることでボーカル定位による違和感が減少した」と述べポジティブな評価をしており、これは 5.5.3 節で記したように、音楽振動によって聴覚の意識がベースやドラムといった低域に集中したことで、ボーカルへの意識が薄まった可能性が考えられ、ユーザーによっては音楽振動を提示することで音声変調によって感じられる不自然さを緩和できることが示唆された。ユーザーの属性とそれぞれの提示条件に対する感じ方との関係を明らかにするためには更なる研究が必要だが、提案手法はそれぞれのユーザーの選択肢を増やすことに貢献できているのは間違いない。

5.5.5　H5：距離情報を振動強度変調で表現することでナビゲーションがより分かりやすくなる

[H5] は更なる検証が必要であると判断する。HapDir と HapDirDist を比較すると、結果よりグループ割合や到達時間では大きな違いが見られず、図 5.8 の Q1 においても有意差は見られなかった。また、Miss グループの平均移動距離や前後の区別が付かなかった回数は HapDirDist の方がネガティブな結果となった。以上より、本章の実験結果からは [H5] を支持することはできない。しかし以下の理由から、本手法による距離情報の提示には成功しており、その効果を適切に検証する必要があると主張する。

HapDirDist に否定的な意見としては 7 人（par 7, 8, 9, 10, 16, 19, 24）が「ターゲットから遠い場合に振動が弱く、方向や前後が分かりにくい」と述べていたが、一方で全参加者において振動が弱いこと以外の否定的な意見は無かった。このコメントと、HapDirDist では HapDir よりも Miss グループの平均移動距離が長く、前後の区別が付かなかった回数が多かったことを合わせると、開始直後などターゲットから離れていて振動が弱すぎる場合は方向を明確に判別することが出来ず、迷ってしまった場合に正しい方向を見つけるのがより困難となっていた、と解釈できる。触覚の知覚閾値を調査した研究では個人差が大きいことが報告されているが [152]、今回の実験では振動強度について参加者ごとの調整は行わなかった。そのため、

HapDirDist の実験結果では変調方式よりも各参加者の触覚の感度を考慮しなかった要因による影響が大きい可能性が高い。

一方で、図 5.7 より、Q1 で分かりにくい（得点が 0–2）と回答したのは HapDir で 8 人に対し、HapDirDist で 3 人に減少している。また参加者から得られた、HapDirDist に対する肯定的な意見として、「距離の情報があるとターゲットと自分の位置関係がイメージできる」（par 4, 5, 6, 12, 15）、「近づいていることが分かるため、正しい方向に進んでいるという自信が持てる」（par 4, 5, 9, 13, 17, 18, 19, 20, 21）という口述が得られた。結果からも、有意差は見られなかったが、Perfect の場合は HapDirDist の方が HapDir よりも平均到達時間が短く、図 5.8 の Q1 においても HapDirDist の方が分かりやすいという傾向が見られた。これにより提案手法による距離の表現自体には成功しており、今回設定した最小の振動強度でも十分に方向を判別できた参加者にとっては、距離に応じた変調が参加者に「目的地に近づいている確証」を得ることに貢献できたことが示唆される。この「確証」の評価指標としては到達時間が有効である可能性、例えば確証があるほど分岐路で迷わず道中の歩みが早くなるなど、が考えられるが、今回の実験方法では、分岐路間における実験システムによって定められた一定速度の歩行、が到達時間の大部分を占めたため、確証度合を適切に評価できなかった。そのため、実験手順に各参加者の触知覚に応じた最小の振動強度を適切に決定する手順を導入するとともに、確証度合を適切に測る評価指標や実験方法の再検討により、ナビゲーションにおける距離情報提示の貢献を調査する必要がある。

5.5.6 H6：距離情報を振動強度変調で表現すると、強度を変調しない場合よりも音楽鑑賞に悪影響を及ぼす

[H6] は支持されなかったと判断する。図 5.7、5.8 より、Q2 に関して HapDir と HapDirDist はほぼ同程度の評価で有意差も見られず、ネガティブな評価を付けたのはそれぞれ 1 名だけであった。これについては、5.5.4 節でも記載したように、提示される音楽振動の大きさが変化することで鑑賞体験にネガティブな影響を及ぼす、とコメントした参加者は 1 人もいないこと起因すると考えられる。HapDirDist に肯定的な意見として、6 人（par 10, 12, 13, 17, 19, 20）の参加者が「振動が強くなると、演奏している場所に近づくライブ感が感じられて楽しい」という旨の理由を述べており、ユーザーによっては鑑賞体験を増強させる効果が期待できる。一方 2 名（par 11, 22）の参加者が Q2 に関して、振動が小さいことを理由に HapDir よりも低い評価をしており、少数ながら [H6] が起こりうることも確認された。以上より多くの場合、距離提示のために振動変調を行っても音楽鑑賞体験に悪影響を及ぼす可能性は低いことが示された。

5.5.7　楽曲による比較

実験の結果より、楽曲の種類によって到達時間に有意差は見られなかったものの、ナビゲーションの分かりやすさに差がある可能性があることが示唆された。実験 2 では track-B の方が正面同定の誤差が有意に低く、実験 3 での Perfect の割合も track-B の方が高かった。Track-B は Track-A に比べて無音時間が短く、ベーストラックの音圧が大きいため、参加者はより継続的に音楽の振動を感じることができたと考えられる。そのため、参加者は提案手法による振動強度の変化を体感しやすく、ナビゲーションに適していたことが考えられる。

また表 5.2 から、音声によるナビゲーションである NT と NT&Hap においても track-B の参加者の方が track-A の参加者よりも優れた結果を示している。これは、track-B の方が track-A のよりも Vox トラックの無音時間が短く、ターゲットの位置を知覚できる時間が相対的に長かったことに起因すると考えられる。このことから、音声・振動問わず、ナビゲーションのキューとして利用する信号が無音になる時間が長い楽曲ほど、ナビゲーションが難しくなる可能性が示唆された。このような楽曲に対し、Navigatone と提案手法を組み合わせることで鑑賞体験を比較的邪魔せずにナビゲーション性能を大きく向上できることが期待される。いずれにせよ楽曲に関わらず参加者は目的地にたどり着けているため、低音楽器を含む多くの楽曲において、提案手法は適用可能であると推察する。

5.5.8　Limitations

本章で用いたバーチャル環境と現実との環境の違いによる影響は無視できない。まず実験システムは現実の歩行とは大きく異なる。参加者はシステムが歩行を検知できるよう、現実の歩行動作よりも大きく膝を上下させることを意識していた。また実験システムでは常に参加者が前を向いている方向に進むようになっているため、例えば進行方向に対して右を向きながら前進する、といった動作を行うことができない。さらに、実験環境は無機的かつ同一の光景が映像として表示されるため、視覚的に参加者自身がどの程度進んだかは分からない。そのため、本実験では現実よりも目的地にたどり着くのが難しかったことが推測される。

本章では触覚ナビゲーションと音楽鑑賞体験の向上が両立可能であることを検証するのが主目的であったため、主観的な作業負荷の測定は行わなかった。しかし、音声によるナビゲーションに比べ、音楽振動による方向探索にはより集中を要した、と感想を述べる参加者も少なくなかった（par 7, 8, 9, 12, 14, 18, 19, 20, 21）ことから、提案手法は参加者によっては高い作業負荷をかけてしまったことが示唆された。また音楽鑑賞体験が向上するということは、周囲への注意を散漫させてしまうことにも繋がる。提案手法による高い作業負荷は、バーチャル環境内で使用するような状況では大きな問題にはならないが、現実世界で使用する際には事故を

防ぐため、主観的な作業負荷を削減させたり、身の回りの危険を振動で通知するなどの改善が必要である。

5.6　5 章のまとめ

本章では体感音響を用いて立体音響のような音像定位が可能であることを示すため、歩行中のナビゲーションを具体例とし、目的地までの方向と距離に基づき変調された音楽振動を Hapbeat を用いて首両側面に提示する手法を提案し評価した。実験の結果、変調音楽振動を提示することで歩行ナビゲーション中でも音楽の鑑賞体験を向上させることが確認され、聴覚的な音像定位よりは分かりにくいものの、触覚的な音像定位により参加者を目的地に誘導できることが示された。また音声のみの変調では難しかった距離提示についても、体感音響であれば鑑賞体験を損なわずに実現できることが示せた。総じて、提案手法は万人に適する手法ではないものの、音声変調では音楽鑑賞が楽しめなくなると感じる人や、首の触知覚の解像度が高い人、迫力のある音楽鑑賞を楽しむことを優先したい人にとっては良い選択肢となるだろう。本章により歩行中のサウンドスケープを設計する際、ナビゲーション情報を自然に組み込めることが示された。

第 6 章

体感音響による 3 次元音像定位

5 章では体感音響により 2 次元的な音像定位が可能であることを示したが、今日まで発展してきた立体音響技術は上下方向を含む 3 次元的な表現も可能である [153]。そこで本章では 5 章で提案した変調手法を拡張し、3 次元的な音像定位が可能であることを示す。その評価のための具体的なケースとして、3 次元空間内を移動するターゲットを銃撃する VR シューティングゲームでの利用を想定し、体感音響による音像定位でターゲットの発見に貢献できること、および体感音響が VR ゲームのプレイ中でも音楽鑑賞体験を向上させられることを示す。

6.1 背景：視覚外オブジェクトの描画手法と VR ゲームのプレイヤー体験向上の両立

VR ゲームではプレイヤーが周囲 360° の環境に対して自身の動きで 3 次元的なインタラクションを直感的に行えることが魅力の 1 つだが、HMD の視野角は限られており、VR ゲームデザインの制約になりうる。こうした HMD（AR 含む）視野角の限界に対し、3 次元的な視野外の状況を伝達する方法としては、視覚外オブジェクトを描画する 3D レーダーや矢印といったユーザーインタフェース（UI）を重畳させる方法 [154, 155, 156, 157] や、振動や圧覚、皮膚伸展などの触覚刺激を利用した方法 [131, 158, 159, 160, 161, 162, 163] 、視聴覚や聴触覚の複数のモダリティを組み合わせた方法 [164, 165, 166] など数多く提案されている。

一方で VR ゲームへの応用を考えた場合、ゲームの満足度を測る指標である「プレイヤー体験」[167] を向上させることも重要である。様々な研究者が、ゲームプレイ中に再生される音楽（以後、ゲーム音楽）がプレイヤー体験に大きな影響を報告しており [168, 169, 170, 171]、例えばドライビングゲーム中に自分が選んだ好みの音楽を流すことでスコアが良くなることや [168]、バックグラウンドミュージックがあるとゲームへの没入感が向上する [171] といった影響が知られている。

こうした背景から、体感音響による音像定位を応用することで、視覚外オブジェクトの位

置提示を行いつつゲーム音楽の鑑賞体験向上が見込め、その結果 VR ゲームのプレイヤー体験が向上することが期待できる。その評価のため、可視化手法の比較対象として 3D レーダー [172] を選択し、以下の仮説について検証した。

- H1：変調音楽振動刺激により、プレイヤーは 3 次元空間内にある、視覚外で動いているターゲットを検知できるようになる。
- H2：変調音楽振動刺激により、視覚的にターゲットを描画した時と同程度の検知能力を有することが出来る（視覚表示の代替となる）。
- H3：変調音楽振動刺激と視覚外描画を同時に行った場合、触覚的にターゲットを探知できることにより、視覚外描画手法に視線を向ける時間が減少する。
- H4：変調音楽振動刺激により、ゲーム音楽の鑑賞体験を向上させることで、プレイヤー体験が向上する。

6.2　関連研究

6.2.1　触覚による 3 次元位置情報提示

触覚による 3 次元位置情報提示手法として、小型振動子や皮膚伸展を用いた方法が提案されている。

振動刺激による 3 次元位置提示手法

Günther ら [131] は振動子を手の甲に 9 個、手のひらに 1 個組み込んだグローブ型デバイスを提案し、振動パターンにより任意の 3 次元空間にユーザーの手を誘導することに成功している。Fiannaca ら [158] は両手に把持した市販のゲームコントローラーに内蔵される振動子を利用し、周波数やパルス遅延の変調して 3 次元位置提示を試みた。結果、任意の 3 次元座標に誘導することはできたが、特定の位置に誘導するまで約 13 秒かかるなど、実用面で課題が残った。Kaul ら [159] は 20 個の小型振動子を配置したキャップ型デバイスの HapticHead を提案した。実験では 3 次元空間内のオブジェクトを発見するタスクを行った結果、発見までの時間は 2.6 秒、精度は 96.4% であり、比較対象の空間オーディオを利用した結果（6.9 秒、精度 54.2%）よりも優れた結果となった。Oliveira ら [161] は HMD のフェイスカバー（額）およびヘッドバンド（頭部側面）部に振動子を 7 つ配置し、その振動パターンや振動周波数を変化させることでターゲットに対する仰角・方位角を提示することに成功した。

皮膚伸展による 3 次元位置提示手法

Tsai ら [160] は前腕部に 3 次元的な引っ張り力を加えるウェアラブルデバイス GuideBand を提案し、VR 内での 3 次元的な位置提示や臨場感が向上することを示した。Wang ら [162] は HMD のフェイスカバー部に 6 個の皮膚伸縮モジュールを配置し、その挙動を制御することで、重量感や慣性力、衝撃感、左右や上下方向の位置提示を提示できることを示した。Nakamura ら [163] は HMD に 2 本の小型ロボットアームを用いて装着者の頬を刺激することで、平均して方位角で 2.76° 、仰角で 7.32° 程度の精度で 3 次元位置提示が可能であることを示した。

これらはいずれも 3 次元位置提示としては有用であるが、位置提示と同時にコンテンツ体験向上を試みた研究は筆者の知る限り存在しない。またいずれも静的なターゲットを対象としており、VR シューティングゲームの敵のような、動的なターゲットに対する有用性は未知数である。

6.2.2 音楽によるプレイヤー体験の向上

PC ゲームにおいて、音楽がプレイヤー体験やゲーム内行動に影響を与えることは、多くの研究で報告されている [168, 169, 170, 171]。一方で Rogers らは、VR ゲームにおいて音楽は参加者の時間感覚を早めるものの [173]、没入感には重要な役割を果たさないと報告している [174, 173]。しかし彼らの実験では触覚刺激を利用した音楽鑑賞体験の向上を試みていない。VR ゲームにおいて音楽振動刺激によるプレイヤー体験への影響を調査した研究は筆者の知る限り、Carroll ら [175] のみである。Carroll らは小型振動子が 40 個組み込まれたベスト型デバイス bHaptics TACTSUIT X40[*1]を用いて VR リズムゲーム (Beat Saber[*2]) を参加者にプレイさせた結果、臨場感やプレイヤー体験に差が無いことを報告している。この結果は Roger らの報告を支持する一方で疑問も残る。TACTSUIT X40 に使用されている個々の振動子は小型の偏心振動子であるので、音楽の低周波振動を十分に出力することが出来ず、Merchel ら [42] や Hove ら [43] が報告していた体感音響効果を反映できていたとは考えにくい（TACTSUIT X40 の特徴は触覚の空間的な分解能にある）。したがって音楽振動を刺激するのに適切な体感音響装置を使用することで、VR ゲームにおけるプレイヤー体験の結果が異なる可能性は十分に考えられる。

[*1] https://www.bhaptics.com
[*2] https://beatsaber.com/

6.3　提案手法

本章では VR シューティングゲームの体験向上を主に想定し、ターゲットの高さと方向に応じて変調した音楽振動を刺激することで、3 次元位置提示とゲーム音楽の鑑賞体験を向上を両立する手法を提案する。

6.3.1　体感音響装置

本手法ではターゲットの高低を表現にあたり身体の 2 か所に音楽振動を提示する。身体上部への刺激には 4 章で提案したネックレス型 Hapbeat を用い、身体下部へはベルト型 Hapbeat を用いる（図 6.1 (a, d)）。ベルト型とネックレス型の差異は、糸が筐体から繰り出される方向を真横にした点、固定用のバンドを装着できるようにした点のみであり、その他使用しているモーターや糸などの部品は同一である。

6.3.2　変調手法

提案手法で用いる座標系について、極座標系は 5 章と同様（図 5.1(a)）、直交座標系を図 6.2 に示し、変調式を式 6.1 に、具体的な変調例を図 6.3 に示す。

$$
\begin{aligned}
G(\theta, h) &= C A_{\mathrm{T,\,B}}(h) A_{\mathrm{L,\,R}}(\theta) \quad (0 \le G(\theta, h) \le 1) \\
A_{\mathrm{T}}(h) &= 0.5(1 + h) \; (-1 \le h \le 1) \\
A_{\mathrm{B}}(h) &= 0.5(1 - h) \; (-1 \le h \le 1) \\
A_{\mathrm{L}}(\theta) &= \begin{cases} -\theta/90^\circ - 1 & (-180^\circ \le \theta \le -90^\circ) \\ \theta/90^\circ + 1 & (-90^\circ \le \theta \le 90^\circ) \\ -\theta/90^\circ + 3 & (90^\circ \le \theta \le 180^\circ) \end{cases} \\
A_{\mathrm{R}}(\theta) &= \begin{cases} \theta/90^\circ + 3 & (-180^\circ \le \theta \le -90^\circ) \\ -\theta/90^\circ + 1 & (-90^\circ \le \theta \le 90^\circ) \\ \theta/90^\circ - 1 & (90^\circ \le \theta \le 180^\circ) \end{cases}
\end{aligned}
\tag{6.1}
$$

ここで h、θ はそれぞれ図 6.2 中の変数を示し、θ はプレイヤーからターゲットまでの方位角、h は正規化されたターゲットの高さ（y 座標）である。C は振幅レベルを決定する任意の値である（$G(\theta, h)$ が 1 を超えないように設定するのが望ましい）。関数 A の各添え字は L: Left, R: Right, T: Top, B: Bottom を示し、高低および左右の計 4 個のアクチュエータに入力する 4 種類のゲイン値（TL, TR, BL, BR）がそれぞれ計算される。本手法では $G_{\mathrm{TL,\,TR}}$ の値をネックレスの左右のモーターに、$G_{\mathrm{BL,\,BR}}$ の値をベルトの左右のモーターに入力している。

方向の提示についてはプレイヤーとターゲット間の方位角（図 6.2 中 θ）を変数として、左右の振幅を変調させる。この方向に関する手法は 5 章の提案手法とほぼ同様であり、ターゲッ

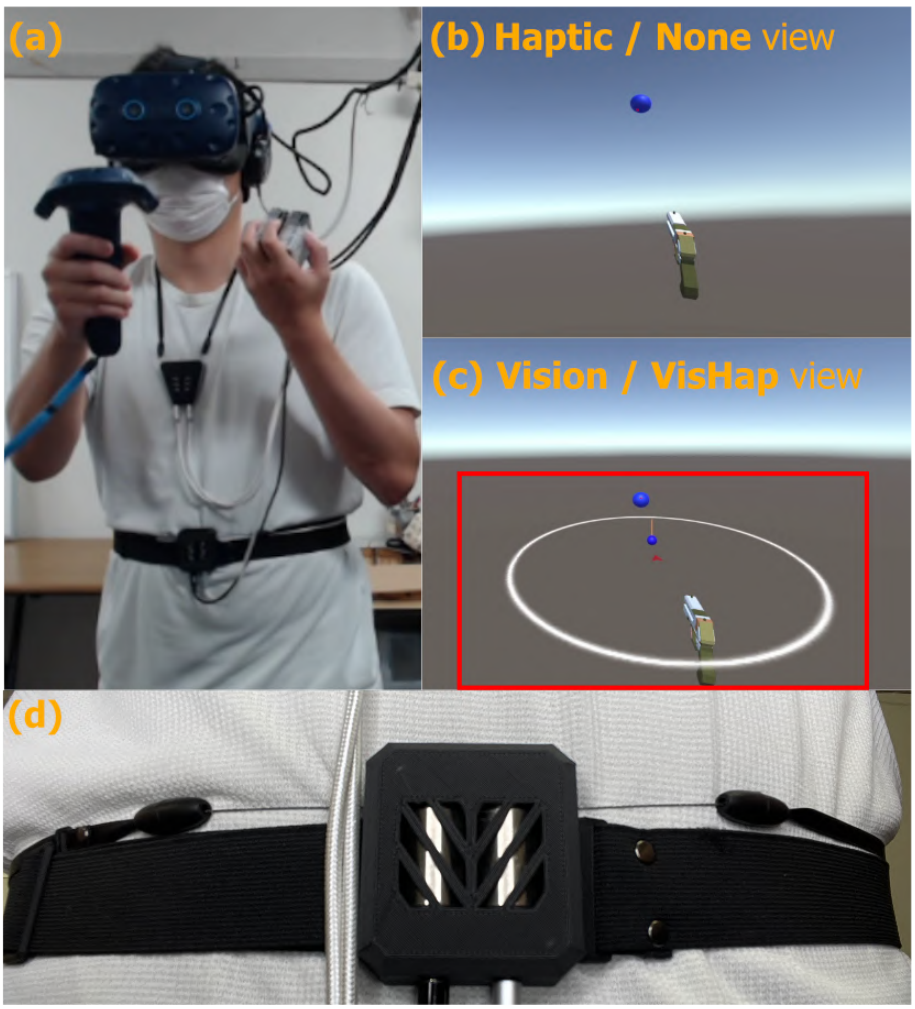

図 6.1　実験環境。(a) Hapbeat の装着含む実験中の参加者の様子。(b) Haptic・None 条件の VR 環境。(c) Vision・VisHap 条件の VR 環境。図中の赤枠は定義したレーダー描画範囲（6.4.8 節で説明）。(d) ベルト型装置の外観

トがプレイヤーの前にある場合と後ろにある場合の区別がないことだけが異なる。すなわちプレイヤーは振動刺激のみで前後の判別を行うことができないが、本章ではターゲットが見える状態での利用を想定しているため、問題無いと判断した。高さの提示についてはターゲットの高さ（y 座標）に基づき、身体の上側（ネックレス）と下側（ベルト）の振幅比が変調される。以上より、装着者は振動刺激を強く知覚した方向に頭の向きを向けることでターゲットを発見することができる。

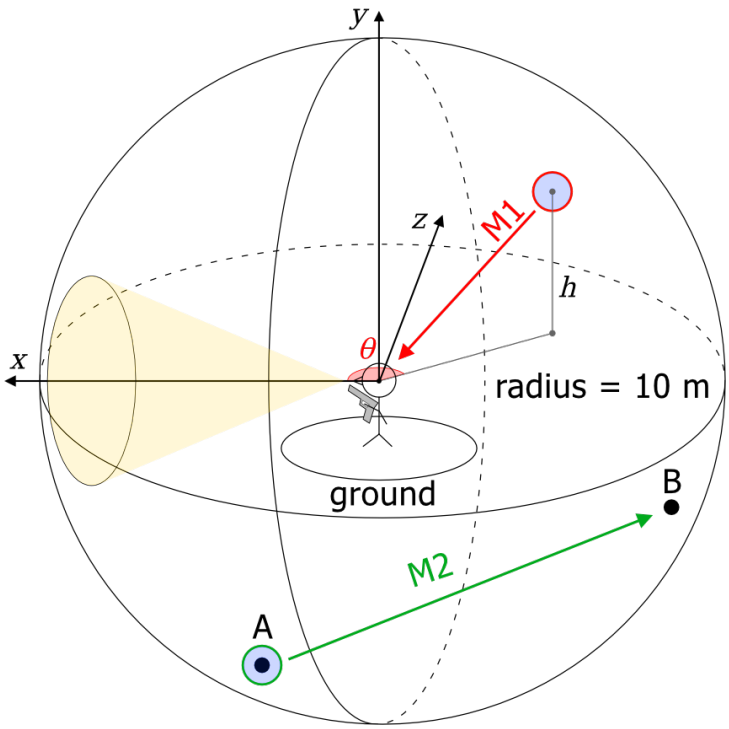

図 6.2　提案手法の直交座標系および実験環境。極座標系は 5 章と同様（図 5.1(a) 参照）。6.4.5 節で説明するターゲットの動き方の一例を図中の赤矢印（M1）と緑矢印（M2）で示す。

6.4　評価

6.1 節で示した仮説検証を目的として、3 次元的に配置されたターゲットを発見し銃撃するタスクを課した実験を、4 種類の位置提示方法、2 種類のターゲット移動条件で行った。また音楽鑑賞体験の評価は 5 章と同様、グルーヴ感を評価する。

6.4.1　実験参加者

実験には 12 人（[男性：女性] = [9：3 人]、[20：30：40 代] = [9：2：1 人]）が参加した。全ての実験参加者は感覚モダリティに異常のない健常者であった。参加者は実験開始前に研究倫理に基づく同意書に同意した。実験は 1 時間程度で行われ、謝礼は支払われなかった。

6.4.2　使用機器

本実験で使用するアプリケーションは、制作にゲームエンジンの Unity（version 2020.3.22f1）を用い、実行にゲーミング PC（CPU: Intel(R) Core(TM) i7-9700K、RAM: 16 GB、GPU: NVIDIA

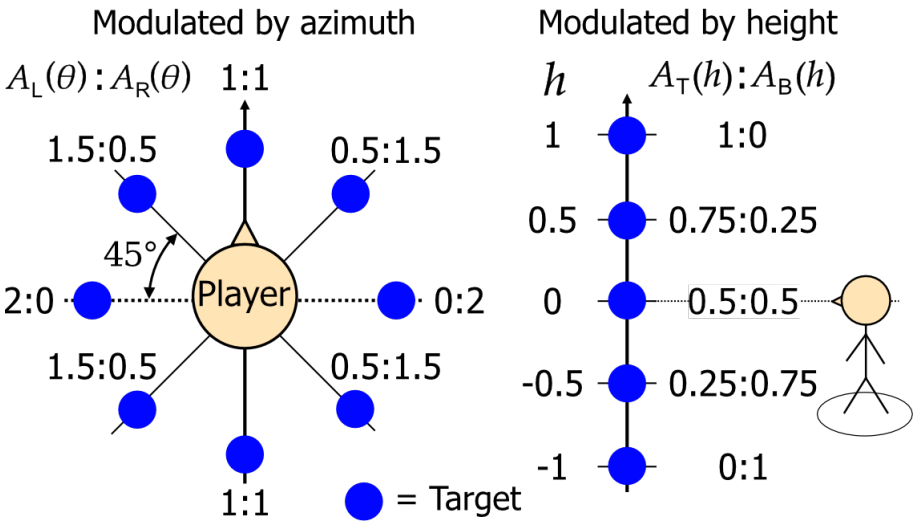

図 6.3　式 6.1 による変調の具体例。左側は方向に基づく変調、右側は高さに基づく変調例を示す。

GeForce RTX 2070 SUPER）を用いた。ディスプレイには、視線追跡が可能な HMD（VIVE Pro Eye、HTC Corporation）を使用した。音声の再生には小型かつ安価なヘッドホン（ATH-S100、Audio-Technica Corp.、インピーダンス 32 Ω）を利用した。振動の再生には 6.3.1 節で記述したネックレス型とベルト型 Hapbeat を用いた。

6.4.3　提示刺激

全ての実験において使用楽曲にはシナスタジアシューティングゲーム Rez Infinite[*3]内で使用される楽曲の一つである「Creation the State of Art」を使用した。再生区分は曲の始まり（0:00）から実験が終わるまで（最長 4:35）であり、この区間は連続した低音ビートを含んでいた、つまり Hapbeat は常に変調した音楽振動を参加者に刺激していた。

音量および振動刺激は十分に知覚でき音楽振動を楽しめる強度となるよう実験者が事前に調整し、全ての参加者で同一の強度とした。以下、設定した強度を再現するため、80 Hz・−3 dBFS の正弦波信号を用いた時の測定値を記す。音声出力について、ヘッドホン（インピーダンス 32 Ω）への入力は 93.3 mV_{RMS} であった。振動出力について、モーター両端に印加される電圧は、式 6.1 のゲイン値が 0.5 の際に 1.95 V_{RMS} であった。伝達振動の大きさの目安として、実験者が Hapbeat を装着した状態で、加速度センサ（4.4.2 節と同様）を結合部品に張り付けて振動を測定し、3 軸合成値を求めたところ、ネックレス型では 60 m/s^2、ベルト型では 64 m/s^2 であった。

[*3] https://rezinfinite.com/ja/

6.4.4　実験用バーチャル環境

本実験のバーチャル環境を図 6.2 に示す。参加者は HMD によりヘッドトラッキングされており、バーチャル環境内の参加者の正面は HMD の向き、すなわち現実の参加者の顔が向いている方向と同期している。参加者は等速直線運動するターゲットを、利き手に把持した拳銃をコントローラーで操作し銃撃することが本実験のタスクである。銃には銃口の延長線上に照射されるレーザーサイトが搭載されており、ターゲット（半径 50 cm の球）に銃口を向けると、ターゲットにレーザの赤い点が照射される。照射している時にコントローラーの人差し指に位置するトリガーボタンを押すことで命中判定となる。なおコントローラー操作の個人差を緩和するため、当たり判定は銃口の向きを軸とした半径 1 m の円柱状としており、銃口をおおよその方向に向ければ命中させることが可能である。また銃撃時のフィードバックはコントローラーの振動のみとし、効果音の再生は行わなかった。

実験中、参加者の視線（2 次元平面上の座標）、頭部姿勢（HMD の位置および回転値）、銃撃に要した時間（秒）を記録した。視線座標の取得には Tobii 社が提供する Tobii XR SDK にバンドルされる Tobii G2OM (Gaze-2-Object-Mapping) ライブラリ [176] を利用した。以上のデータはタスク完了時および約 33 ms 間隔で常時記録した。

6.4.5　実験条件

実験条件は 4 種類の位置情報提示手法および、2 種類のターゲットの動き方を組み合わせた 8 条件とした。各条件でターゲットを銃撃する試行を 55 回行い、始めの 5 回分のデータはウォーミングアップとして集計から除外した。各試行において、ターゲットは出現してから 5 秒間存在し、8 m の距離を等速直線運動（1.6 m/s）する。参加者が銃撃に成功（succeed）するか、出現から 5 秒間経過する（fail）と、その試行のターゲットは消滅し、即座に次の試行が開始されターゲットが出現する。ターゲットは図 6.2 の球面上座標からランダムで出現するが、n 回目の試行終了直後に $n+1$ 回目のターゲットが極力視界に入らないよう、n 回目と $n+1$ 回目の出現座標が 10 m 以上離れるように調整されている。なお参加者間で、異なる出現位置や順番が結果に影響を及ぼしてしまうことを避けるため、このランダム出現位置は各条件ごとに保存され、全ての参加者に同一のランダム出現位置が用意された。

位置情報提示

[H1]–[H4] の仮説検証を目的とし、以下の 4 つの位置提示条件を設定した。

- None：いずれの位置情報手法も適用しない条件。
- Visual：視覚外ターゲットの位置を視覚的に提示する条件。視覚可手法は Bork ら [154]、

Gruenfeld ら [172] の研究を参考に、ユーザーが理解しやすく描画領域が小さく済む 3D レーダー（図 6.1(c)）を用いた。

- Haptic：ターゲットの位置を変調振動刺激（6.3.2 節）によって提示する条件。この条件では視覚的な補助は無い、すなわち視覚的には None と同様である（図 6.1(b)）。
- VisHap：上述の Visual と Haptic を組み合わせた条件。参加者は視覚的にも触覚的にもターゲットのを探索することが可能である。

それぞれの条件は [H1]–[H3] の仮説検証を目的としており、[H1] の検証のため None と Haptic、[H2] の検証のため Haptic と Vision、[H3] の検証のため Vision と VisHap、[H4] の検証のため音楽振動有条件（Haptic または VisHap）と音楽振動無し条件（None と Vision）を比較する。実験の順番について、位置情報提示の感覚モダリティの種類が 1 種類のみである Vision と Haptic について順序効果を考慮し、Vision・Haptic・VisHap・None の順に実験を行うグループと、Haptic・Vision・VisHap・None の順に実験を行うグループに分けた。VisHap が 3 番目である理由は、参加者が Haptic を体験する前では学習が足りず、レーダーを見る時間が増えてしまうことが想定され、[H3] を正しく検証できないことが想定されるためである。また None を最後にしたのは、最も難しい条件であることが想定されるため、タスクを十分に学習した状態であるのが望ましいと判断したためである。

ターゲットの動き方

またターゲットの動き方が異なる場合についての評価も行うため、Grunefeld ら [172] の研究を参考に、ターゲットの動き方について以下の 2 条件で実験を行う。

- M1：ターゲットが出現位置からプレイヤーの頭の位置に移動する条件（図 6.2 赤矢印）。出現地点は半径 10 m の球面上の任意の点である。
- M2：ターゲットが出現位置（点 A）から別の位置（点 B）に移動する条件（図 6.2 緑矢印）。点 A・点 B はいずれもランダムに選択された半径 10 m の球面上の点であるが、両者の距離は 8 m 以上離れるよう条件付けられていた。

実験順序は同じ動き方での位置提示条件間の比較を優先し、始めに M1 の動かし方で 4 種類の位置提示手法を行い、次に M2 の動かし方で同様に実験を行うグループと、M2 から M1 の順番で同様に実験を行うグループに分けた。

6.4.6 アンケート

提示手法による音楽鑑賞体験およびターゲットを探すことへの主観的な影響を調査するため、以下に記載した質問項目について、7 段階のリッカート尺度で各条件ごとに回答させた。

リッカート尺度には各回答値に次の説明が記されていた: 0—strongly disagree, 1—disagree, 2—slightly disagree, 3—neither / nor, 4—slightly agree, 5—agree, 6—strongly agree.

- Q1: This music evokes the sensation of wanting to move some part of my body.
- Q2: Listening to this music gives me pleasure.
- Q3: I can find the target easily.
- Q4: I can find the target intuitively.
- Q5: I enjoyed the experience.

なお、Q1・Q2 は 5.4.2 節の Q1・Q4 と同様である。

6.4.7　実験手順

まず初めに実験者が参加者にタスク内容および Haptic と Vision による誘導方法について説明を行った。次に参加者は HMD と 2 つの Hapbeat を装着し、参加者は各条件についてチュートリアルを行った。チュートリアルでは全ての実験条件と同条件（ただしターゲットの出現順は実験と異なる）でターゲットを出現させ、参加者が理解するまで行われた。チュートリアル終了後、参加者は一旦 HMD を外し、必要に応じて休憩を取る時間を設けた。参加者は再度 HMD を装着し、VIVE 社が提供するアイトラッキングのキャリブレーションを行った。キャリブレーションの後、実験が終了するまで HMD の位置は外さず固定した。その後、実験を開始し 6.4.5 節に記載した順番で全条件を行った。各条件でのタスクが終わるたび、参加者はアンケートに回答し、その後次の条件の実験に移行した。全ての条件での実験終了後、実験者がアンケート結果についてインタビューを行った。ヒアリングの際、実験者は参加者の思考を引き出すことだけに集中し、誘導しないように心がけ、参加者は自分の意志で得点を修正することができた。

6.4.8　実験結果

実験中の行動ログの結果を図 6.4 にまとめる。成功率（Success rate）は全 50 回の試行のうち、ターゲットの出現から 5 秒以内に発見し銃撃できた試行の割合を示す。達成時間（Clear time）は成功した試行において、ターゲットを銃撃するのに要した時間の加算平均値を示す。頭部回転量（Rotation amount）は実験中の参加者の頭部回転量（ロール・ピッチ・ヨーの合算値）を積算した値である。なお各条件におけるターゲットのランダム出現位置は異なる、すなわち、ターゲットを発見するための最小回転量は異なるが、その差は最大でも 23 rad（最小 142–最大 165 rad）であり結果に及ぼす影響は小さいと判断し無視する。

3D レーダーが表示される条件において、視線データとその参加者内比較を行った結果を図

6.8 に示す。レーダー注視割合（Gaze at radar area）は実験中、参加者がターゲットを探している間（HMD に描画されるターゲットの姿が半球より小さい場合）、3D レーダーが描画される範囲（図 6.1(c) 中赤枠）に視線を向けていた時間の割合を示す。また、アンケートの回答結果を図 6.5 に示す。

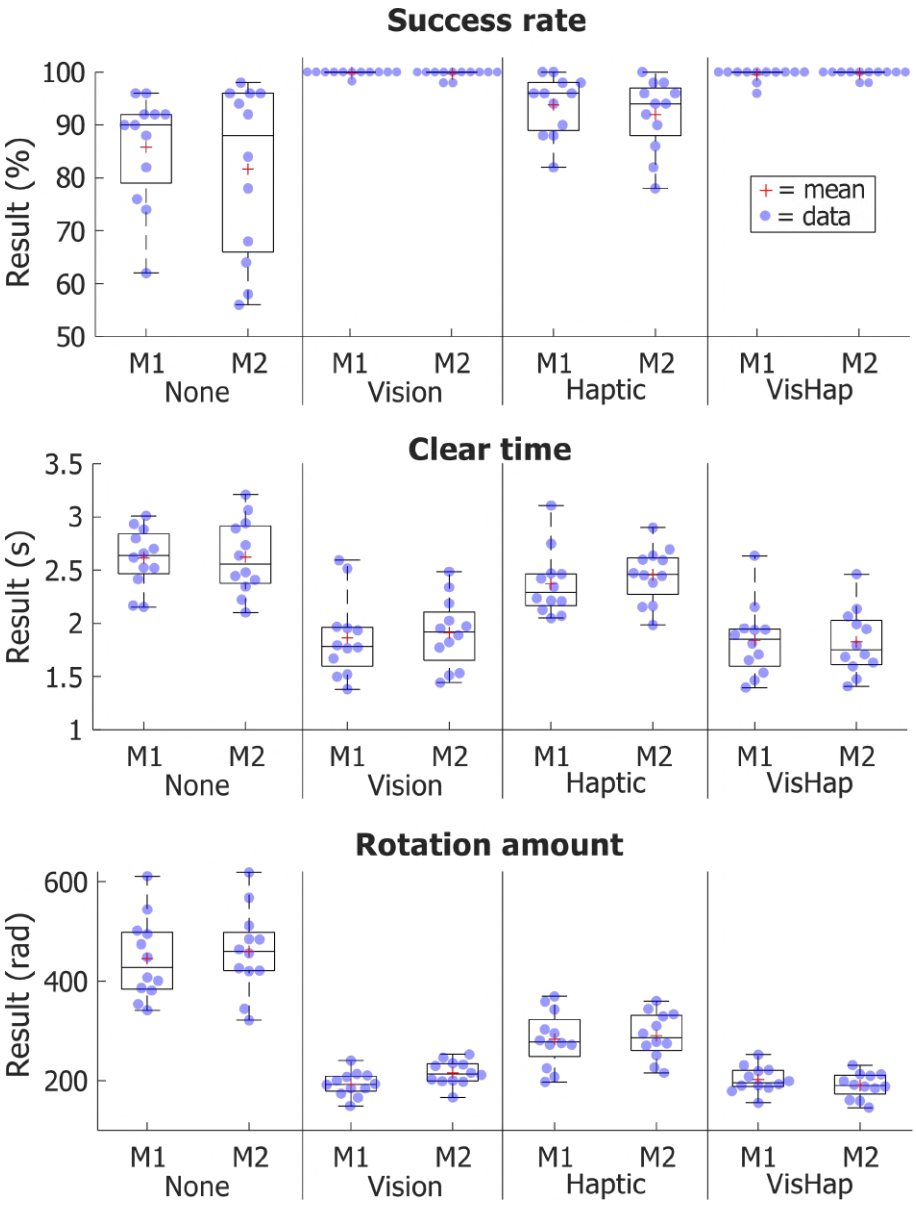

図 6.4　定量実験結果。青丸のデータは各参加者の平均値を示す。赤いプラス記号は加算平均を示し、その他は一般的な箱ひげ図と同等である。図 6.5–6.11 も同様である。

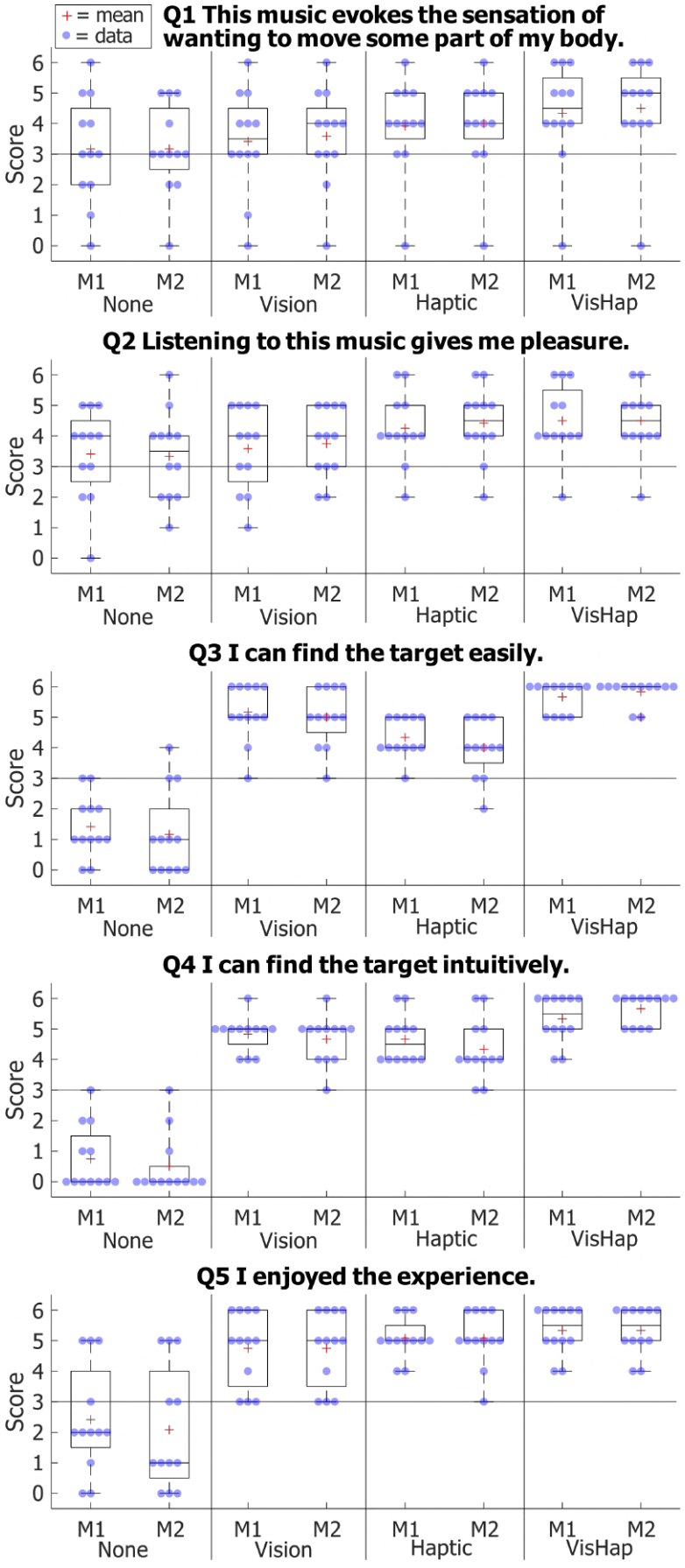
+ = mean
= data
Q1 This music evokes the sensation of wanting to move some part of my body.
Q2 Listening to this music gives me pleasure.
Q3 I can find the target easily.
Q4 I can find the target intuitively.
Q5 I enjoyed the experience.
Score
0
1
2
3
4
5
6
M1
M2
None
Vision
Haptic
VisHap

図 6.5　アンケート結果

統計的仮説検証

6.1 節で立てた仮説を検証するため、参加者内比較での統計的仮説検定を行った。参加者内比較に用いる差分データは、図中の条件の組み合わせに応じて参加者の結果を減算して算出した。例えば、Haptic-None の場合は、Haptic の結果から None の結果を差し引くため、差が正であれば、Haptic の結果が None の結果より大きいことを意味する。各差分データについて、有意水準 $\alpha = 0.05$ で「2 群間の代表値に差が無い」という帰無仮説を立て、ウィルコクソンの符号順位検定を行った。差分結果と検定結果を図 6.6–6.11 に示す。なお、これらの図中の p 値はファミリーワイズエラーを考慮していないことに留意すること。以下、[H1]–[H4] の仮説検証にあたって、Veazie ら [105] のガイドラインを参考に、複数の帰無仮説が同時に棄却される必要がある場合にファミリー（帰無仮説族）を定義する。統計処理ソフトウェアには MATLAB R2022a を用いた。

[H1]（Haptic 対 None）[H2]（Haptic 対 Vision）での仮説の検証では、図 6.6、6.7 に示す 10 項目を対象とした。[H1]・[H2] では全ての項目が同時に成り立つ必要は無いため、ファミリーワイズエラーの調整は行わないが、10 項目を同時に検定した場合に偽陽性がどの程度含まれる可能性があるかを確認するため、Benjamini–Hochberg（BH）法 [177] で false discovery rate（FDR）= 0.05 として計算した q 値を図中に追記する。また [H3] の検証の対象はレーダー注視割合のみであり、M1 と M2 の場合で同時に成り立つ必要はないのでファミリーワイズエラーの調整は行わない。

[H4] の検証では図 6.10 に示すように、振動有り条件から振動無し条件での参加者内比較、すなわち、Haptic-None（表 6.1 中、H-N）、Haptic-Vision（H-V）、VisHap-None（VH-N）、VisHap-Vision（VH-V） の各条件間において、鑑賞体験について尋ねた質問（Q1 または Q2）とプレイヤー体験について尋ねた質問（Q5）を対象とする。[H4] を示すには、鑑賞体験とプレイヤー体験が同時に成り立つ必要がある。表 6.1 に示すように、Q1&Q5 の 2 つの帰無仮説からなるファミリーと、Q2&Q5 の 2 つの帰無仮説からなるファミリーについて、M1・M2 で 1 つずつ、計 4 つのファミリー（M1-Q1∧Q5、M1-Q2∧Q5、M2-Q1∧Q5、M2-Q2∧Q5 と示す）を各条件間で定義した。各ファミリーごとに Holm 法 [106, 107] で p 値の調整を行い、ファミリー内の 2 つの帰無仮説が同時に棄却された場合を$*$、棄却されなかった場合を *n.s.* として表 6.1 に示す。

6.5 考察

実験結果から、提案手法による変調音楽振動刺激によって 3 次元的に動くターゲットの位置情報を伝達できることが示された。その分かりやすさは 3D レーダーを用いた視覚的な方法より劣るものの、両者を組み合わせることでゲーム音楽の鑑賞体験の向上やターゲット探索を容

表 6.1　H4 における同時検定結果

	H-N	H-V	VH-N	VH-V
M1-Q1∧Q5	*n.s.*	*n.s.*	∗	*n.s.*
M1-Q2∧Q5	∗	*n.s.*	∗	*n.s.*
M2-Q1∧Q5	∗	*n.s.*	∗	*n.s.*
M2-Q2∧Q5	∗	*n.s.*	∗	*n.s.*

易にできることが示唆された。以下の小節では 6.1 節で記した仮説に対する考察、実験から得られた知見、および本章の Limitations について記す。

6.5.1　H1：Haptic 対 None

実験結果より [H1] は支持されたと判断する。図 6.6 より、それぞれの項目では Haptic の方が None よりも成功率が高く、成功時間が短く、頭部回転量が少なかった。特に頭部回転量の差異は顕著であり、None では無作為に頭部を動かして探していたのに対し、Haptic では振動刺激による誘導に従ってターゲットを探索できていたことが反映されている、と考えて良いだろう。この傾向はアンケート結果でも同様であり、Q3・Q4 のいずれにもおいても 1 名を除いて Haptic の方を高く評価していた。仮説検定の結果も M2 の達成時間を除いた 9 項目で有意差が出ており、かつ BH 法から導出した q 値も同じ項目で FDR = 0.05 を下回っているため、これら 9 項目は同時に有意差を示す可能性が高い。以上より、提案手法はターゲットの探索に貢献できていたことが示された。

6.5.2　H2：Haptic 対 Vision

実験結果より [H2] は支持されなかったと判断する。図 6.7 から、Haptic は Vision よりも成功率が低く、達成時間は長く、頭部回転量が多かった。また Q3 では 10 名が Vision の方が分かりやすいと回答している。仮説検定の結果も Q4 を除いた 8 項目で有意差が出ており、かつ BH 法から導出した q 値も同じ項目で FDR = 0.05 を下回っているため、これら 8 項目は同時に成り立つ可能性が高い。そのため、位置情報提示の分かりやすさに関して、提案手法は 3D レーダーを用いた視覚化手法には劣ることが示された。

一方、直感的か否かについて尋ねた Q4 では有意差は見られなかった。そのため判断に要する認知的リソースは提案手法と 3D レーダーとで同程度である可能性がある。

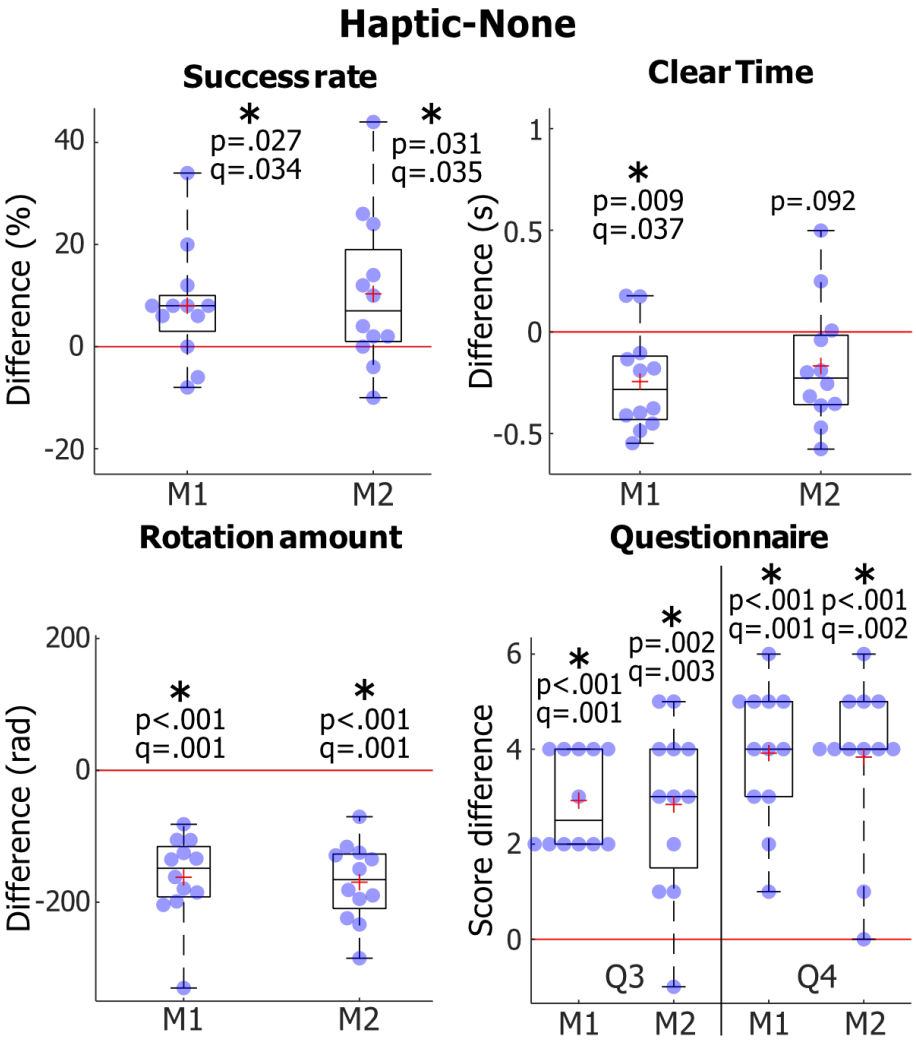

図 6.6　Haptic と None における参加者内比較。正の値は Haptic > None を示す。H1 の検証を目的とする。p 値の上のアスタリスクは有意差を示す。p 値および Q 値の導出は 6.4.8 節参照。

6.5.3　H3：VisHap 対 Vision

実験結果より [H3] は支持されると判断する。図 6.8 より、M2 においても VisHap の方が Vision よりレーダー注視割合が有意に減少していた。よって M2 のような比較的複雑な動き方の場合では、提案手法と 3D レーダーを組み合わせることで、レーダーへの注視時間を減少させられることが示された。以下、VisHap と Vision の比較により得られた知見を記す。

図 6.9 の Q3・Q4 の結果から M1・M2 いずれについても 1 名を除いた参加者が、VisHap の方が Vision よりも同等か分かりやすいと回答しており、提案手法が参加者の探索を妨害する可能性は考慮しなくても良さそうである。また参加者インタビューから、VisHap について 3

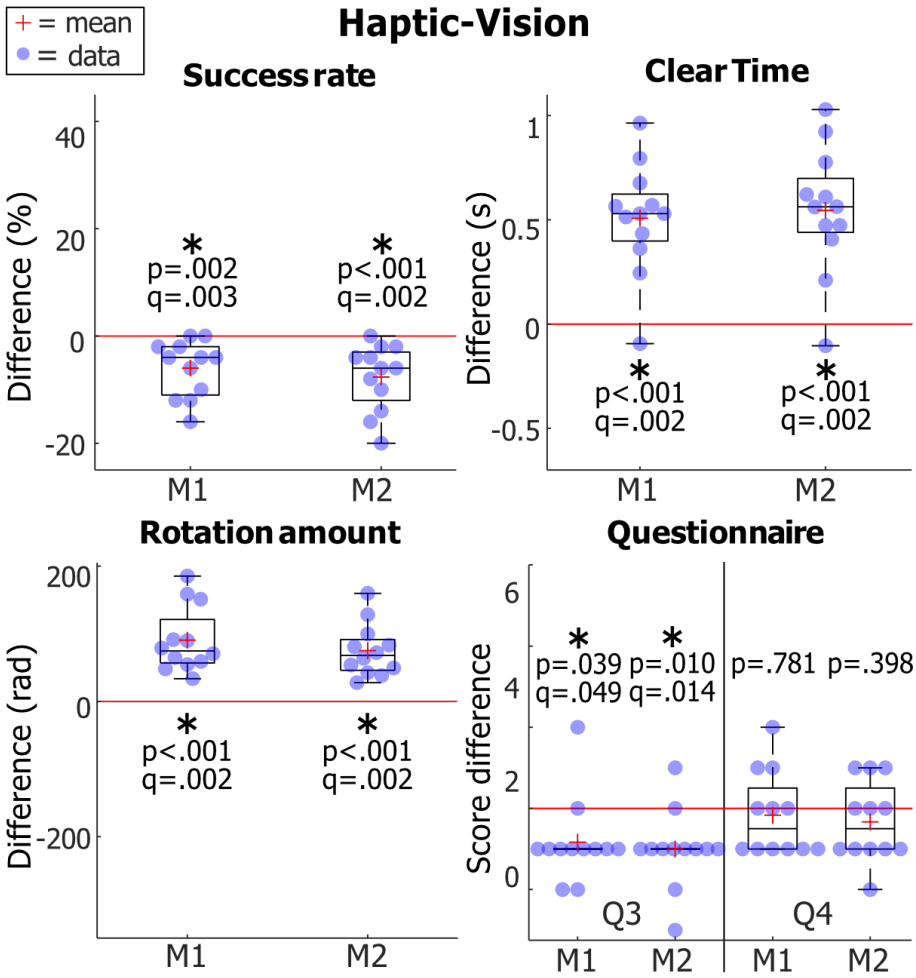

図 6.7　Haptic と Vision における参加者内比較。正の値は Haptic > Vision を示す。H2 の検証を目的とする。

名が「特に上下の判断について、3D レーダーで分かりづらい場合に振動が助けになった」、2 名が「振動で大雑把に場所を把握し、3D レーダーで場所を正確に確認した」とコメントしている。これらにより、変調音楽振動がターゲットの探索に貢献していることが伺える。これは従来の振動触覚キューがタスクパフォーマンスを向上させることをメタ分析した Prewett ら [178] の報告と一致し、音楽振動を触覚キューとして利用することの有用性を支持するものである。

しかし図 6.9 から行動ログについては M2 の場合の頭部回転量以外に有意差は見られず、その効果量も Haptic-None（図 6.6）や Haptic-Vision（図 6.7）の場合と比較すると微々たるものである。この理由として、3D レーダーが情報提示として強力な手法であり、提案手法による触覚刺激の効果が無視されてしまった可能性は十分に考えられる。実際、2 名の参加者は VisHap について「基本的に 3D レーダーを注視しており、触覚はあまり意識していなかった」

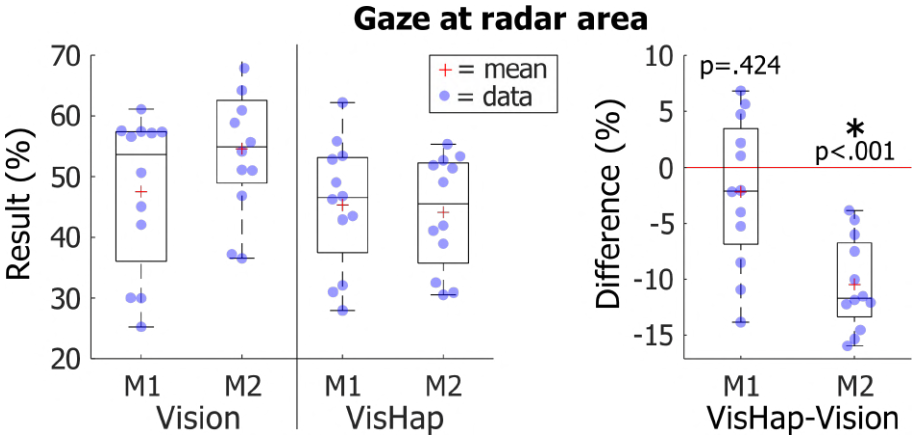

図 6.8　視線に関する実験結果。右のグラフは VisHap と Vision における参加者内比較。H3 の検証を目的とする。

とコメントしていた。一方で、本章の実験環境およびタスクは非常にシンプルであり、参加者は 3D レーダーに注視していてもタスクの実行に支障が無かったため、3D レーダーに依存してしまったことが要因であることも否めない。そのため、3D レーダーの注視時間が長くなるとタスク達成に悪影響が及ぼすようなタスクを適切に設計し評価することで、触覚と視覚による位置提示の相互作用に関する知見をより深められることが期待される。

6.5.4　H4：鑑賞体験とプレイヤー体験の関係

今回の実験では [H4] は適切に検証できなかったと判断する。表 6.1 から、Haptic-None と VisHap-None の組み合わせでは鑑賞体験の向上とプレイヤー体験の向上が両立したが、Haptic-Vision と VisHap-Vision では両立しなかった。もし仮説が正しければ、全ての音楽振動有りと無しの条件間で両立するはずである。図 6.5 から Q5 において、None では他の条件と比べて明らかに得点が低いのに対し、Vision の得点は Haptic や VisHap と同程度であったことから、参加者はプレイヤー体験の評価について、音楽鑑賞体験よりも、ターゲットの探しやすさ、すなわち、シューティングタスクがスムーズに実行できたか、を主軸に判断した可能性が高い。その場合、振動信号にゲーム音楽ではなく、より分かりやすい正弦波を用いると Q5 の評価が向上する可能性も十分考えられるため、ゲーム音楽の鑑賞体験を向上させることでプレイヤー体験の向上を目論む本章の主張を示すことはできない。

音楽鑑賞体験の評価のみに注目すると、図 6.10 の Q1・Q2 の結果から全体的に振動有り条件の方が得点が上回っているものの、Haptic-Vision では M2 の Q2 以外では有意差が認められなかった。これはタスクの難易度、すなわちターゲットの探しやすさが鑑賞体験の評価にも影響したことが考えられる。実際、9 名の参加者から「タスクに集中すると、音楽にあまり集

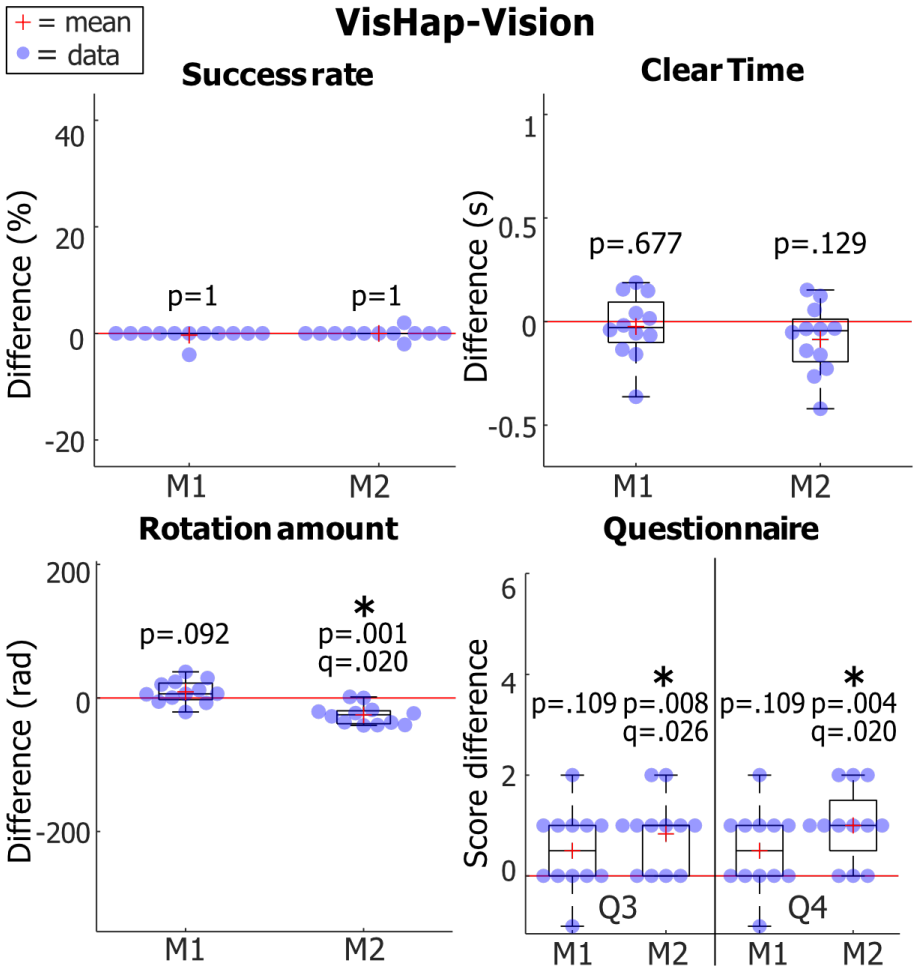

図 6.9　VisHap と Vision における参加者内比較。正の値は Haptic > Vision を示す。

中できなかった。両方に集中するのは難しい」という趣旨のコメントがあり、認知的飽和が起こった結果、Roger ら [174, 173] の研究と同じく音楽に注意が行かなくなってしまった可能性が高い。そのため Haptic-None の Q1・Q2 の結果はタスクの難易度による影響を否定できない。しかし、タスクの難易度が同程度の VisHap-Vision（図 6.9）においても音楽振動がある VisHap の方が有意に得点が高くなっていることから、音楽振動が鑑賞体験の向上に貢献していることは間違いないだろう。

今後の研究で [H4] を評価するのにあたり、Roger らが主研究と同時に行った探索的ケーススタディ [173] が参考になる。彼らは 12 名の参加者に、ゲーム音楽を変更しない条件と、ゲーム内のイベントに応じてゲーム音楽のスピードと音量を変更する条件の 2 つの条件で VR ゲームをプレイさせた。ほとんどの参加者がアダプティブ・ミュージック条件にて BGM により注意を払うようになったことをインタビューで答えていたことから、ゲーム内容と連動した音楽は VR ゲームにおけるプレイヤー体験に影響を及ぼす可能性があることを報告している。そ

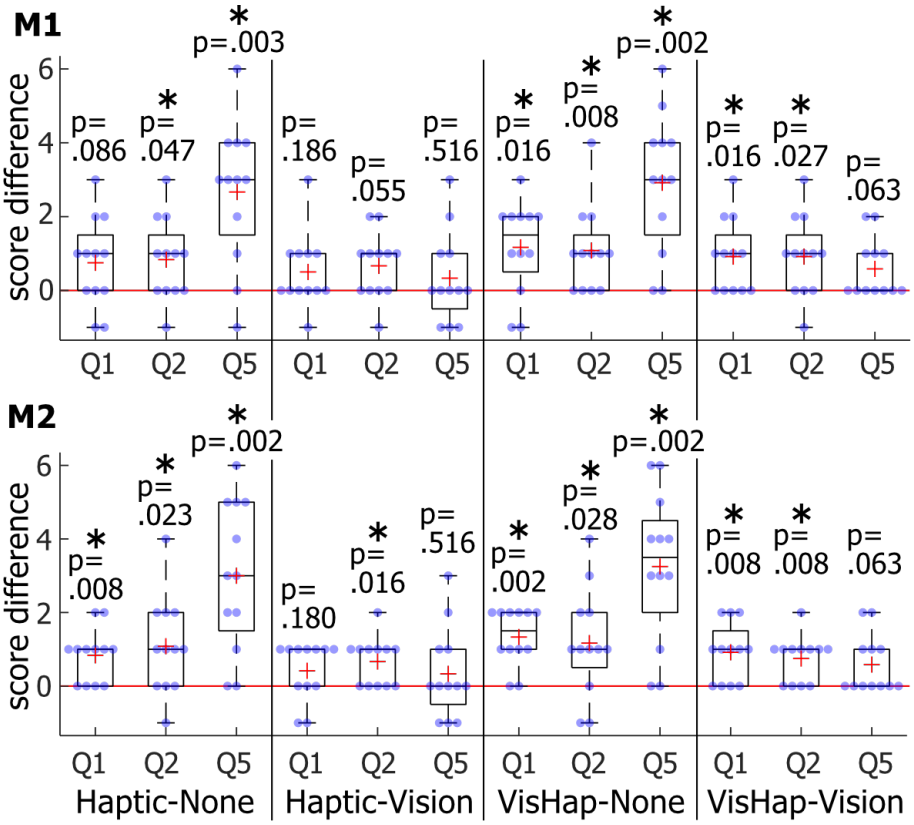

図 6.10　アンケートの Q1・Q2・Q5 に関する参加者内比較。上のグラフは M1、下のグラフは M2 の場合である。H4 の検証を目的とする。

のため、BGM がタスクと直接結びつく、例えば市販されている VR リズムゲームのように、ターゲットが音楽と連動し、リズムとの合致が得点に影響するタスクを設計し再度実験を行うことで、鑑賞体験とプレイヤー体験の関連性を適切に調査できることが期待される。

6.5.5　M1 対 M2：ターゲットの動き方による差異

実験結果より、Vision と Haptic を組み合わせることで、M2 のようなプレイヤーから方向が変わってしまうような動き方の探索が多少容易になると判断する。図 6.11 より、Vision では頭部回転量について、M2 の方が M1 よりも有意に大きいのに対し、VisHap では M1 の方が M2 よりも有意に大きく、3D レーダーのみではターゲットの場所を間違えてしまう場合が多かったことが示唆される。またレーダー注視割合についても Vision では M2 の方が M1 よりも長く、レーダーを見てターゲットの位置を特定するまでにより長い時間を要したことが示唆される。そのため、M2 の場合は 3D レーダーのみだと分かりづらく、提案手法が 3D レーダーを補助する役割を担ったことが示唆された。

しかし Gruenefeld ら [172] は、参加者は M2 の動き方の方が、M1 よりも 3D レーダー上で

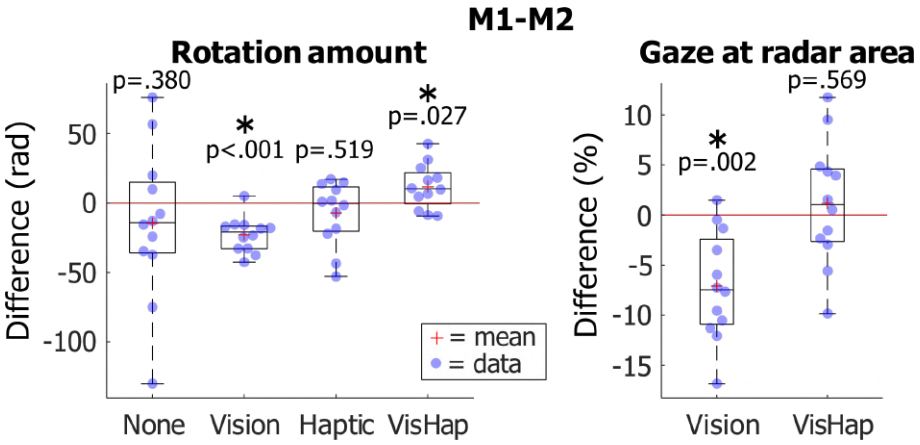

図 6.11　移動方法に関して参加者内比較を行った定量実験結果。6.5.5 節で考察。有意差が見られた項目のみ抜粋、すなわち成功率・達成時間・アンケートの全設問について、どの提示条件でも有意差は見られなかった。

動くターゲットの軌跡をわずかに良く把握できていることを報告しており、本章の Vision の結果と相反する傾向にある。その理由として、彼らの研究では参加者が静止しているのに対し、本章では参加者が素早く頭部を動かすことを求められたため、3D レーダー内のターゲットが素早く動いた結果、M2 による方位角の変化が捉えづらかったことが想定される。

6.5.6　Limitations

VisHap と Vision の比較について、3D レーダーの外観デザインや提示場所、大きさについて吟味が必要である。3 名の参加者はレーダーが邪魔だと明言しており、レーダー上のターゲットの色やレーダーの表示位置について改善することを提案していた。視覚外オブジェクトの描画手法に関するタスク評価や認知負荷などは評価されているが [179]、官能的な評価を行う研究は少なく、更なる検証が行われることが望まれる。さらに言えば、触覚との組み合わせを前提とした場合、3D レーダーが適切であるとは限らない。例えば Jo らが提案した AroundPlot[180] は視界の隅に視覚外オブジェクトを平面的に配置する方法であり、情報量は 3D レーダーより少ないが、触覚刺激と組み合わせることでユーザーへの認知負荷を抑えつつ必要十分な情報が提示できるかもしれない。例えばロボットの遠隔操作の分野で、視覚と触覚を組み合わせた手法が提案されている [181]。そのため、触覚フィードバックの利用を前提とした可視化手法の評価を検討することは有意義である。

今回の実験では提案手法による触覚 3 次元位置提示と音楽鑑賞体験の向上が達成できているかを主眼に置いたため、プレイヤー体験に関する評価は非常に簡便であったことに留意する必要がある。プレイヤー体験に関する評価は色々な方法が提案されている [182, 183, 184, 185] が、このような評価手法を本章のような多数の実験条件全てに対して行うのは、参加者の負担

や他の評価項目への影響を考えると現実的では無かった。そのため、今後の研究として実験条件を VisHap と Vision などに限定し、6.5.4 節で記したように実験タスクの改善を行った上でプレイヤー体験の詳細な評価を行うことが必要である。

6.6　6 章のまとめ

本章では、5 章で示した体感音響による音像定位を 3 次元に拡張可能なことを示すため、ネックレス型とベルト型の Hapbeat を利用した音楽振動変調手法を提案し、VR シューティングゲームを具体例として実験を行い評価した。実験の結果、提案手法により触覚刺激のみで 3 次元空間内を動くターゲットの位置を提示可能であることが示された。また変調音楽振動はシューティングタスク中でもゲーム音楽の鑑賞体験を向上に寄与することが示された。提案手法は 3D レーダーを用いた視覚的な位置提示手法と比較するとターゲットを発見しにくいものの、ターゲットの動きが複雑な場合、両者を組み合わせることで 3D レーダー単体の時よりも発見を容易にし、プレイヤー体験を向上させられることが示唆された。本章により体感音響による 3 次元的な音像定位が示せたことは、ナビゲーションやゲーム文脈でのサウンドスケープ設計の幅を広げることに貢献する。本提案のようなネックレス型とベルト型の併用はモバイル利用からは逸脱してしまうが、将来的に 3 章で提案した機構を用いれば、通常の衣服と変わらない着心地のシャツ型体感音響装置を製作することは可能であり、その際には本章の知見が実用できることが期待される。

第 7 章

結論

本研究ではバーチャル化されたサウンドスケープをより豊かにするため、モバイル環境でも利用できる体感音響装置 Hapbeat を振動生成機構から開発することで実現し、サウンドスケープにおける音楽のグルーヴ感をより高めて楽しむことが出来る場面を拡大した。さらに体感音響による音像定位が可能であることを、Hapbeat と変調音楽振動を用いた位置提示手法の有用性の実証を通して示したことで、音楽のグルーヴ感向上と任意目標の位置情報伝達を両立するサウンドスケープ表現を実現することが出来た。

本研究により、かつて Walkman が音楽を「場所」だけでなく「個々人の聴覚空間」に属させることを容易にしたように、体感音響を伴うサウンドスケープを「個々人の身体」に属させることが容易になった。体感音響は単に音楽のグルーヴ感を高めるだけでなく、本論文で示した音像定位表現のように、様々な形でサウンドスケープを豊かにできる可能性を秘めている。本研究の知見および Hapbeat のような成果物が体感音響の普及を促し、より多くの人々が体感音響に関わることで、サウンドスケープの在り方が発展していくことを期待する。

以下の小節では、本論文のそれぞれの章で得られた知見を記す。

7.1　各章のまとめ

7.1.1　3 章：モーターと糸を用いた張力式振動生成機構

3 章ではモーターと糸を用いた振動生成機構を提案し、その評価のため身体への振動伝達能力を測定したところ、糸を中心に体の広範囲に振動が伝達できていること、低周波（30 Hz）での振動伝達に優れ高周波（150 Hz）でも直動型振動子と同程度の強度で伝達できたことが明らかとなった。また皮膚表面での振動が大きく減衰することが確認され、広範囲へ振動を伝達するためには振動源と身体との接触領域が重要であることが示された。これは提案機構の糸を振動体として利用することで、振動源と身体の接触領域を広げつつ、その糸がモーターボビン

に収容可能であることから、小型かつ広範囲への振動伝達を実現するにあたり提案機構が合理的であることを意味する。また体感音響装置として音楽と合わせて使用した場合も、直動型振動子よりもポジティブな評価をする参加者が多かった。その要因として音楽の低域が十分に出力できたこと、振動が身体の局所的でなく広範囲に伝達されていたことが挙げられる。そのため提案機構の振動伝達特性は体感音響装置に適していることが示された。

一方で、今回の巻き付け方では背面に振動を伝えることができておらず、また身体の形状によっては振動が伝わりにくい領域も確認された。提案機構は糸を巻き付ける構造上、その振動伝達特性は被装着体の形状や粘弾性、摩擦力といった表面特性や糸の張力など多数のパラメータに影響されることが想定される。そのため、入力信号から皮膚表面への振動加速度をモデル化することは極めて困難であり、駆動時に特定領域の振動刺激を厳密に制御することに適した機構とは言えない。

この張力式振動生成機構は衣服・ベルト・リストバンド・シートベルトなど多様な形態の装置に応用することが可能であり、低周波帯を含めた広帯域での振動伝達を身体広範囲に行うことを目的とした力触覚装置を開発する際の有力な候補となる。

7.1.2　4 章：張力式振動生成機構を用いたネックレス型体感音響装置 Hapbeat の開発

4 章では 3 章で提案した張力式振動生成機構を利用して、日常的なモバイルシーンでも利用可能な体感音響装置の設計要件（十分な振動伝達能力・装着の容易さ・低音声ノイズ・低消費電力）を示し、ネックレス型体感音響装置 Hapbeat を開発した。実装にあたり、装着性については 3 章のような胴巻き付け型からネックレス型に変更することで、長さ調整の必要が無く数秒程度で装着でき、装着時の圧迫感や衣服による影響を低減することに成功した。消費電力の抑制には定常張力の発生のためモーターに直流を流す代わりに、ゴム紐と 3 段ボビンを用いた張力維持機構を実装し、モーター 1 つにつき常時 0.11 W 削減することができた。また音声ノイズ対策としては、糸やゴム紐などの被駆動体のガイドに摩擦が小さいテフロンチューブを用い、また駆動回路の出力にローパスフィルタを設けることで、筐体から発生する音声ノイズを 50 dBA 以下に抑えることが出来た。こうした実用化への改善が振動伝達能力に悪影響を及ぼさないかを、身体への伝達振動測定を行い検証したところ、十分な強度の低周波（20 Hz）振動を広範囲に伝達できていることが示され、張力式振動生成機構の特徴を維持していることが確認された。また基礎的な特性として周波数応答や応答時間を測定し、1–470 Hz の範囲では出力振動が大きく減衰せず、応答時間は 2.74 ms 程度でコアレスモーター単体や直動型振動子と遜色ないことが示された。以上により Hapbeat は実用性と体感音響装置としての性能を両立した装置であることが示され、張力式振動生成機構の応用例を示すことが出来た。

一方で身体に伝達された振動は高調波成分を多分に含み、その割合は実験参加者によって異

なる結果となった。ネックレス型は吊り下げ式であるため、糸繰り出し時の筐体の加速度が重力加速度を超えることはないことや、身体との密着度にバラつきが生じやすい。被駆動体とテフロンチューブとの摩擦も無視できず、静止状態からはモーターへの印加電圧が一定値（本稿の場合は 0.61 V）より小さい場合は出力に反映されない。胴巻き付け型との比較は行っていないため 4 章での実装方法がどの程度の影響を及ぼしたかは推測にはなるが、これらが高調波の要因となっていることが考えられる。この高調波による伝達振動の変質が体感音響体験にどの程度影響を及ぼすかは調査が必要である。

このように 4 章で示した一連の設計方法、評価手法および実験から得られた知見は、張力式振動生成機構を用いたネックレス型に限らない多様な形態の装置の開発に貢献するとともに、一般的な装着型力触覚装置を開発する際の参考になることが期待される。

7.1.3 5 章：体感音響による 2 次元音像定位

5 章では体感音響による立体音響表現の中でも 2 次元音像定位に注目し、歩行中のナビゲーションタスクを題材に、目的地までの方向と距離に基づき変調された音楽振動をネックレス型 Hapbeat を用いて首両側面に提示する手法を提案し評価した。まず実験 1 で Hapbeat による音楽振動が歩行動作中でも音楽鑑賞体験の向上に寄与することを確認した。次に実験 2 で正面同定実験を行い提案手法による定位精度を検証したところ、およそ 20°程度の制度でターゲットの方向が可能であり、従来の聴覚的な音楽変調による定位手法と比べても同程度であることが示された。最後に実験 3 で VR 空間内でのナビゲーションタスクを行ったところ、聴覚的な音像定位よりは分かりにくいものの、触覚的な音像定位により参加者を目的地に誘導できることが示された。音楽鑑賞への影響についても聴覚刺激を変調するより触覚刺激を変調する方が実験参加者に好まれる傾向にあった。また音声のみの変調では難しかった距離提示についても、音楽振動変調を行うことで鑑賞体験を損なわずに実現できることが示せた。

一方で提案手法は課題も残る。提案手法では後方で左右の振動を断絶的に切り替えってしまったため、目的地が真後ろ近傍（図 5.1 中の $\theta \simeq \pm 180°$）の状態で首を素早く小刻みに動かしてしまうと疑似的に首の両側面で振動を感じ、前後の判別を誤ってしまう問題がある。また目的地までの距離を表現するため音楽振動を弱くしてしまうと、参加者によっては方向を十分に知覚できなくなっていた。これは振動強度が方向精度に影響されること、すなわち使用者の首の触覚感度や使用者が好みや疲労度に応じて音楽振動を弱くすると定位精度が低下することを示唆している。

以上により提案手法は欠点はあるものの、多くの場合にナビゲーションにおいて十分な 2 次元情報を提供できており、体感音響の活用によりサウンドスケープ表現を拡張できるを示すことができた。この手法は当然ナビゲーションだけではなく、ゲーム・VR・動画鑑賞などの他のアプリケーションにおいて、複雑な環境の中で特定の物体に注意を向ける、近づいてくる人

間の存在を示す、といった活用法が考えられる。特に重要なのは、そういった情報をただ単に提示するのではなく、それらのサウンドスケープを豊かにさせつつ提示できる点である。

7.1.4　6 章：体感音響による 3 次元音像定位

6 章では、5 章で示した体感音響による音像定位を 3 次元に拡張可能なことを示すため、ネックレス型とベルト型の Hapbeat を利用した音楽振動変調手法を提案し、VR シューティングゲームを具体例として実験を行い評価した。また体感音響によるサウンドスケープ表現によって音楽鑑賞体験だけでなく、ゲームプレイにおけるプレイヤー体験も向上すると仮説を立てた。実験の結果、提案手法により変調音楽振動刺激のみで 3 次元空間内を動くターゲットの位置を提示可能であり、変調音楽振動はシューティングタスク中でもゲーム音楽の鑑賞体験を向上に貢献することが示された。提案手法は 3D レーダーを用いた視覚的な位置提示手法と比較するとターゲットを発見しにくいものの、ターゲットの動きが複雑な場合、両者を組み合わせることで 3D レーダー単体の時よりも発見を容易にし、を向上させられることが示唆された。3 次元音像定位が可能となることで、例えば現状の平面ディスプレイの利用を前提とした地図アプリが苦手とする高さ情報を補助的に提示したり、今後の発展が期待される VR 空間において 3 次元的な誘導がしやすくなることで、より立体的な空間設計を行いやすくする、といった応用や効果が期待される。

一方で、本実験ではシューティングタスクの行いやすさに大きく影響されることが示唆され、体感音響の有無との因果関係を示すことはできなかった。これは体感音響で音楽鑑賞体験を向上させても、ゲーム自体の体験に及ぼす影響は小さいこと、言い換えれば、ゲームや映画、観劇など、音楽が「主」では無く「従」の役割を担う場合に、体感音響の効果が必ずしも「主」の体験に大きく貢献するわけではないことが示唆される。また、本手法のようなネックレス型とベルト型の併用は本研究のバーチャルサウンドスケープとの併用を前提としたモバイル環境での利用から逸脱してしまう。このように、体感音響によるサウンドスケープ表現および用途の拡張を行うためには、サウンドスケープとコンテンツの関連性について更なる検証と、装置の発展が必要となる。

7.2　今後の展望

本研究での成果や自身が Hapbeat を利用してきた経験を踏まえ、今後の触覚技術の利用拡大に貢献すると考えられる分野をまとめ、バーチャルサウンドスケープの展望を記す。

7.2.1 体感音響の重要な要素の解明

刺激部位

2.4 節で紹介した通り様々な部位に装着する体感音響装置が提案されているが、提示部位の選定理由はほとんどの場合アプリケーションに対する利便性で決定され、どの部位が音楽振動を提示するのに適しているかを詳細に調査した研究は我々の知る限り存在しない。そもそも、人が現実での体感音響をどの部位で知覚しているかも明確には分かっていない。我々が Hapbeat のデモを通して得られたコメントからの印象では、お腹で感じている人が一番多く、次点で肺、稀に首、と答えていたが、あくまで過去の経験に基づいた発言であり各人の状況も様々であるため、根拠にすることはできない。身体部位ごとに生体組織や形状が異なるため、伝達振動が物理的に異なることも考えられ、音の種類や音楽のジャンルによる差異も影響する可能性がある。

そのため体感音響に適した振動部位を明らかにするためには、まずは統制された実験環境下で人が体感音響をどの部位で知覚されているかを調査し、その部位と体感音響装置での提示部位が合致した方がその人にとって良い体験となるのか、それとは無関係なのか、について一つずつ調査していく必要がある。

波形の忠実性

4 章ではネックレス型 Hapbeat によって伝達される振動が高調波を多く含むことを示したが、これらの高調波が音楽鑑賞体験にどの程度影響するかは未知数である。人の触知覚は聴覚に比べると周波数の識別能力が低く、また高調波は振幅も元波形に比べて低いことから、あまり重要でない可能性が推測される。Balandra ら [186] は数々の実験から、音楽振動の提示において波形の包絡線の立ち上がりの時間同期と包絡線の形状が聴覚と触覚で一致することが肝要であると結論付けている。山口ら [187] は波形信号を時間的に分割し、強度を保ったまま触覚信号の包絡線に変換する Intensity segment modulation 法を提案し、搬送波、すなわち振動子が生成する振動の周波数が一定（[187] では 200 Hz）でも振幅変調のみ行うことで元の波形と同様に知覚可能であることを示した。これらのことを鑑みると、音楽振動の体感は波形の包絡線の形状と時間同期が主要因となっていることが推測される。しかし、これらの研究は指先で行われており、提示部位によっては異なる可能性もある。またこれらの知見は直動型振動子の使用、すなわち伝達振動の周波数帯域が狭いことが前提となっており、1–470 Hz まで十分に知覚可能な強度の振動刺激を生成できる Hapbeat では異なる結果となる可能性もある。

そのため、張力式振動生成機構を用いた振動提示装置でも従来の直動型振動子を用いた知見と同様の結果となるか否かについては検証が必要であり、異なる場合はどの要素が体験に影響するのかを改めて検証すべきである。

聴取者の過去の経験による影響

本研究では聴取者の過去の経験を考慮していないが、この要素が体感音響を伴った音楽聴取中の人の情動（音楽情動）に影響を及ぼす可能性が考えらえる。音楽情動に関する研究をレビューした大村ら [188] は、音楽情動を引き起こす要素について、リズムやメロディ、音楽の構造といった、音楽の音に起因する要素と、その音楽が持つ背景や聴取者の周囲環境、聴取者の好みやそれまでの経験、といった音以外に起因する要素のいずれも重要であることを指摘している。体感音響の音への作用は 2.2、3.1.1 節に記した通り、ラウドネスやリズム感が増強されることで音楽情動に作用していることが考えられる。一方で音以外の要素については、Baumgartner[189] が、音楽が聴取者の記憶を呼び起こす場合に強い情動が生起されることを報告しているように、体感音響が聴取者の過去の体験を呼び起こすことで音楽情動に影響を及ぼすことが考えられる。例えば体感音響装置を用いてクラブミュージックを聴取する場合、過去にクラブに入り浸っていたが、諸事情によりクラブに行くことが難しくなってしまった聴取者は、クラブに行ったことが無い、もしくは現在も日常的にクラブに訪れている聴取者よりも生起される音楽情動は激しいことが推測される。本研究を含め、体感音響の分野では聴取者の過去の体験に焦点を当てた評価は未だ行われていないが、聴取者の経験と体感音響との関連性を検証することで、体感音響が音楽情動に及ぼすメカニズムを探求でき、より効果的な利用方法を提案できるようになることが期待される。

こうした検証は体感音響装置の設計や使用者への訴求において重要な指針となり、今後の開発や利用拡大に大きく貢献することが期待される。

7.2.2　音楽が従属的であるコンテンツにおける体感音響の影響の検証

本研究ではサウンドスケープのうち音楽に焦点を当てて評価を行ったが、音楽はあらゆる環境やコンテンツで存在しており、従属的な役割を果たす場合が多い。しかし 6 章の実験結果で示唆されたように、従属的なサウンドスケープで体感音響を用いても音楽鑑賞体験を向上させることができるが、主となる体験への影響は限定的である可能性は否定できない。当然音楽の関わり方は様々であり、従属的といってもその重要性は場合において様々である。例えばゲームというジャンルにおいても、音楽に合わせてリズムを刻むようなリズムゲームの方が、ドライビングゲームのような音楽とゲームのタスクが直接関係ないゲームよりも、音楽の重要性が高いことが推測される。また 6.2.2 節に記した通り、自身の周囲 360°がゲーム内の空間となる VR ゲームと平面的なディスプレイでプレイする PC ゲームでは音楽の影響が異なることが報告されているように、コンテンツの表示形態によっても差異が生じる可能性が高い。そのため今後体感音響をより有効に活用するためには、まずは音楽が従属的に利用される環境やコン

テンツにおける音楽の重要度を様々な角度から定量化し、その重要度がどの程度であれば体感音響の利用が有用であるかを評価する必要がある。これにより環境設計者やコンテンツ制作者が体感音響の導入を検討するための指針となることが期待される。

7.2.3 着心地の良い衣服型体感音響装置

本研究では張力型振動生成機構の具体例としてネックレス型装置 Hapbeat の実装を示した。Hapbeat はモバイル利用での体感音響装置として優れた装置であると自負しているが、振動伝達範囲が胸部から首周りに限定される。3.1.2 で記した通り、理想的には身体全体に振動伝達を行える衣服形状の方が望ましい。服型形状の体感音響装置は既に数多く提案されているが、振動子を用いると接触面が硬く、柔軟性が悪くなり、到底普段から着衣できる着心地では無くなってしまう。しかし張力型振動生成機構であれば振動伝達は糸を媒介として行うことができ、アクチュエータや駆動回路をズボンベルトとして集約できれば、通常の衣服と同様の着心地かつ同様に洗濯などの取扱いが可能な、全身型体感音響装置の実現が可能である。そのような装置が実現できれば体感音響効果の向上は元より、6 章で示したような 3 次元的な情報提示や、腕や脚などへの局所的な振動伝達も実現でき、非常に汎用性が高く豊かな表現が単一の装置で可能となる。

7.2.4 張力式振動提示装置の音楽以外への応用

本研究で提案した張力式振動生成機構およびそれを利用した Hapbeat は音楽振動提示に優れているが、4 章で示した通り周波数帯域が広く応答性に優れており、音楽以外の触覚表現での活用にも有用である。例えば人の声を振動として提示することで聴触覚統合が起こり、声を聞き取りやすくなることが想定され、講義時の講師の声に注意を向けさせることによる学習効果の向上や、トーク形式のラジオやインターネット配信の聴取体験を向上させることが見込める。また早い応答性と数 10 mm ほどの大きな振幅を生じさせられることから、打感や衝撃感といった触覚刺激の提示に優れており、花火や銃声、爆撃音のようなサウンドスケープ表現や、人に叩かれたり銃で撃たれるといった受動的な感覚を提示するのに適しており、特に 1 人称視点が前提となる VR コンテンツ（VRSNS や VR ゲームなど）の体験向上に大きく貢献することが期待される。

重要なのは張力式振動生成機構を用いた装置では音楽に加えて上述のような表現を同一装置で実現できること、すなわち汎用的な利用が可能であることである。今後、装置の開発改良と合わせて音楽以外への効果的な応用方法を開拓していくことで、触覚デバイスにおけるスマートフォンのような多用途の触覚デバイスの実現が期待でき、触覚技術の利用拡大に大きく貢献することが期待される。

7.2.5　バーチャルサウンドスケープの展望

バーチャルサウンドスケープは今後、触覚刺激を前提としたものに発展していくことが予想される。1.1.3 節でも述べた通り、聴覚によるバーチャルサウンドスケープはそのほとんどの技術がコモディティ化しており、Walkman が登場した時のような変革が早々に起こるとは想像しにくい。ただし、Bluetooth Audio の次世代規格 LE Audio による 1：n 通信を可能とする Auracast[*1] は、体感音響装置の普及を劇的に促進させるポテンシャルを有している。現状の Bluetooth Audio では、標準的には送信側と受信側は 1：1 でのみ接続されるため、体感音響装置の使用にあたり、ワイヤレスイヤホンとの併用は難しい。しかし Auracast は 1：n 通信であり、一般的なスマートフォン・ワイヤレスイヤホンと体感音響装置の併用が「標準的に行える」ようになることは、一般消費者への体感音響装置の普及、という観点での影響は非常に大きい。

映画の登場以来、映像を演出することを目的とした、自然そうに聞こえる不自然なサウンドスケープ表現—例えば、山中の場面では実際に鳴いていなくても鳥のさえずりを入れたり、格闘シーンでは殴打に合わせて効果音を挿入するなど—が発展し、実体験が無い人にとっては映像の中のサウンドスケープこそが自然だと感じられる場合もあるだろう。こうしたサウンドスケープの発展には、映画館やテレビ、スマートフォンなどの再生装置が普及し、製作した映像作品を大衆が容易に享受できる環境が整っていることが大きい。そのため、Hapbeat のような体感音響装置を身に着けるのが今日のワイヤレスイヤホンのように珍しく無くなり、体感音響の享受が普遍的になることで、触覚刺激の存在が次第にサウンドスケープ表現に影響を及ぼし、より良い体験を求めて音楽や音環境の作り方が異なっていくことが予想される。本研究を足掛かりに、自然さとは別軸の、人間による人間のためのバーチャルなサウンドスケープが今後発展していくことが期待される。

[*1] https://www.bluetooth.com/auracast/

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々によるご指導、ご協力をいただきました。修士課程から長きにわたりご指導いただきました、指導教員の長谷川晶一准教授に心より感謝いたします。装置開発や研究の進め方、研究者としての心構えなど、数多くのことを学ばせていただきました。また研究成果の製品化のため起業した Hapbeat 合同会社においても、共同創業者として製品開発や顧客選定、企業戦略など様々な事柄について議論していただきました。

三武裕玄助教（現明治大学准教授）には研究の相談は元より、それ以外の様々な事柄について議論や雑談にお付き合いいただき、色々な気付きを得たり精神的に支えていただきました。改めて感謝いたします。

審査員の中本高道教授、小池泰晴教授、吉村奈津江准教授、渡辺義浩准教授には本論文のご精読および審査を通して多くの貴重なご意見をいただきました。誠に感謝いたします。

グローバルリーダー教育院では金銭的な援助に加え、研究成果を社会実装するために必要な多くのことを体験させていただきました。そのオフキャンパス実習にて、白井暁彦ディレクターには REALITY 株式会社研究所の GREE VR Studio Laboratory でリサーチインターンとして受け入れていただき、企業内での研究の進め方や特許申請、多様な人々とのプロジェクトの実践など、数多くの貴重な経験をさせていただき多くの学びを得ることが出来ました。深く感謝申し上げます。

本研究では多くの方に実験に参加いただき、貴重な実験データを得ることができました。皆さまのご協力に感謝いたします。

また私の研究生活を彩り心の支えとなるコンテンツを提供していただいたアニメ・ゲーム・漫画・音楽・ニコニコ動画のクリエイターの方々、および埼玉西武ライオンズの選手・スタッフの皆様に日々感謝しております。

最後に、博士課程に進むことに背中を押していただき、学部時代から長きにわたり金銭的な援助および暖かく見守っていただきました両親に心からの感謝とお礼を申し上げ、謝辞を締めさせていただきます。皆さま、本当にありがとうございました。

参考文献

[1] A. Dos Santos, E. Fortunato, R. Martins, H. Águas, and R. Igreja, "Transduction mechanisms, micro-structuring techniques, and applications of electronic skin pressure sensors: a review of recent advances," *Sensors*, vol. 20, no. 16, p. 4407, 2020.

[2] Vallbo, AB and Olausson, H and Wessberg, J and Kakuda, N, "Receptive field characteristics of tactile units with myelinated afferents in hairy skin of human subjects." *The Journal of physiology*, vol. 483, no. 3, pp. 783–795, 1995.

[3] R. S. Johansson and Å. B. Vallbo, "Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand," *Trends in neurosciences*, vol. 6, pp. 27–32, 1983.

[4] F. Mancini, A. Bauleo, J. Cole, F. Lui, C. A. Porro, P. Haggard, and G. D. Iannetti, "Whole-body mapping of spatial acuity for pain and touch," *Annals of neurology*, vol. 75, no. 6, pp. 917–924, 2014.

[5] G. Corniani and H. P. Saal, "Tactile innervation densities across the whole body," *Journal of Neurophysiology*, vol. 124, no. 4, pp. 1229–1240, 2020.

[6] R. T. Verrillo, "Vibration sensation in humans," *Music Perception*, vol. 9, no. 3, pp. 281–302, 1992.

[7] C. Branje and D. I. Fels, "Playing vibrotactile music: A comparison between the vibrochord and a piano keyboard," *International journal of human-computer studies*, vol. 72, no. 4, pp. 431–439, 2014.

[8] 花光宣尚, 田井秀昭, 元木龍也, 佐藤文彦, 清水啓太郎, 神山洋一, 南澤孝太, evala, and 水口哲也, "Synesthesia x1-2.44: 聴覚・触覚・視覚を活用した共感覚体験装置," **日本バーチャルリアリティ学会論文誌**, vol. 27, no. 1, pp. 51–64, 2022.

[9] University of Southampton, "Vibration test facilities of the Human Factors Research Unit," https://cdn.southampton.ac.uk/assets/imported/transforms/content-block/UsefulDownloads_Download/64625BDFAAAE40F7BF130EDF95BA0BFC/HFRU_lab_Facilities_brochure_ElectroDynamic_small.pdf, (Accessed Feb. 11, 2023).

[10] 360 DomeXperience, "Vibrating floor," http://360domexperience.nl/vibrating-floor, (Ac-

cessed Feb. 11, 2023).

[11] Inner Soulutions LLC., “Innersoul tranquility liquid sound table,” https://innersoulutions.com/sound-massage-tables/innersoul-tranquility-liquid-sound-table/, (Accessed Feb. 11, 2023).

[12] L. Turchet and M. Barthet, “Demo of interactions between a performer playing a smart mandolin and audience members using musical haptic wearables.” in *NIME*, 2018, pp. 82–83.

[13] T. Georgiou, S. Holland, J. van der Linden, *et al.*, “Rhythmic haptic cueing for gait rehabilitation of people with hemiparesis: Quantitative gait study,” *JMIR Biomedical Engineering*, vol. 5, no. 1, p. e18649, 2020.

[14] A. Mazzoni and N. Bryan-Kinns, “Mood glove: A haptic wearable prototype system to enhance mood music in film,” *Entertainment Computing*, vol. 17, pp. 9–17, 2016.

[15] L. Boer, B. Cahill, and A. Vallgårda, “The hedonic haptics player: a wearable device to experience vibrotactile compositions,” in *Proceedings of the 2017 ACM Conference Companion Publication on Designing Interactive Systems*, 2017, pp. 297–300.

[16] SUBPAC INC., “Subpac - the new way to experience sound: Feel it.” https://subpac.com/, (Accessed Feb. 11, 2023).

[17] Woojer USA Inc., “Woojer,” https://www.woojer.com/, (Accessed Feb. 11, 2023).

[18] Y. Konishi, N. Hanamitsu, B. Outram, K. Minamizawa, A. Sato, and T. Mizuguchi, “Synesthesia suit,” in *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, 2016, pp. 149–149.

[19] 日本サウンドスケープ協会, “協会の活動からみるサウンドスケープの世界,” https://www.soundscape-j.org/soundscape.html, (Accessed Feb. 11, 2023).

[20] W. S. Project and e. Barry Truax, *The World Soundscape Project’s Handbook for Acoustic Ecology.*, ser. The Music of the Environment Series; No. 5. A.R.C. Publications, 1978.

[21] R. マリー・シェーファー, 訳 鳥越けい子他, **世界の調律: サウンドスケープとはなにか**. 平凡社, 1986, 原著 Schafer, R. Murray. The tuning of the world. ニューヨーク, Knopf, 1977.

[22] M. P. Philippot, “Observations on sound volume and music listening,” *New Patterns ofMusical Behavior*, 1974.

[23] S. C. Jones and T. G. Schumacher, “Muzak: On functional music and power,” *Critical Studies in Media Communication*, vol. 9, no. 2, pp. 156–169, 1992.

[24] R. E. Milliman, “Using background music to affect the behavior of supermarket shoppers,” *Journal of marketing*, vol. 46, no. 3, pp. 86–91, 1982.

[25] プライムオンライン編集部, “「ポポーポポポポ...」スーパーで流れる“あの曲”には隠され

た効果がある説が話題…専門家に聞いた," https://www.fnn.jp/articles/-/10243, (Accessed Feb. 11, 2023).

[26] Felix Richter, "The History of Portable Music," https://www.statista.com/chart/18555/portable-music-milestones/, (Accessed Feb. 11, 2023).

[27] G. Haas, E. Stemasov, and E. Rukzio, "Can't you hear me? investigating personal soundscape curation," in *Proceedings of the 17th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, 2018, pp. 59–69.

[28] 投野耕治, "ヘッドホン技術動向," *JAS Journal 2013*, vol. 53, no. 6, pp. 20–24, 2013.

[29] C. W. Robert Treggs, "A little history of bluetooth," https://www.androidauthority.com/history-bluetooth-explained-846345/, (Accessed Feb. 11, 2023).

[30] D. Pascua, "The fascinating history of noise-cancelling headphones," https://www.headphonesty.com/2020/10/history-of-noise-cancelling-headphones/, (Accessed Feb. 11, 2023).

[31] 飯田一博, **頭部伝達関数の基礎と *3* 次元音響システムへの応用**, ser. 音響テクノロジーシリーズ. コロナ社, 2017.

[32] T. Oohashi, E. Nishina, M. Honda, Y. Yonekura, Y. Fuwamoto, N. Kawai, T. Maekawa, S. Nakamura, H. Fukuyama, and H. Shibasaki, "Inaudible high-frequency sounds affect brain activity: hypersonic effect," *Journal of neurophysiology*, 2000.

[33] T. Oohashi, N. Kawai, E. Nishina, M. Honda, R. Yagi, S. Nakamura, M. Morimoto, T. Maekawa, Y. Yonekura, and H. Shibasaki, "The role of biological system other than auditory air-conduction in the emergence of the hypersonic effect," *Brain research*, vol. 1073, pp. 339–347, 2006.

[34] T. Schäfer, P. Sedlmeier, C. Städtler, and D. Huron, "The psychological functions of music listening," *Frontiers in psychology*, vol. 4, p. 511, 2013.

[35] "Live music industry revenue worldwide from 2014 to 2024," https://www.statista.com/statistics/1096424/live-music-industry-revenue-worldwide/, Statista gmbh, April 2021.

[36] S. C. Brown and D. Knox, "Why go to pop concerts? the motivations behind live music attendance," *Musicae Scientiae*, vol. 21, no. 3, pp. 233–249, 2017.

[37] M. S. Minor, T. Wagner, F. Brewerton, and A. Hausman, "Rock on! an elementary model of customer satisfaction with musical performances," *Journal of services marketing*, 2004.

[38] M. Reybrouck, P. Podlipniak, and D. Welch, "Music and noise: Same or different? what our body tells us," *Frontiers in psychology*, vol. 10, p. 1153, 2019.

[39] VIBRAC, "What is vibroacoustic therapy?" https://www.vibrac.fi/vibroacoustic-therapy/, (Accessed Feb. 11, 2023).

[40] A. L. Wigram, "The effects of vibroacoustic therapy on clinical and non-clinical popula-

tions," Ph.D. dissertation, University of London London, 1996.

[41] M. H. Kvam, "The effect of vibroacoustic therapy," *Physiotherapy*, vol. 83, no. 6, pp. 290–295, 1997.

[42] S. Merchel and M. E. Altinsoy, "Auditory-tactile experience of music," in *Musical Haptics*. Springer, Cham, 2018, pp. 123–148.

[43] M. J. Hove, S. A. Martinez, and J. Stupacher, "Feel the bass: Music presented to tactile and auditory modalities increases aesthetic appreciation and body movement." *Journal of Experimental Psychology: General*, vol. 149, no. 6, p. 1137, 2020.

[44] S. Hashizume, S. Sakamoto, K. Suzuki, and Y. Ochiai, "Livejacket: Wearable music experience device with multiple speakers," in *International Conference on Distributed, Ambient, and Pervasive Interactions*. Springer, 2018, pp. 359–371.

[45] T. Iwamoto, M. Tatezono, and H. Shinoda, "Non-contact method for producing tactile sensation using airborne ultrasound," in *Haptics: Perception, Devices and Scenarios: 6th International Conference, EuroHaptics 2008 Madrid, Spain, June 10-13, 2008 Proceedings 6*. Springer, 2008, pp. 504–513.

[46] Weber, E.H. (D.J. Murray, H.E. Ross, & E.H. Weber, Eds.) (1st ed.), "E.h. weber on the tactile senses," 1834/1996.

[47] S. Weinstein, "Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex and laterality," *The skin senses*, 1968.

[48] M. Morioka, D. J. Whitehouse, and M. J. Griffin, "Vibrotactile thresholds at the fingertip, volar forearm, large toe, and heel," *Somatosensory & motor research*, vol. 25, no. 2, pp. 101–112, 2008.

[49] D. A. Mahns, N. Perkins, V. Sahai, L. Robinson, and M. Rowe, "Vibrotactile frequency discrimination in human hairy skin," *Journal of neurophysiology*, vol. 95, no. 3, pp. 1442–1450, 2006.

[50] H. A. Hamalainen, S. Warren, and E. P. Gardner, "Differential sensitivity to airpuffs on human hairy and glabrous skin," *Somatosensory research*, vol. 2, no. 4, pp. 281–302, 1985.

[51] D. Derrick and B. Gick, "Aerotactile integration from distal skin stimuli," *Multisensory research*, vol. 26, no. 5, pp. 405–416, 2013.

[52] 古川正紘, 永谷直久, 橋本悠希, 梶本裕之, 稲見昌彦, "皮膚有毛部の体毛を介した振動感受特性," **日本バーチャルリアリティ学会論文誌**, vol. 14, no. 4, pp. 511–520, 2009.

[53] D. Schmidt, G. Schlee, A. M. Germano, and T. L. Milani, "Larger contactor area increases low-frequency vibratory sensitivity in hairy skin," *PeerJ*, vol. 8, p. e8479, 2020.

[54] G. A. Gescheider, S. J. Bolanowski Jr, R. T. Verrillo, D. J. Arpajian, and T. F. Ryan, "Vibrotactile intensity discrimination measured by three methods," *The Journal of the Acoustical*

Society of America, vol. 87, no. 1, pp. 330–338, 1990.

[55] N. G. Forta, M. J. Griffin, and M. Morioka, "Difference thresholds for vibration of the foot: Dependence on frequency and magnitude of vibration," *Journal of sound and vibration*, vol. 330, no. 4, pp. 805–815, 2011.

[56] H. C. Stronks, D. J. Parker, J. Walker, P. Lieby, and N. Barnes, "The feasibility of coin motors for use in a vibrotactile display for the blind," *Artificial organs*, vol. 39, no. 6, pp. 480–491, 2015.

[57] V. A. Shah, M. Casadio, R. A. Scheidt, and L. A. Mrotek, "Vibration propagation on the skin of the arm," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 20, p. 4329, 2019.

[58] W. J. Pielemeier, N. C. Otto, R. C. Meier Jr, and V. Jeyabalan, "Just-noticeable differences in vertical vibration for seated subjects," Ph.D. dissertation, Acoustical Society of America, 1997.

[59] M. A. Bellmann, "Perception of whole-body vibrations: From basic experiments to effects of seat and steering-wheel vibrations on the passenger ʻs comfort inside vehicles," Ph.D. dissertation, Carl von Ossietzky University Oldenburg, 2002.

[60] Y. Matsumoto, S. Maeda, and Y. Oji, "Influence of frequency on difference thresholds for magnitude of vertical sinusoidal whole-body vibration," *Industrial Health*, vol. 40, no. 4, pp. 313–319, 2002.

[61] M. Morioka and M. J. Griffin, "Difference thresholds for intensity perception of whole-body vertical vibration: Effect of frequency and magnitude," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 107, no. 1, pp. 620–624, 2000.

[62] D. Czopek and J. Wiciak, "Vibrotactile frequency discrimination on the wrist of visually impaired people," *Journal of Vibroengineering*, vol. 21, no. 8, pp. 2242–2249, 2019.

[63] C. Branje, M. Maksimouski, M. Karam, D. I. Fels, and F. Russo, "Vibrotactile display of music on the human back," in *Advances in Computer-Human Interactions, 2010. ACHI'10. Third International Conference on*. IEEE, 2010, pp. 154–159.

[64] S. Merchel and M. E. Altinsoy, "Psychophysical comparison of the auditory and tactile perception: a survey," *Journal on Multimodal User Interfaces*, vol. 14, no. 3, pp. 271–283, 2020.

[65] C. Kayser, C. I. Petkov, M. Augath, and N. K. Logothetis, "Integration of touch and sound in auditory cortex," *Neuron*, vol. 48, no. 2, pp. 373–384, 2005.

[66] G. Caetano and V. Jousmäki, "Evidence of vibrotactile input to human auditory cortex," *Neuroimage*, vol. 29, no. 1, pp. 15–28, 2006.

[67] M. Schürmann, G. Caetano, Y. Hlushchuk, V. Jousmäki, and R. Hari, "Touch activates human auditory cortex," *Neuroimage*, vol. 30, no. 4, pp. 1325–1331, 2006.

[68] V. Occelli, C. Spence, and M. Zampini, "Audiotactile interactions in temporal perception," *Psychonomic bulletin & review*, vol. 18, no. 3, pp. 429–454, 2011.

[69] M. Miyazaki, H. Kadota, K. S. Matsuzaki, S. Takeuchi, H. Sekiguchi, T. Aoyama, and T. Kochiyama, "Dissociating the neural correlates of tactile temporal order and simultaneity judgements," *Scientific reports*, vol. 6, no. 1, pp. 1–10, 2016.

[70] W. Fujisaki and S. Nishida, "Audio–tactile superiority over visuo–tactile and audio–visual combinations in the temporal resolution of synchrony perception," *Experimental brain research*, vol. 198, no. 2, pp. 245–259, 2009.

[71] J.-P. Noel, M. T. Wallace, E. Orchard-Mills, D. Alais, and E. Van der Burg, "True and perceived synchrony are preferentially associated with particular sensory pairings," *Scientific Reports*, vol. 5, no. 1, pp. 1–8, 2015.

[72] C. Bernard, J. Monnoyer, M. Wiertlewski, and S. Ystad, "Rhythm perception is shared between audio and haptics," *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, pp. 1–12, 2022.

[73] M. Daub and M. E. Altinsoy, "Audiotactile simultaneity perception of musical-produced whole-body vibrations," in *Proceedings of the Joint Congress CFA/DAGA*, 2004.

[74] A. Balandra and S. Hasegawa, "Sensitivity to haptic-audio envelope asynchrony," *arXiv preprint arXiv:1906.11571*, 2019.

[75] H. Gillmeister and M. Eimer, "Tactile enhancement of auditory detection and perceived loudness," *Brain research*, vol. 1160, pp. 58–68, 2007.

[76] M. Schürmann, G. Caetano, V. Jousmäki, and R. Hari, "Hands help hearing: facilitatory audiotactile interaction at low sound-intensity levels," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 115, no. 2, pp. 830–832, 2004.

[77] T. Ro, J. Hsu, N. E. Yasar, L. Caitlin Elmore, and M. S. Beauchamp, "Sound enhances touch perception," *Experimental brain research*, vol. 195, no. 1, pp. 135–143, 2009.

[78] E. C. Wilson, C. M. Reed, and L. D. Braida, "Integration of auditory and vibrotactile stimuli: Effects of frequency," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 127, no. 5, pp. 3044–3059, 2010.

[79] G. Simon, S. Olive, and T. Welti, "The effect of whole-body vibration on preferred bass equalization in automotive audio systems," in *Audio Engineering Society Convention 127*. Audio Engineering Society, 2009.

[80] S. Merchel, A. Schwendicke, and M. Altinsoy, "Feeling the sound: audio-tactile intensity perception," in *Proceedings of 2nd Polish-German Structured Conference on Acoustics, The 58th Open Seminar on Acoustics (Jurata, Poland)*, 2011.

[81] J. G. Burton, D. T. Murphy, and J. S. Brereton, "Perception of low frequency content of amplified music in arenas and open-air music festivals," in *Audio Engineering Society Con-*

ference: 2017 AES International Conference on Sound Reinforcement–Open Air Venues. Audio Engineering Society, 2017.

[82] J. M. Yau, J. B. Olenczak, J. F. Dammann, and S. J. Bensmaia, "Temporal frequency channels are linked across audition and touch," *Current biology*, vol. 19, no. 7, pp. 561–566, 2009.

[83] J. M. Yau, A. I. Weber, and S. J. Bensmaia, "Separate mechanisms for audio-tactile pitch and loudness interactions," *Frontiers in psychology*, vol. 1, p. 160, 2010.

[84] L. E. Crommett, A. Pérez-Bellido, and J. M. Yau, "Auditory adaptation improves tactile frequency perception," *Journal of neurophysiology*, vol. 117, no. 3, pp. 1352–1362, 2017.

[85] S. C. Aker, H. Innes-Brown, K. F. Faulkner, M. Vatti, and J. Marozeau, "Effect of audio-tactile congruence on vibrotactile music enhancement," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 152, no. 6, pp. 3396–3409, 2022.

[86] J. Huang, D. Gamble, K. Sarnlertsophon, X. Wang, and S. Hsiao, "Feeling music: integration of auditory and tactile inputs in musical meter perception," *PloS one*, vol. 7, no. 10, p. e48496, 2012.

[87] B. Remache-Vinueza, A. Trujillo-León, M. Zapata, F. Sarmiento-Ortiz, and F. Vidal-Verdú, "Audio-tactile rendering: a review on technology and methods to convey musical information through the sense of touch," *Sensors*, vol. 21, no. 19, p. 6575, 2021.

[88] S. D. Smith, "Characterizing the effects of airborne vibration on human body vibration response." *Aviat Space Environ Med.*, vol. 73, no. 1, pp. 36–45, 2002.

[89] I. ZyTrax, "Tech stuff - frequency ranges," https://www.zytrax.com/tech/audio/audio.html, (Accessed Feb. 11, 2023).

[90] M. J. Hove, C. Marie, I. C. Bruce, and L. J. Trainor, "Superior time perception for lower musical pitch explains why bass-ranged instruments lay down musical rhythms," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111, no. 28, pp. 10 383–10 388, 2014.

[91] R. Näätänen, P. Paavilainen, T. Rinne, and K. Alho, "The mismatch negativity (mmn) in basic research of central auditory processing: a review," *Clinical neurophysiology*, vol. 118, no. 12, pp. 2544–2590, 2007.

[92] T. Lenc, P. E. Keller, M. Varlet, and S. Nozaradan, "Neural tracking of the musical beat is enhanced by low-frequency sounds," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115, no. 32, pp. 8221–8226, 2018.

[93] E. Van Dyck, D. Moelants, M. Demey, A. Deweppe, P. Coussement, and M. Leman, "The impact of the bass drum on human dance movement," *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, vol. 30, no. 4, pp. 349–359, 2012.

[94] O. Senn, T. Bechtold, D. Rose, G. S. Câmara, N. Düvel, R. Jerjen, L. Kilchenmann,

F. Hoesl, A. Baldassarre, and E. Alessandri, "Experience of groove questionnaire: Instrument development and initial validation," *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, vol. 38, no. 1, pp. 46–65, 2020.

[95] S. Merchel and M. E. Altinsoy, "Music-induced vibrations in a concert hall and a church," *Archives of Acoustics*, vol. 38, 2013.

[96] V. Yem, R. Okazaki, and H. Kajimoto, "Vibrotactile and pseudo force presentation using motor rotational acceleration," in *2016 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*. IEEE, 2016, pp. 47–51.

[97] Sofia, Katherine O and Jones, Lynette, "Mechanical and psychophysical studies of surface wave propagation during vibrotactile stimulation," *IEEE transactions on haptics*, vol. 6, no. 3, pp. 320–329, 2013.

[98] R. Sakuragi, S. Ikeno, R. Okazaki, and H. Kajimoto, "Collarbeat: whole body vibrotactile presentation via the collarbone to enrich music listening experience," in *Proceedings of the 25th International Conference on Artificial Reality and Telexistence and 20th Eurographics Symposium on Virtual Environments*. Citeseer, 2015, pp. 141–146.

[99] Y. Kurihara, M. Koge, R. Okazaki, and H. Kajimoto, "Large-area tactile display using vibration transmission of jammed particles," in *2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*. IEEE, 2014, pp. 313–318.

[100] A. Withana, S. Koyama, D. Saakes, K. Minamizawa, M. Inami, and S. Nanayakkara, "Rippletouch: initial exploration of a wave resonant based full body haptic interface," in *Proceedings of the 6th Augmented Human International Conference*, 2015, pp. 61–68.

[101] W. H. Talbot, I. Darian-Smith, H. H. Kornhuber, and V. B. Mountcastle, "The sense of flutter-vibration: comparison of the human capacity with response patterns of mechanoreceptive afferents from the monkey hand." *Journal of neurophysiology*, vol. 31, no. 2, pp. 301–334, 1968.

[102] R. T. Verrillo, "Vibrotactile thresholds for hairy skin." *Journal of experimental psychology*, vol. 72, no. 1, p. 47, 1966.

[103] A. Komatsu, "Method for expressing vibratory music and apparatus therefor," Apr. 9 2002, uS Patent 6,369,312.

[104] Y. Kojima, "Portable body-felt vibration system," Jan. 20 2005, uS Patent App. 10/288,671.

[105] P. J. Veazie, "When to combine hypotheses and adjust for multiple tests," *Health services research*, vol. 41, no. 3p1, pp. 804–818, 2006.

[106] S. Holm, "A simple sequentially rejective multiple test procedure," *Scandinavian journal of statistics*, pp. 65–70, 1979.

[107] M. Aickin and H. Gensler, "Adjusting for multiple testing when reporting research results:

the bonferroni vs holm methods." *American journal of public health*, vol. 86, no. 5, pp. 726–728, 1996.

[108] T. J. Moore, "A survey of the mechanical characteristics of skin and tissue in response to vibratory stimulation," *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 79–84, 1970.

[109] B. Dandu, Y. Shao, A. Stanley, and Y. Visell, "Spatiotemporal haptic effects from a single actuator via spectral control of cutaneous wave propagation," in *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*. IEEE, 2019, pp. 425–430.

[110] L. R. Manfredi, A. T. Baker, D. O. Elias, J. F. Dammann III, M. C. Zielinski, V. S. Polashock, and S. J. Bensmaia, "The effect of surface wave propagation on neural responses to vibration in primate glabrous skin," *PloS one*, vol. 7, no. 2, p. e31203, 2012.

[111] J. Pereira, J. Mansour, and B. Davis, "Dynamic measurement of the viscoelastic properties of skin," *Journal of biomechanics*, vol. 24, no. 2, pp. 157–162, 1991.

[112] Y. Yamazaki, H. Mitake, R. Oda, H.-H. Wu, S. Hasegawa, M. Takekoshi, Y. Tsukamoto, and T. Baba, "Hapbeat: single dof wide range wearable haptic display," in *ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies*, 2017, pp. 1–2.

[113] L. Yan, Z. Chen, Y. Zou, X. He, C. Cai, K. Yu, and X. Zhu, "Field study of the interior noise and vibration of a metro vehicle running on a viaduct: A case study in guangzhou," *International journal of environmental research and public health*, vol. 17, no. 8, p. 2807, 2020.

[114] S. Hapuarachchi, D. Jayaratna, C. Kalansuriya, and A. Pannila, "Noise level survery inside the inter provincial buses in sri lanka," in *Proceedings of the Technical Sessions*, vol. 23, 2007, pp. 35–40.

[115] "What db level can you be exposed to in a nightclub and how dangerous is it for your hearing?" https://www.instrumentchoice.com.au/what-db-level-can-you-be-exposed-to-in-a-nightclub-and-how-dangerous-is-it-for-your-hearing, accessed Feb. 11, 2023.

[116] Y. Takahashi, K. Kanada, and Y. Yonekawa, "Some characteristics of human body surface vibration induced by low frequency noise," *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 21, no. 1, pp. 9–19, 2002.

[117] S. Guest, C. Catmur, D. Lloyd, and C. Spence, "Audiotactile interactions in roughness perception," *Experimental Brain Research*, vol. 146, no. 2, pp. 161–171, 2002.

[118] C. Spence and A. Gallace, "Recent developments in the study of tactile attention." *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, vol. 61, no. 3, p. 196, 2007.

[119] M. Kouchi and M. Mochimaru, "Japanese 3-d body shape and dimensions data 2003,"

2006.

[120] M. Jones, S. Jones, G. Bradley, N. Warren, D. Bainbridge, and G. Holmes, "Ontrack: Dynamically adapting music playback to support navigation," *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 12, no. 7, pp. 513–525, 2008.

[121] S. Yamano, T. Hamajo, S. Takahashi, and K. Higuchi, "Eyesound: single-modal mobile navigation using directionally annotated music," in *Proceedings of the 3rd Augmented Human International Conference*, 2012, pp. 1–4.

[122] R. Albrecht, R. Väänänen, and T. Lokki, "Guided by music: pedestrian and cyclist navigation with route and beacon guidance," *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 20, no. 1, pp. 121–145, 2016.

[123] F. Heller and J. Schöning, "Navigatone: Seamlessly embedding navigation cues in mobile music listening," in *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2018, pp. 1–7.

[124] F. Heller, J. Adamczyk, and K. Luyten, "Attracktion: Field evaluation of multi-track audio as unobtrusive cues for pedestrian navigation," in *22nd International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, 2020, pp. 1–7.

[125] R. L. Klatzky, J. R. Marston, N. A. Giudice, R. G. Golledge, and J. M. Loomis, "Cognitive load of navigating without vision when guided by virtual sound versus spatial language." *Journal of experimental psychology: Applied*, vol. 12, no. 4, p. 223, 2006.

[126] S. Holland, D. R. Morse, and H. Gedenryd, "Audiogps: Spatial audio navigation with a minimal attention interface," *Personal and Ubiquitous computing*, vol. 6, no. 4, pp. 253–259, 2002.

[127] S. Strachan, P. Eslambolchilar, R. Murray-Smith, S. Hughes, and S. O'Modhrain, "Gpstunes: controlling navigation via audio feedback," in *Proceedings of the 7th international conference on Human computer interaction with mobile devices & services*, 2005, pp. 275–278.

[128] D. Kimura, "Left-right differences in the perception of melodies," *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, vol. 16, no. 4, pp. 355–358, 1964.

[129] S. Bosman, B. Groenendaal, J.-W. Findlater, T. Visser, M. de Graaf, and P. Markopoulos, "Gentleguide: An exploration of haptic output for indoors pedestrian guidance," in *International Conference on Mobile Human-Computer Interaction*. Springer, 2003, pp. 358–362.

[130] W. Chang, W. Hwang, and Y. G. Ji, "Haptic seat interfaces for driver information and warning systems," *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 27, no. 12, pp. 1119–1132, 2011.

[131] S. Günther, F. Müller, M. Funk, J. Kirchner, N. Dezfuli, and M. Mühlhäuser, "Tactileglove:

Assistive spatial guidance in 3d space through vibrotactile navigation," in *Proceedings of the 11th pervasive technologies related to assistive environments conference*, 2018, pp. 273–280.

[132] Y. Salzer, T. Oron-Gilad, and A. Ronen, "Vibrotactor-belt on the thigh–directions in the vertical plane," in *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*. Springer, 2010, pp. 359–364.

[133] M. Mirzaei, P. Kan, and H. Kaufmann, "Earvr: Using ear haptics in virtual reality for deaf and hard-of-hearing people," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 26, no. 5, pp. 2084–2093, 2020.

[134] S. Schätzle and B. Weber, "Towards vibrotactile direction and distance information for virtual reality and workstations for blind people," in *International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction*. Springer, 2015, pp. 148–160.

[135] J. B. V. Erp, H. A. V. Veen, C. Jansen, and T. Dobbins, "Waypoint navigation with a vibrotactile waist belt," *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, vol. 2, no. 2, pp. 106–117, 2005.

[136] S. Schaack, G. Chernyshov, K. Ragozin, B. Tag, R. Peiris, and K. Kunze, "Haptic collar: Vibrotactile feedback around the neck for guidance applications," in *Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019*, 2019, pp. 1–4.

[137] J. R. Marston, J. M. Loomis, R. L. Klatzky, and R. G. Golledge, "Nonvisual route following with guidance from a simple haptic or auditory display," *Journal of Visual Impairment & Blindness*, vol. 101, no. 4, pp. 203–211, 2007.

[138] T. T. Ahmaniemi and V. T. Lantz, "Augmented reality target finding based on tactile cues," in *Proceedings of the 2009 international conference on Multimodal interfaces*, 2009, pp. 335–342.

[139] E. Fujimoto and M. Turk, "Non-visual navigation using combined audio music and haptic cues," in *Proceedings of the 16th International Conference on Multimodal Interaction*, 2014, pp. 411–418.

[140] P. Di Campli San Vito, G. Shakeri, S. Brewster, F. Pollick, E. Brown, L. Skrypchuk, and A. Mouzakitis, "Haptic navigation cues on the steering wheel," in *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2019, pp. 1–11.

[141] F. Chinello, C. Pacchierotti, J. Bimbo, N. G. Tsagarakis, and D. Prattichizzo, "Design and evaluation of a wearable skin stretch device for haptic guidance," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 1, pp. 524–531, 2017.

[142] A. J. Spiers and A. M. Dollar, "Design and evaluation of shape-changing haptic interfaces for pedestrian navigation assistance," *IEEE transactions on haptics*, vol. 10, no. 1, pp. 17–

28, 2016.

[143] Y. Imamura, H. Arakawa, S. Kamuro, K. Minamizawa, and S. Tachi, "Hapmap: Haptic walking navigation system with support by the sense of handrail," in *ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies*, 2011, pp. 1–1.

[144] A. Crossan and S. Brewster, "Two-handed navigation in a haptic virtual environment," in *CHI'06 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 2006, pp. 676–681.

[145] T. Amemiya and H. Sugiyama, "Haptic handheld wayfinder with pseudo-attraction force for pedestrians with visual impairments," in *Proceedings of the 11th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility*, 2009, pp. 107–114.

[146] B. Series, "Algorithms to measure audio programme loudness and true-peak audio level," 2011.

[147] F. Heller, T. Knott, M. Weiss, and J. Borchers, "Multi-user interaction in virtual audio spaces," in *CHI'09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 2009, pp. 4489–4494.

[148] M. Gorzel, A. Allen, I. Kelly, J. Kammerl, A. Gungormusler, H. Yeh, and F. Boland, "Efficient encoding and decoding of binaural sound with resonance audio," in *Audio Engineering Society Conference: 2019 AES International Conference on Immersive and Interactive Audio*. Audio Engineering Society, 2019.

[149] J. Williamson, S. Robinson, C. Stewart, R. Murray-Smith, M. Jones, and S. Brewster, "Social gravity: a virtual elastic tether for casual, privacy-preserving pedestrian rendezvous," in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2010, pp. 1485–1494.

[150] A. Honda, K. Ohba, Y. Iwaya, and Y. Suzuki, "Detection of sound image movement during horizontal head rotation," *i-Perception*, vol. 7, no. 5, p. 2041669516669614, 2016.

[151] S. Merchel, A. Leppin, and E. Altinsoy, "Hearing with your body: the influence of whole-body vibrations on loudness perception," in *Proceedings of the 16th International Congress on Sound and Vibration (ICSV), Kraków, Poland*, vol. 4, 2009.

[152] E. A. Ævarsson, T. Ásgeirsdóttir, F. Pind, Á. Kristjánsson, and R. Unnthorsson, "Vibrotactile threshold measurements at the wrist using parallel vibration actuators," *ACM Transactions on Applied Perceptions (TAP)*, 2022.

[153] 飯田一博, "VR の進化を担う 3D 音響技術: ヘッドホン 3D 音響の原理と到達点," **電子情報通信学会誌**= *The journal of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers*, vol. 103, no. 4, pp. 413–420, 2020.

[154] F. Bork, C. Schnelzer, U. Eck, and N. Navab, "Towards efficient visual guidance in limited field-of-view head-mounted displays," *IEEE transactions on visualization and computer*

graphics, vol. 24, no. 11, pp. 2983–2992, 2018.

[155] U. Gruenefeld, D. Ennenga, A. E. Ali, W. Heuten, and S. Boll, "Eyesee360: Designing a visualization technique for out-of-view objects in head-mounted augmented reality," in *Proceedings of the 5th symposium on spatial user interaction*, 2017, pp. 109–118.

[156] U. Gruenefeld, D. Lange, L. Hammer, S. Boll, and W. Heuten, "Flyingarrow: pointing towards out-of-view objects on augmented reality devices," in *Proceedings of the 7th ACM international symposium on pervasive displays*, 2018, pp. 1–6.

[157] U. Gruenefeld, A. E. Ali, S. Boll, and W. Heuten, "Beyond halo and wedge: Visualizing out-of-view objects on head-mounted virtual and augmented reality devices," in *Proceedings of the 20th international conference on human-computer interaction with mobile devices and services*, 2018, pp. 1–11.

[158] A. Fiannaca, T. Morelli, and E. Folmer, "Haptic target acquisition to enable spatial gestures in nonvisual displays," in *Proceedings of graphics interface 2013*, 2013, pp. 213–219.

[159] O. B. Kaul and M. Rohs, "Haptichead: A spherical vibrotactile grid around the head for 3d guidance in virtual and augmented reality," in *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2017, pp. 3729–3740.

[160] H.-R. Tsai, Y.-C. Chang, T.-Y. Wei, C.-A. Tsao, X. C.-y. Koo, H.-C. Wang, and B.-Y. Chen, "Guideband: Intuitive 3d multilevel force guidance on a wristband in virtual reality," in *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2021, pp. 1–13.

[161] V. A. de Jesus Oliveira, L. Brayda, L. Nedel, and A. Maciel, "Designing a vibrotactile head-mounted display for spatial awareness in 3d spaces," *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, vol. 23, no. 4, pp. 1409–1417, 2017.

[162] C. Wang, D.-Y. Huang, S.-w. Hsu, C.-E. Hou, Y.-L. Chiu, R.-C. Chang, J.-Y. Lo, and B.-Y. Chen, "Masque: Exploring lateral skin stretch feedback on the face with head-mounted displays," in *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2019, pp. 439–451.

[163] F. Nakamura, A. Verhulst, K. Sakurada, and M. Sugimoto, "Virtual whiskers: Spatial directional guidance using cheek haptic stimulation in a virtual environment," in *Augmented Humans Conference 2021*, 2021, pp. 141–151.

[164] A. Marquardt, C. Trepkowski, T. D. Eibich, J. Maiero, E. Kruijff, and J. Schöning, "Comparing non-visual and visual guidance methods for narrow field of view augmented reality displays," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 26, no. 12, pp. 3389–3401, 2020.

[165] C. Trepkowski, A. Marquardt, T. D. Eibich, Y. Shikanai, J. Maiero, K. Kiyokawa, E. Krui-

jff, J. Schöning, and P. König, "Multisensory proximity and transition cues for improving target awareness in narrow field of view augmented reality displays," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 28, no. 2, pp. 1342–1362, 2021.

[166] N. Binetti, L. Wu, S. Chen, E. Kruijff, S. Julier, and D. P. Brumby, "Using visual and auditory cues to locate out-of-view objects in head-mounted augmented reality," *Displays*, vol. 69, p. 102032, 2021.

[167] J. Wiemeyer, L. Nacke, C. Moser, and F. Floyd' Mueller, "Player experience," in *Serious games*. Springer, 2016, pp. 243–271.

[168] G. Cassidy and R. A. MacDonald, "The effects of music on time perception and performance of a driving game," *Scandinavian journal of psychology*, vol. 51, no. 6, pp. 455–464, 2010.

[169] C. Klimmt, D. Possler, N. May, H. Auge, L. Wanjek, and A.-L. Wolf, "Effects of soundtrack music on the video game experience," *Media Psychology*, vol. 22, no. 5, pp. 689–713, 2019.

[170] K. Rogers, M. Jörg, and M. Weber, "Effects of background music on risk-taking and general player experience," in *Proceedings of the Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, 2019, pp. 213–224.

[171] J. Zhang and X. Fu, "The influence of background music of video games on immersion," *Journal of Psychology & Psychotherapy*, vol. 5, no. 4, p. 1, 2015.

[172] U. Gruenefeld, I. Koethe, D. Lange, S. Weiß, and W. Heuten, "Comparing techniques for visualizing moving out-of-view objects in head-mounted virtual reality," in *2019 IEEE conference on virtual reality and 3D user interfaces (VR)*. IEEE, 2019, pp. 742–746.

[173] K. Rogers, M. Milo, M. Weber, and L. E. Nacke, "The potential disconnect between time perception and immersion: Effects of music on vr player experience," in *Proceedings of the Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, 2020, pp. 414–426.

[174] K. Rogers, G. Ribeiro, R. R. Wehbe, M. Weber, and L. E. Nacke, "Vanishing importance: studying immersive effects of game audio perception on player experiences in virtual reality," in *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2018, pp. 1–13.

[175] M. Carroll and C. Yildirim, "The effect of body-based haptic feedback on player experience during vr gaming," in *International Conference on Human-Computer Interaction*. Springer, 2021, pp. 163–171.

[176] Tobii, "Tobii G2OM," https://vr.tobii.com/sdk/solutions/tobii-g2om/, (Accessed Feb. 11, 2023).

[177] Y. Benjamini and Y. Hochberg, "Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing," *Journal of the Royal statistical society: series B (Method-*

ological), vol. 57, no. 1, pp. 289–300, 1995.

[178] M. S. Prewett, L. R. Elliott, A. G. Walvoord, and M. D. Coovert, "A meta-analysis of vibrotactile and visual information displays for improving task performance," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 42, no. 1, pp. 123–132, 2011.

[179] Y. Harada and J. Ohyama, "Quantitative evaluation of visual guidance effects for 360-degree directions," *Virtual Reality*, vol. 26, no. 2, pp. 759–770, 2022.

[180] H. Jo, S. Hwang, H. Park, and J.-h. Ryu, "Aroundplot: Focus+ context interface for off-screen objects in 3d environments," *Computers & Graphics*, vol. 35, no. 4, pp. 841–853, 2011.

[181] T.-C. Lin, A. U. Krishnan, and Z. Li, "Comparison of haptic and augmented reality visual cues for assisting tele-manipulation," in *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2022, pp. 9309–9316.

[182] A. Drachen, L. E. Nacke, G. Yannakakis, and A. L. Pedersen, "Correlation between heart rate, electrodermal activity and player experience in first-person shooter games," in *Proceedings of the 5th ACM SIGGRAPH Symposium on Video Games*, 2010, pp. 49–54.

[183] V. Vanden Abeele, L. E. Nacke, E. D. Mekler, and D. Johnson, "Design and preliminary validation of the player experience inventory," in *Proceedings of the 2016 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play Companion Extended Abstracts*, 2016, pp. 335–341.

[184] C. Jennett, A. L. Cox, P. Cairns, S. Dhoparee, A. Epps, T. Tijs, and A. Walton, "Measuring and defining the experience of immersion in games," *International journal of human-computer studies*, vol. 66, no. 9, pp. 641–661, 2008.

[185] P. Sweetser and P. Wyeth, "Gameflow: a model for evaluating player enjoyment in games," *Computers in Entertainment (CIE)*, vol. 3, no. 3, pp. 3–3, 2005.

[186] A. Balandra, "ヒトのマルチモーダル知覚特性に基づく聴触覚刺激の合成," Ph.D. dissertation, 東京工業大学, 2019.

[187] K. Yamaguchi, M. Konyo, and S. Tadokoro, "Sensory equivalence conversion of high-frequency vibrotactile signals using intensity segment modulation method for enhancing audiovisual experience," in *2021 IEEE World Haptics Conference (WHC)*. IEEE, 2021, pp. 674–679.

[188] 大村英史, 柴山拓郎, 寺澤洋子, 星 (柴) 玲子, 川上愛, 吹野美和, 岡ノ谷一夫, and 古川聖, "音楽情動研究の動向: 歴史・計測・理論の視点から," **日本音響学会誌**, vol. 69, no. 9, pp. 467–478, 2013.

[189] H. Baumgartner, "Remembrance of things past: Music, autobiographical memory, and

emotion," *ACR North American Advances*, 1992.

付録

Hapbeat 用駆動回路

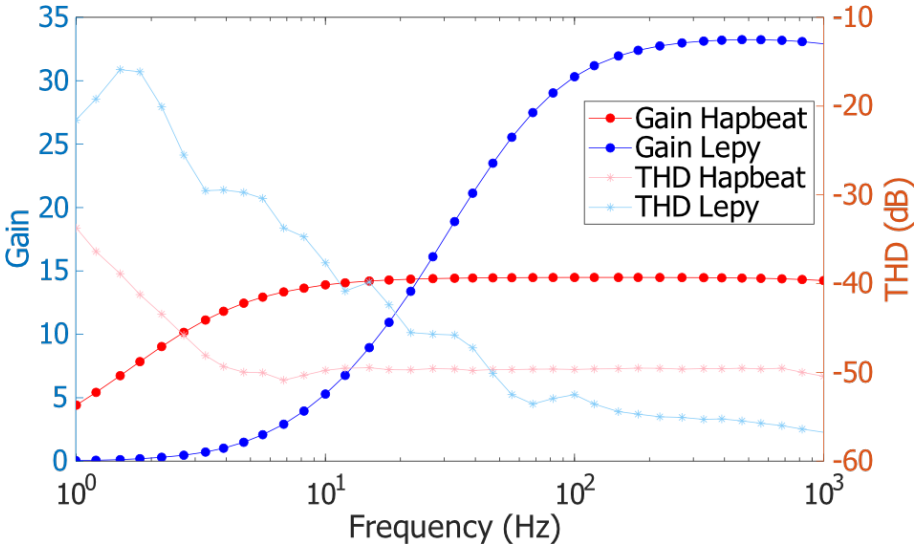

図 1　4.3.3 節で実装した回路の周波数応答。Lepy は比較対象のオーディオアンプ（LP-V3S, Lepy）。

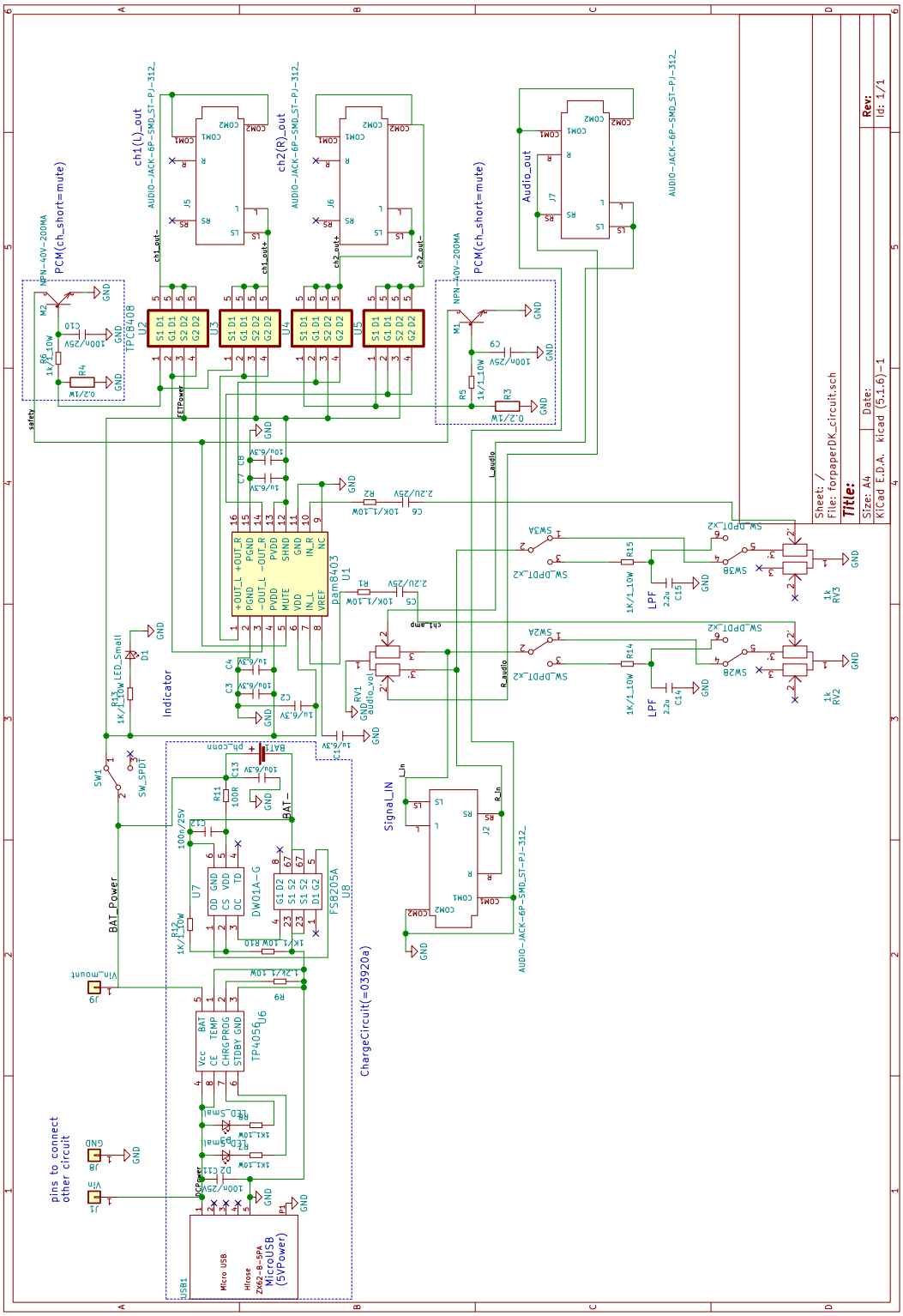

図 2　4.3.3 節で実装した駆動回路の回路図。

著者論文リスト

学術論文（査読有）

1. Y. Yamazaki, H. Mitake and S. Hasegawa, ”Implementation of Tension-Based Compact Necklace-Type Haptic Device Achieving Widespread Transmission of Low-Frequency Vibrations,” in IEEE Transactions on Haptics, vol. 15, no. 3, pp. 535-546, 1 July-Sept. 2022, doi: 10.1109/TOH.2022.3176673.
2. （査読中 IEEE Transactions on Haptics）Yusuke Yamazaki and Shoichi Hasegawa. ”Navigation Method Enhancing Music Listening Experience by Stimulating Both Neck Sides with Modulated Music Vibration.”

国際会議論文（査読有）

1. （IEEE VR 2023 採択済み、未発表）Yusuke Yamazaki and Shoichi Hasegawa. “Haptic 3D Guidance Method for Improving the Music Listening Experience in Virtual Reality Shooting Games.”
2. Y. Yamazaki, T. Horibe and A. Shirai, ”Evaluation of time-shifted emotion through shared emoji reactions in a video watching experience,” 2022 International Conference on Cyberworlds (CW), 2022, pp. 110-113, doi: 10.1109/CW55638.2022.00024.
3. Yamazaki, Y., Mitake, H., Hasegawa, S. (2016). Tension-Based Wearable Vibroacoustic Device for Music Appreciation. In: Bello, F., Kajimoto, H., Visell, Y. (eds) Haptics: Perception, Devices, Control, and Applications. EuroHaptics 2016. Lecture Notes in Computer Science(), vol 9775. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42324-1_27

国際会議論文（デモ/ポスター発表）

1. Yamazaki Yusuke and Akihiko Shirai. “Pseudo Real-Time Live Event: Virtualization for Nonverbal Live Entertainment and Sharing,” ConVRgence (VRIC) Virtual Reality International Conference Proceedings. 1 July 2021.
2. Yusuke Yamazaki, Shoichi Hasegawa, Hironori Mitake, and Akihiko Shirai. 2019. Neck strap haptics: an algorithm for non-visible VR information using haptic perception on the neck. In ACM SIGGRAPH 2019 Posters (SIGGRAPH ’19). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 60, 1–2. https://doi.org/10.1145/3306214.3338562
3. Yusuke Yamazaki, et al. ”Haptic Minesweeper.” IEEE World Haptics Conference 2019 Hands-on Demos, 2019.
4. Yusuke Yamazaki, Hironori Mitake, Ryuto Oda, Hsueh-Han Wu, Shoichi Hasegawa, Minatsu Takekoshi, Yuji Tsukamoto, and Testuaki Baba. 2017. Hapbeat: single DOF wide range wearable haptic display. In ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies (SIGGRAPH ’17). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 12, 1–2. https://doi.org/10.1145/3084822.3084843
5. Yamazaki, Y., Mitake, H., Takekoshi, M., Tsukamoto, Y., Baba, T., Hasegawa, S. (2018). Hapbeat: Tension-Based Wearable Vibroacoustic Device. In: Hasegawa, S., Konyo, M., Kyung, KU., Nojima, T., Kajimoto, H. (eds) Haptic Interaction. AsiaHaptics 2016. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 432. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4157-0_65

国内会議論文（査読無し）

1. 山崎勇祐, 長谷川晶一. “首両側面への音楽振動提示による音楽鑑賞体験の向上を伴うナビゲーション手法の提案.” 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 (CD-ROM) 27th (2022): ROMBUNNO.11C–2.
2. 山崎勇祐, 白井暁彦. “VibeShare::Maptop – 写真撮影・同時参加型バーチャル旅行システムの開発と評価.” 情報処理学会 インタラクション 2022. ID03.
3. 山崎勇祐, 白井暁彦. “VibeShare::Performer-Emoji・触覚・音効によるオンライン音楽ライブの双方向化.” 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 (CD-ROM) 26th (2021): ROMBUNNO.1B2-3.

4. 坂口塔也, 山崎勇祐, Bredikhina Liudmila, 白井暁彦 ”交流型 WebVR における空間音響のオンライン評価手法.” 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 (CD-ROM) 25th (2020): ROMBUNNO.3D2–1.
5. 山崎勇祐, 白井暁彦. ”VibeShare: Vote: オンラインでの出演者と観客の非言語コミュニケーションの実現 (映像表現 & コンピュータグラフィックス)–(映像表現・芸術科学フォーラム 2021 (Expressive Japan 2021)).” 映像情報メディア学会技術報告= ITE technical report 45.8 (2021): 17-20.
6. 白井暁彦, 堀部貴紀, 山崎勇祐, 坂口塔也, 中村清人, & 栢之間諒汰. ”Mozilla Hubs を用いたオンラインイベントの WebVR 化.” DHU journal= デジタルハリウッド大学紀要 7 (2020): 45-50.
7. 山崎勇祐, et al. “Hapbeat: 張力に基づいた装着型体感音響装置.” インタラクション 2017 論文集 3-409–72 (2017): 918–920.
8. 山崎勇祐, 長谷川晶一. “装着型振動提示装置の提案.” 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 (CD-ROM) 20th (2015): ROMBUNNO.11C–2.

招待講演

1. Yamazaki, Y., Mitake, H., Akihiko, S., & Hasegawa, S. (2019). Widespread the hapbeat: Tension based necklace type haptic display. In 26th International Display Workshops, IDW 2019 (pp. 1656-1659). (Proceedings of the International Display Workshops; Vol. 3). International Display Workshops.

特許権

1. グリー株式会社. 白井暁彦, 山崎勇祐. 情報処理システム、情報処理方法およびコンピュータプログラム. JP 7104844. 2021-9-10
2. グリー株式会社. 白井暁彦, 山崎勇祐. 情報処理プログラム、情報処理方法、情報処理装置. JP 2021-190914. 2020-6-2.
3. グリー株式会社. 白井暁彦, 山崎勇祐. 情報処理装置、情報処理方法および情報処理プログラム. JP 2021-077257. 2019-11-13.
4. グリー株式会社. 山崎勇祐, 白井暁彦. 位置情報提示システム、位置情報提示装置、位置情報提示プログラムおよび位置情報提示方法. JP 2021-012554. 2019-07-08.
5. 国立大学法人東京工業大学. 長谷川晶一, 山崎勇祐. 振動提示装置及び振動提示装置の使用方法. JP 2015-170224. 2015-08-31.