

前後左右振動と音の物理的通過感による 音楽の臨場感向上の有効性の検証

Expressive Presence of Sound and Music using Backward-forward or Rightside-leftside Passage of Physical Vibration

柳 翔太[†] 吉田 直人[†] 米澤 朋子[†]
Shota Yanagi Naoto Yoshida Tomoko Yonezawa

1. はじめに

本研究では音楽における音の発生源からの物理的振動刺激を導入して臨場感を高めることを狙い、振動モータアレイを首部・胸部・背部に複数配置したシステムを開発している。本稿では、振動と音の組み合わせによる効果や、前後の振動開始時間差などによる物理的通過感の提示効果やについての検証を報告する。

1980年代からのポータブル音楽プレイヤー等の普及により、録音音楽をより気軽にかつ身近に楽しめるようになった。一方このような音楽プレイヤーは、イヤホンやヘッドフォンなどをつけて楽しむものや、ラジカセのような小型スピーカから音を出すものであり、コンサートやライブまたは映画館などの、大音響での臨場感や重低音は再現し難い。これを再現する為には大型スピーカ、ウーハなどの大規模な装置(図1)を用意し大音量で聴取および体感を生成することが必要である。

人間は外界からの情報を知覚するために、五感や平衡感覚、空間感覚など複数の感覚の情報を組み合わせて処理しており[1]、実際の大音量の音響体験とは、聴覚だけで知覚されるものではない。特に、聴覚以外で音を感じられる最も重要な感覚は振動の触覚であると考えた。ボディソニック(図2)は音楽聴取の感覚を拡大するイス型をメインとする振動付与装置である。本来大音量聴取体験では身体の前面の振動も起こるため音楽体験としては特殊な状況である。その上、身体的かつ心理的治療が目的[2]で使われる事が主であり音をより魅力的に聴取しようと意図したものではない。またこれらの機材はスペースも必要で、なおかつコストがかかる。

そこで我々は音楽聴取時に上半身に前後左右から音と同期した振動を付与するウェアラブル装置を提案した。さらに前後の振動開始時間差を強制的に与える事により通常人間が感じる事のない「音の物理的な通過感」という新しい感覚の体験を与え、これらによって臨場感を増幅させる手法を提案し、振動モータアレイデバイスを開発した[3]。振動を前後左右から与えるため、コンサートホールやライブ会場、映画館にいるような音に包まれ

る感覚を再現する事が期待される。また「音の物理的な通過感」を与える事により、さらなる臨場感の向上や音源位置の把握にも繋がると考えられる。そこで本稿では前後左右振動と音の物理的通過感によって音楽の臨場感向上への影響に関して検証を行った。

2. 関連研究

音を触覚として提示する手段として様々な事例が存在する。佐々木ら[4]は視覚障害者、盲ろう者のために振動子による楽譜提示方式を開発した。振動子の強さで音程を、振動の長さで時間長を表し楽曲を提示する物である。猪狩ら[5]は振動刺激を利用した楽音伝達の基礎検討を行った。振動刺激だけでも十分リズム知覚は可能であることを確かめた。三浦ら[6]は振動デバイスを用いたリズム学習支援システムを開発した。各々の学習者に対し自分のパートのリズムを触覚を介して伝えることで、唱歌、演奏できるようにするものである。音楽学習におけるリズム提示やリズム研究のための有用なツールになり得ることを示した。

一方、振動が音楽の臨場感などに与える影響について、井出口ら[7]は音楽聴取時に振動付与することにより、音楽のどのような印象を強調するかなどを検討し、「迫力が出た、乗りがよくなった、臨場感が出た、快くなった」などの印象変化が振動付与の有効性の要因となることを示した。永野ら[8]は音源を懐に抱きつつ音源からの極近傍音と振動触覚を体の前面で得るという新たな体感音楽聴取方法について検討した。古屋ら[9]は振動ではなく空気噴流による触覚からの音楽情報伝達を試みている。

しかし、これらの振動提示は拳や耳などの一方向からの振動に限られている。空間感覚を考慮に入れるならば振動は多方向から来ると考えられる。この問題を解決するため、本研究では複数の特性を持つ振動モータを身体の異なる場所に配置している。また楽曲と振動の遅延差に関する研究は存在するが、本研究では前後間で振動時間差を生じさせた。

櫻木ら[10]は臨場感向上のため振動子を可能な限り減らし、かつ広範囲に振動を提示するため鎖骨に着目し、

[†] 関西大学, Kansai University

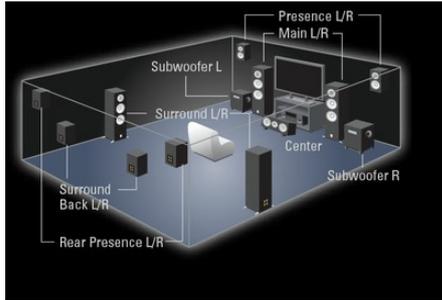


図 1: 一般的なサラウンドシステム



図 2: ボディソニック

鎖骨に振動を提示する装置を開発した。これに対し、本研究の提案手法では、前方だけでなく後方からの振動も付与でき、前後での振動開始時間差による音の物理的通過感を与える事が出来る。

3. システム

3.1 システム構成

システムの構成を(図3)に示す。本システムは音声処理部、振動モータ制御部、振動モータアレイデバイスで構成されている。音声処理部で音声解析処理の結果を振動モータ制御部に送り、振動モータ制御部が振動モータアレイデバイスを制御する。そして振動モータアレイデバイスが音楽にあわせた振動を体験者に与える。

3.2 音声処理部

本システムでは PC (CPU:intelCorei7, Memory:8.0GB) 上で Processing 言語 * を用いて音声処理プログラムを実行する。音声の再生にはヘッドフォン (CPH 7000) を用いる。

音楽ファイルにはサンプリングレートが一般的な 44100Hz のファイルを用いる。バッファサイズを 1024 とし、約 43Hz ごとの周波数帯域に分類する。本システムでは低音域 (43-86Hz) , 中音域 (258-301Hz) の 2

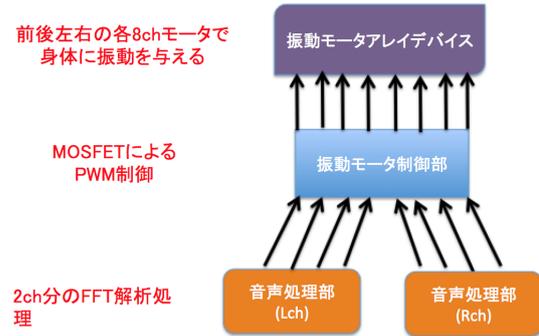


図 3: システム構成図

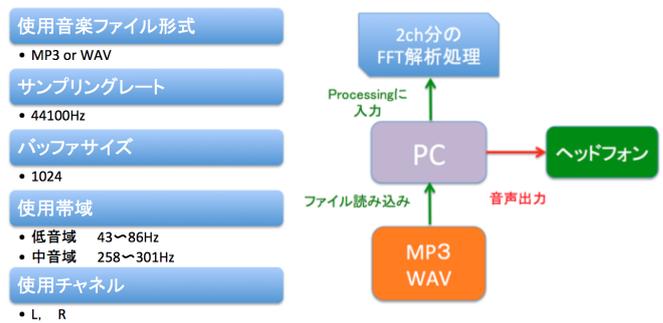


図 4: 音声処理部構成

つの周波数帯域を用いる。FFT 解析を行い、それぞれの周波数帯域の音量値を取得する。FFT 解析は左音声と右音声の解析を行う。これで得られた4つの音量値を0-255の値に変換し、これを用いて振動モータ制御部はMOSFETによるPWM制御を行う。音声は同時にヘッドフォンに出力される(図4)。

3.3 振動モータアレイデバイス

振動モータアレイデバイスとは、ゴムバンド、ベルト、テープにそれぞれモータを取り付けた物である(図5)(図6)。胸部にはゴムバンドで胸部の第3-4肋骨付近に密着するように低音域(43-86Hz)に反応する2つのデュアル軸モータ(6000RPM)を配置しており、背部には脇の直下を通したベルトで密着するように同じく低音域(43-86Hz)に反応する2つのデュアル軸モータ(6000RPM)を背骨を中心として左右に配置している。また首前部には鎖骨付近に、首後部には背骨付近に中音域(258-301Hz)に反応する小型ブラシレスモータ(13000RPM)を配置している。

合計8チャンネルのそれぞれのモータはマイコンがプログラムから送られた動作処理に基づいてPWM制御をすることによりそれぞれの周波数帯域の音量値に応じた動きをする。左部モータには左音声の解析した結果の処

*<https://processing.org>

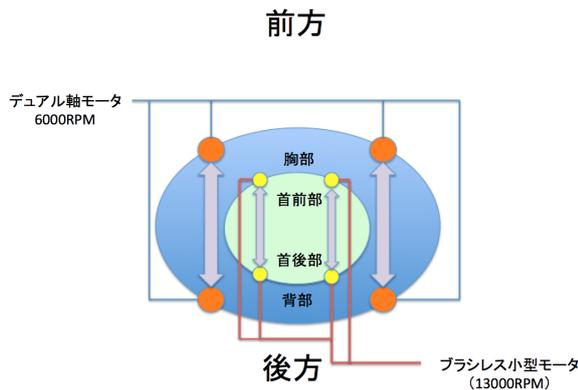


図 5: 振動モータアレイデバイス

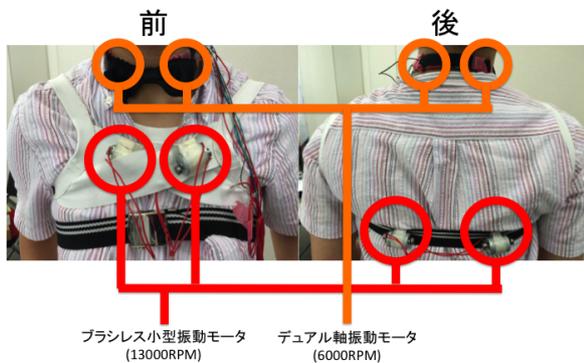


図 6: 装着図

理, 右部モータには右音声の解析した結果の処理がそれぞれ反映される。

3.4 振動モータ制御部

本システムでは振動制御部の為にマイコン (Arduino UNO), Nch MOSFET を用いる。Nch MOSFET はそれぞれ独立しており 8 個の出力を個別に制御できる。本システムでは音の信号から生成された振動モータ制御情報を、全てのモータ制御にそのまま適用する手法と、前部後部のモータ間で時間差を付ける手法の 2 つの制御方法を準備した。

時間差なし制御：音分析でそれぞれの周波数帯域の音量値を習得し、その音量値の値を 0-255 の値に変換した後、マイコンに送信する。マイコンはその処理に基づいて PWM 制御により胸部に 2 チャンネル、背部に 2 チャンネル、首前後に 4 チャンネルの合計 8 チャンネルの振動モータを音楽に合わせて動作させる。また全てのモータは周波数帯域、左右ごとにそれぞれの挙動をする。

時間差あり制御 (音の通過感発生)：前後のモータの動作の振動開始時間に差を持たせることによって音が前から後ろへと通過する感覚を再現する為の制御である。本

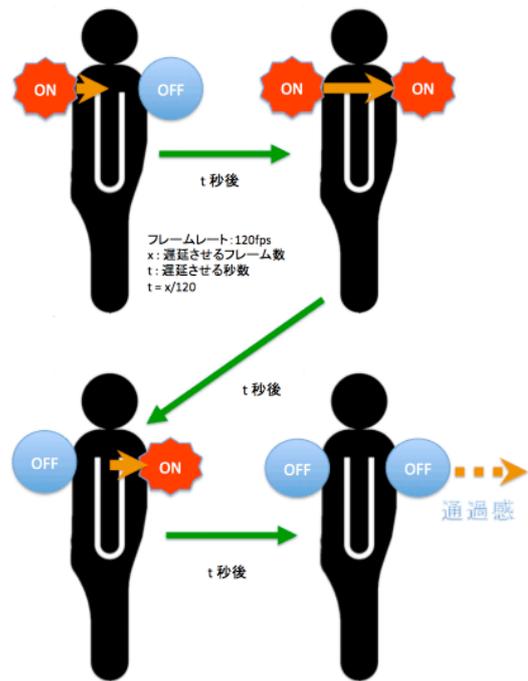


図 7: 時間差制御

システムはフレームレートを 120fps に設定し、遅延させる秒数を 0-1000ms として 100ms 区切りになるようにフレーム数を設定している。前面の振動モータが振動開始した後、0-1000ms 後に後面の振動モータが振動を開始する。これにより音の通過感が再現される (図 7)。時間差制御の場合には前後左右の遅延処理を個別にモータに反映する。

4. 実験 1：振動による聴取への影響および前後左右振動による臨場感向上効果の検証

提案システムの機能として、前後左右の振動を付与することによって臨場感などの向上に繋がるのかを検証する為に評価実験を行った。

4.1 実験の設定

仮説: 音の聴取と共に身体に振動を付与することによって臨場感や迫力などの増幅に繋がる。

被験者: 19~23 歳の男女 25 名。

条件: 「音の大きさ」を要因 A (被験者内要因: 水準数 4), 「振動の強さ」を要因 B (被験者内要因: 水準数 4) とし、2 要因 16 条件を設定した。音の大きさの水準はオーディオインターフェースの稼働最小音量を「弱」とし、音量の違いが明確にわかる 3 目盛りごとに「弱・中・強」を定め、無音を加えた 4 つとした。振動の強さの水準は習得した音量値と同期させたものを基準かつ「中」

表 1: 実験時のシステムパターン

	音の大きさ (A)	振動の強さ (B)
pt.01	なし	なし
pt.02	なし	弱
pt.03	なし	中
pt.04	なし	強
pt.05	弱	なし
pt.06	弱	弱
pt.07	弱	中
pt.08	弱	強
pt.09	中	なし
pt.10	中	弱
pt.11	中	中
pt.12	中	強
pt.13	強	なし
pt.14	強	弱
pt.15	強	中
pt.16	強	強

とし、振動の違いが明確にわかるよう、「弱」は基準の 0.5 倍、「強」は基準の 1.5 倍の強さとし、加えて振動無しの 4 つとした (表 1)。

実験手順: 被験者に振動モーターレイデバイスとヘッドフォンを装着してもらい、ヘッドフォンからはバラード調の音楽が約 20 秒間の後、ロック調の音楽が約 20 秒間の計 40 秒間の音楽が a1:無・a2:弱・a3:中・a4:強の 4 段階の音の大きさに流れる。その際、音に合わせた振動を振動モーターレイが b1:無・b2:弱・b3:中・b4:強の 4 段階の強さで身体に付与される。音楽が流れ終わった後に 1 枚目のアンケート記入を行い、再度同じ条件で音楽を流す。その後、2 枚目のアンケート記入を行い、次の条件へ移行する。音楽の臨場感や振動について MOS 法による評価を求めた。

評価項目: 実験参加者には MOS 法で以下の 21 節の実験の評価項目を用いた。音の空間的要素に関わる項目として Q1-6 を設定した。振動による音量に対する影響に関わる項目として Q7, 8 を設定した。振動と音に対する違和感に関わる項目として Q9-12 を設定した。音に対する体験者の気分的要素に関わる項目として Q13-18 を設定した。音と振動に対する快感・不快感に関わる項目として Q19-21 を設定した。

被験者は音楽聴取フェーズの後、5 段階 (5:あてはまる, 4:まああてはまる, 3:どちらでもない, 2:まああてはまらない, 1:あてはまらない) で以下の各項目の評価を行った。

- Q1:実際に演奏を目の当たりにしているように感じた
- Q2:音源を近くに感じた
- Q3:音に包まれている感じがした
- Q4:音によって空間が震えているように感じた

- Q5:実際に演奏を目の当たりにしているように感じた
- Q6:音が広がっていくように感じた
- Q7:音量が大きく感じた
- Q8:音の強弱がわかりやすかった
- Q9:振動に違和感を感じなかった
- Q10:音と振動が調和していた
- Q11:聴きやすかった
- Q12:こもった音に聞こえた
- Q13:音楽の盛り上がりの変化を感じ取れた
- Q14:音楽に対する迫力をより感じた
- Q15:気分が高揚した
- Q16:身体が自然に動いた
- Q17:音楽にのめり込む感覚があった
- Q18:温かみのある印象を受けた
- Q19:音に心地よさを感じた
- Q20:振動に心地よさを感じた
- Q21:音と振動の調和に心地よさを感じた

4.2 主観評価による実験結果

すべての評価項目について 5 段階で評価させた後、分散分析を行った。分散分析は有意水準を $P=0.05$ とし、「音の大きさ」、「振動の強さ」の 2 要因に関して行った。21 の評価項目についての平均と標準偏差を図 8-11、分散分析を行った結果を表 2 に示す。全ての評価項目において音無しの時、有意差が得られなかった。Q12, 16 については全ての条件において有意差が得られなかった。これにより振動による音質への影響が無いことがわかり、身体が自然にうごくまでの高揚感がないことがわかった。また、振動なしの場合では Q9, 10, 12, 16, 21 で有意差が得られなかった。それ以外のほぼ全ての項目においては、それぞれの振動において音がありとなしの間で有意差が得られ、音ありの中でも音の強さの間に有意差が得られたものがあつた。またそれぞれの音の大きさについての振動の強さも振動ありと無しの間で有意差が多く得られた。また振動ありの中では振動強・中と弱の間で有意差が得られたものがあつた。これらの結果より音楽の聴取とともに振動を与える事が臨場感を向上させ、没入感をあたえることができるとわかった。しかし Q11 と Q19 においては音量が中の時に有意差が得られなかった。

5. 実験 2: 音の物理的通過感についての検証

提案システムの機能として、前後の振動開始時間を強調的にあたえることで人が普通感じる事のない音の物理的通過感という新しい感覚が生じ、それによる臨場感の向上や、位置感を感じられるのかを検証する為に評価実験を行った。

表 2: 振動による聴取への影響および前後左右振動による臨場感向上効果の検証の分散分析結果

	音の大きさ (A)		振動の強さ (B)		AB		多重比較		多重比較		多重比較		多重比較		多重比較		多重比較	
	F(24)	p	F(24)	p	F(24)	p	A(b1)	A(b2)	A(b3)	A(b4)	B(a1)	B(a2)	B(a3)	B(a4)	B(a5)	B(a6)	B(a7)	B(a8)
Q1	131.625	< 0.01*	25.966	< 0.01*	5.500	< 0.01*	4-[1,2],3-[1,2]	exp4-3	exp4-3	exp3-2	—	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1	4-[1,2,3],3-[1,2],2-1	—	—	—	—
Q2	147.465	< 0.01*	17.380	< 0.01*	5.238	< 0.01*	exp2-1	[2,3,4]-1	exp3-4	4-[1,2,3],3-[1,2],2-1	—	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1,3-2	4-[1,2]	—	—	—	—
Q3	142.624	< 0.01*	55.648	< 0.01*	5.971	< 0.01*	4-[1,2],3-[1,2]	[2,3,4]-1,4-3	exp3-4	exp4-3	—	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1,3-2	[2,3,4]-1	—	—	—	—
Q4	77.750	< 0.01*	14.503	< 0.01*	8.928	< 0.01*	4-[1,2]	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1,3-2	exp4-3	—	[2,3,4]-1,2-4	[2,3,4]-1,3-2	[2,3,4]-1,4-2	—	—	—	—
Q5	83.359	< 0.01*	10.534	< 0.01*	2.542	< 0.01*	[2,3,4]-1,4-2	exp4-3	exp4-3	—	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1	—	—	—	—
Q6	100.613	< 0.01*	31.020	< 0.01*	6.706	< 0.01*	4-[1,2],3-1	[2,3,4]-1	exp3-4	exp4-3	—	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1	exp4-3	—	—	—	—
Q7	162.128	< 0.01*	11.451	0.0166 *	8.375	< 0.01*	exp2-1	exp3-2	4-[1,2,3],3-[1,2],2-1	4-[1,2,3],3-[1,2],2-1	—	[2,3,4]-1	exp2-1	4-[1,2,3]	—	—	—	—
Q8	96.136	< 0.01*	13.516	< 0.01*	4.291	< 0.01*	4-[1,2],3-[1,2]	[2,3,4]-1	exp3-4	exp4-3	—	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1,3-2	4-1	—	—	—	—
Q9	29.441	< 0.01*	7.979	< 0.01*	3.834	< 0.01*	—	3-[1,2],4-1	[2,3,4]-1	exp3-2	—	3-1	[2,3]-1	[2,3,4]-1	—	—	—	—
Q10	67.176	< 0.01*	25.834	< 0.01*	8.836	< 0.01*	—	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1	4-[1,2,3],3-[1,2],2-1	—	exp2-3	[2,3,4]-1,3-4	[2,3,4]-1,4-2	—	—	—	—
Q11	127.666	< 0.01*	2.398	0.0750 +	1.956	0.0458 *	[2,3,4]-1	exp4-3	[2,3,4]-1	4-[1,2,3],3-[1,2],2-1	—	3-4	—	[4,3]-1	—	—	—	—
Q12	18.936	< 0.01*	1.610	0.1946	1.661	0.0998 +	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Q13	98.178	< 0.01*	20.416	< 0.01*	5.482	< 0.01*	exp4-3	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1	exp4-3	—	exp2-3	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1	—	—	—	—
Q14	107.490	< 0.01*	34.030	< 0.01*	13.354	< 0.01*	4-[1,2],3-[1,2]	[2,3,4]-1,2-3	exp3-4	exp4-3	—	exp3-4	4-[1,2],3-[1,2,4],2-1	exp4-3	—	—	—	—
Q15	94.458	< 0.01*	10.861	< 0.01*	7.405	< 0.01*	4-[1,2],3-[1,2]	[2,3,4]-1	exp3-4	4-[1,2,3],3-[1,2],2-1	—	exp3-4	4-1,3-[1,2]	[2,3,4]-1,4-2	—	—	—	—
Q16	49.063	< 0.01*	7.610	< 0.01*	1.838	0.0629 +	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Q17	110.255	< 0.01*	14.366	< 0.01*	3.204	< 0.01*	exp4-3	[2,3,4]-1	exp4-3	exp4-3	—	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1,3-2	[3,4]-1	—	—	—	—
Q18	70.384	< 0.01*	2.851	0.0432*	3.276	< 0.01*	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1	exp4-3	—	—	[2,3,4]-1	[3,4]-1	—	—	—	—
Q19	106.322	< 0.01*	3.778	0.0141 *	2.362	0.0146 *	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1	exp3-2	—	3-[1,4]	—	[4,3]-1	—	—	—	—
Q20	51.357	< 0.01*	21.644	< 0.01*	5.644	< 0.01*	—	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1,3,4]-2,4-3	—	exp2-2	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1	—	—	—	—
Q21	93.864	< 0.01*	21.236	< 0.01*	9.779	< 0.01*	—	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1,3,4]-2,4-3	—	3-[1,4],2-[1,4]	[2,3,4]-1	[2,3,4]-1,4-2	—	—	—	—

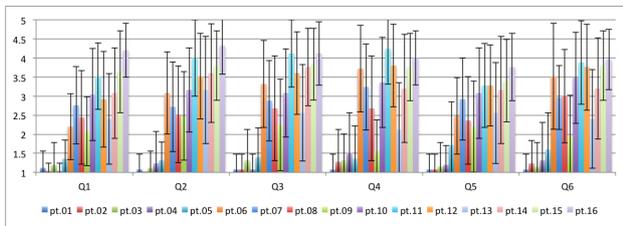


図 8: 実験 1 Q1-Q6 平均値グラフ- 主観評価

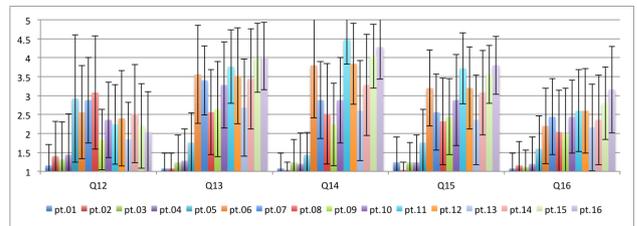


図 10: 実験 1 Q11-Q16 平均値グラフ- 主観評価

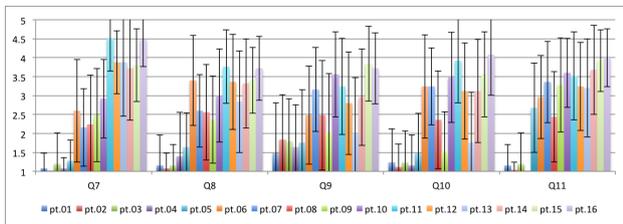


図 9: 実験 1 Q7-Q11 平均値グラフ- 主観評価

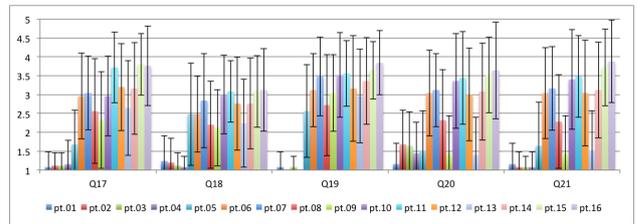


図 11: 実験 1 Q16-Q21 平均値グラフ- 主観評価

5.1 実験の設定

仮説: 前後の振動開始時間を強制的に与えると、音の物理的通過感を付与することができ、臨場感を向上し、位置感取得にも繋がる。

被験者: 19~23 歳の男女 25 名。

条件: 「振動開始時間差」を要因 A (被験者内要因: 水準数 11) とし、a1:0ms-a11:1000ms の 11 条件を設定した。(表 3)。

実験手順: 被験者に振動モータアレイデバイスとヘッドフォンを装着してもらう。ヘッドフォンからはバスドラム音が約 30 秒流れる。その際、振動モータアレイデバ

イスの前部モータは音と同期して振動し、後部モータは前部モータに遅れて振動する。後部モータは 0-1000ms 間で 100ms 区切りに設定された合計 11 個の遅延差のパターンを、順序交差を考慮し被験者に提示する。

評価項目: 実験参加者には MOS 法で以下の 19 節の実験の評価項目を用いた。

振動開始時間差に関わる項目として質問 1-4 を設定した。特に質問 2 については前側のモータは音と同期して動くので、音の再生とモータが回転し振動が伝わるまでのラグを検証するものである。臨場感に関わる項目として質問 5-13 を設定した。音の通過の性質に関わる項目として質問 14-15 を設けた。音と振動に対する快感・不

表 3: 実験時の振動開始時間差のパターン
振動開始時間差 (A)

pt.01	0ms
pt.02	100ms
pt.03	200ms
pt.04	300ms
pt.05	400ms
pt.06	500ms
pt.07	600ms
pt.08	700ms
pt.09	800ms
pt.10	900ms
pt.11	1000ms

快感に関わる項目として質問 16-19 を設定した。

被験者は音楽聴取フェーズの後、5段階 (5:あてはまる, 4:まああてはまる, 3:どちらでもない, 2:まああてはまらない, 1:あてはまらない) で以下の各項目の評価を行った。

- Q1:前の振動より後ろの振動が遅かった
- Q2:身体の前側の振動は音よりも遅かった
- Q3:身体の後側の振動は音よりも遅かった
- Q4:音が前から後ろへ通り抜けたように感じた
- Q5:本物のバスドラム音に聞こえた
- Q6:目の前でバスドラムが演奏されているように感じた
- Q7:バスドラムから出た音が身体の前面に当たった
- Q8:バスドラムから出た音が身体を貫いた
- Q9:バスドラムが近い場所にあるように感じた
- Q10:音に対する迫力をより感じた
- Q11:振動は音に対して自然であった
- Q12:音に包まれている感じがした
- Q13:振動に違和感を感じなかった
- Q14:音が肉を通過した
- Q15:音が骨を通過した
- Q16:音に心地よさを感じた
- Q17:振動に心地よさを感じた
- Q18:音と振動の調和に心地よさを感じた
- Q19:音が身体を通り抜ける感覚に心地よさを感じた

5.2 主観評価の実験結果

すべての評価項目について5段階で評価させた後、分散分析を行った。分散分析は有意水準を $P=.05$ とし、「振動時間差」の1要因に関して行った。19の評価項目についての平均と標準偏差を図12-15、分散分析結果を表4に示す。Q2とQ7について有意差を得られなかった。振動開始時間差に関わる項目としてQ1とQ3においては

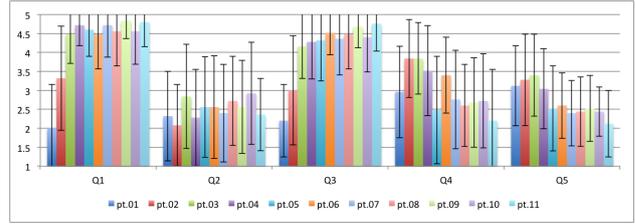


図 12: 実験 2 Q1-Q5 平均値グラフ- 主観評価

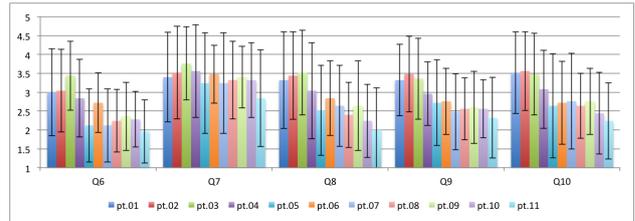


図 13: 実験 2 Q6-Q10 平均値グラフ- 主観評価

有意差を得た。わずか 100ms きざみの違いでも人間は知覚することがわかる。Q2 について有意差は得られなかった。Q2 で有意差が得られなかったことで音の再生とモータが回転し振動が伝わるまでのラグはないことがわかった。臨場感に関わる項目として Q7 を除く Q5-Q13 で有意差を得た。Q5-Q9 よりバスドラムが被験者の目の前にかつ近い場所にあるように感じさせる事ができ、さらにその音が身体を通過させる感覚をあたえられていることがわかった。Q10-Q12 より振動開始時間差が迫力を増加し、特に 200ms-100ms の時に自然に感じられることがわかった。音の通過の性質に関わる項目として質問 Q14 と Q15 では有意差を得た。MOS の結果をみると Q14 のほうが高い数値を示している事から音の物理的通過感肉を通過する感覚に近いことがわかる。音と振動に対する快感・不快感に関わる項目として Q16-Q19 で有意差を得た。振動開始時間差があっても心地よさを感じ、特に振動開始時間差が 200ms-100ms の時に音の物理的通過感によっても心地よさを与えられることがわかった。

6. 考察

前後左右振動による臨場感向上効果の有効性及び振動による聴取への影響の検証においては結果より、振動なしよりも振動ありの場合のほうがより臨場感を向上させ没入感を得られることが考えられる。特に音量が小さい場合でも振動がない場合と比べると振動ありのほうがより臨場感が向上し、音も大きく感じられることが考えられる。また振動と音の調和に関しても心地よさを感じら

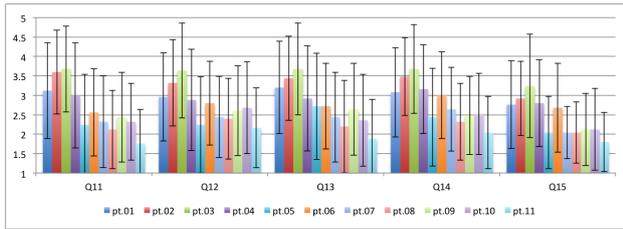


図 14: 実験 2 Q11-Q15 平均値グラフ- 主観評価

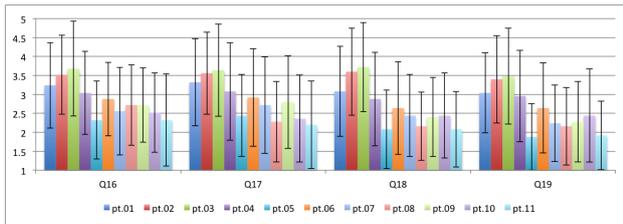


図 15: 実験 2 Q16-Q19 平均値グラフ- 主観評価

れる事が考えられるが、振動が強すぎると心地よさが減る可能性も考えられる。

音の物理的通過感を感じられるかの検証においては結果より、人間は振動差が 100ms ごとの違いでも感じる事ができると考えられる。また振動差が 100ms-200ms の時にバスドラムが目の前で演奏されてるように感じ、その音が違和感無く自然に身体を通り抜ける感覚があることが考えられる。音の通過の性質に関しては肉を通過したか骨を通過したかについて有意差がでたものはほとんど同じであったが、MOS の平均値より音は骨よりも肉を通過する感覚であることが考えられる。加えて振動差が 100ms-200ms であれば心地よく音の物理的通過の感覚を体験する事ができると考えられる。これらのことより人間は音の物理的通過感を感じる事ができ、音の聴取へ臨場感や定位感を与える事に繋がると考えられる。

7. おわりに

本稿では、音の聴取と共に前後左右から振動を付与する手法と音の物理的通過感を付与する手法の検証と考察を行った。結果として音楽聴取時に前後左右から振動を付与する事は臨場感や迫力向上につながる事がわかった。また、音の物理的通過感を感じさせる事によっても臨場感を向上する事につながる事がわかり、音源位置の把握につながる事が期待される。今後として聴取する音の定位移動と共に通過感を伴った振動も移動するとさらに臨場感が向上するのか、振動のエンベロープによって音の聴取の印象は変化するのかなどを検証していきたい。

表 4: 音の物理的通過感についての検証の分散分析結果

	振動時間差 (A)		多重比較 (要因 A)
	F(19)	p	
Q1	26.049	< 0.01*	[3,4,5,6,7,8,9,10,11]-[1,2],2-1
Q2	1.566	0.1174	—
Q3	19.402	< 0.01*	[3,4,5,6,7,8,9,10,11]-[1,2],2-1
Q4	6.845	< 0.01*	6-11,4-[5,11],3-[5,7,8,9,10,11],2-[5,7,8,9,10,11],
Q5	5.959	< 0.01*	4-11,3-[5,6,7,8,9,10,11],2-[7,8,10,11],1-11
Q6	7.448	< 0.01*	4-11,3-[5,7,8,9,10,11],2-[5,7,8,11],1-[5,7,11]
Q7	1.464	0.1538	—
Q8	6.021	< 0.01*	3-[5,8,10,11],2-[8,10,11],1-[10,11],4-11
Q9	5.115	< 0.01*	3-[7,11],2-[7,8,9,10,11],1-[7,11]
Q10	5.760	< 0.01*	3-[10,11],2-[5,8,10,11],1-[5,8,10,11]
Q11	9.516	< 0.01*	4-11,3-[5,6,7,8,9,10,11],2-[5,6,7,8,9,10,11],1-[8,11]
Q12	6.809	< 0.01*	3-[4,5,6,7,8,9,10,11]2-[5,7,8,11]
Q13	7.590	< 0.01*	3-[5,6,7,8,9,10,11],2-[7,8,10,11],1-[8,11],4-11
Q14	8.050	< 0.01*	6-1,4-[8,11],3-[5,7,8,9,10,11],2-[5,7,8,9,10,11],1-11
Q15	8.643	< 0.01*	6-11,4-[5,7,8,11],3-[5,7,8,9,10,11],2-[5,7,8,9,10,11],1-11
Q16	7.343	< 0.01*	3-[5,6,7,8,10,11],2-[5,7,8,9,10,11],1-[5,11]
Q17	7.600	< 0.01*	4-11,3-[5,7,8,9,10,11],2-[5,7,8,10,11],1-[5,8,10,11],
Q18	10.037	< 0.01*	3-[4,5,6,7,8,9,10,11],2-[5,6,7,8,9,10,11],1-[5,8,11]
Q19	10.270	< 0.01*	4-[5,8,11],3-[5,6,7,8,9,10,11],2-[5,6,7,8,9,10,11],1-[5,7,8,11]

謝辞

本研究は一部科研費 15H01698, 24300047 および 25700021 の助成を受け実施したものである。

参考文献

- [1] 鈴木陽一. マルチモーダル情報処理の時代と音響技術 (特集 音響技術). パナソニック技報, Vol. 54, No. 4, pp. 237-242, jan 2009.
- [2] 中村恵子, 高橋由紀. 体感音響装置 (ボディソニック) を使用した音楽鑑賞によるリラクゼーション効果の検討. 日本看護技術研究学会誌, Vol. 5, No. 1, pp. 58-65, 2006.
- [3] 柳翔太, 吉田直人, 米澤朋子. 振動モータアレイを使った音楽の物理的臨場感提示システムの提案. 情報処理学会研究報告. EC, エンタテインメントコンピューティング, Vol. 2015, No. 3, pp. 1-6, feb 2015.
- [4] 佐々木信之, 大埴聡, 石井一嘉, 原川哲美. 視覚障害者, 盲ろう者のための少数点振動子による音楽表現の研究. 筑波技術大学テクノレポート, Vol. 21, No. 1, pp. 134-135, dec 2013.
- [5] 猪狩理, 鎌田一雄. 触覚刺激を利用した楽音伝達の基礎検討. 電子情報通信学会総合大会講演論文集, Vol. 1996, p. 372, mar 1996.
- [6] 三浦宗介, 杉本雅則. T-rhythm: 振動デバイスを用いたリズム学習支援システム (教育工学). 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム, Vol. 89, No. 6, pp. 1260-1268, jun 2006.

- [7] 井手口健, 熊田信義, 永野秀和. 印象強調を目的とした音楽聴取時の振動付与方法の検討. 感性工学研究論文集, Vol. 3, No. 1, pp. 53–62, 2003.
- [8] 永野秀和, 井手口健, 畑地洋彦. アコースティックギターを用いた音楽の体感聴取方法の検討. 電子情報通信学会論文誌. A, 基礎・境界, Vol. 87, No. 11, pp. 1460–1465, nov 2004.
- [9] 古屋友和, 柳澤祐貴, 伊東一典. 空気噴流刺激による音色の心理的印象の惹起方法に関する基礎的検討 (ヒューマン情報処理, <特集>ヒューマンコミュニケーション～人間中心の情報環境構築のための要素技術～論文). 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム, Vol. 94, No. 1, pp. 77–85, jan 2011.
- [10] 櫻木怜, 池野早紀子, 岡崎龍太, 梶本裕之. 鎖骨を介した振動伝播による体内触覚提示. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2014 論文集, Vol. 2014, pp. 133–136, sep 2014.