

# 呼吸の位相に音楽フレーズを合わせて呈示した場合のアンケート調査報告

佐藤 尚<sup>1,a)</sup> 白木 善史<sup>1</sup> パブロ・ナバガブリエル<sup>1</sup> 鎌本 優<sup>1</sup> 守谷 健弘<sup>1</sup>

概要：我々は呼吸と音楽の一期一会を目指し、呼吸情報を活用する音楽呈示デバイスの研究を行っている。研究中の呈示手法では、あらかじめ音楽フレーズに対して何処で吸うべきか吐くべきかといった呼吸の位相とその同期の重要度を記録しておき、再生時にその記録と鑑賞者の呼吸が近づくように、音楽の再生速度を変化させている。今回の発表では音楽的な MIDI 音を素材として用い、音をオリジナルのまま流した場合と開発した呈示手法を用いた場合とを、デモ展示の来場者を対象にブラインドで聴いてもらい、良い悪いの順位付けを行ってもらった簡易アンケート結果を報告する。同じ MIDI 素材にもかかわらず、開発された手法で呈示された場合の順位付けに、好き嫌いの傾向の差が大きいことを確認した。

## 1. はじめに

近年の音楽端末の発展により、我々が音楽と親しむ機会と時間は爆発的に増えたと言ってよいだろう。ネットワークの広帯域化や CPU の高速化が行われ、より豊かな情報環境をパーソナルレベルで享受できる時代が到来している。しかしながら、現在の音楽呈示装置の基本的な枠組みは、高品質で録音しそれを忠実に再現するという方向からあまり大きく変わっていない。そこで、一般的なツールとして普及が期待される人間情報センシングと情報処理技術の発展を融合し、個々のユーザーに適した高品質な音環境を提供することを本研究では最終的な目標に据えた。

音楽を聴くことで楽しくなる、悲しい気持ちを慰めるといったことは多くの人々が体験していることだが、実際に音楽を聴くことで、我々の生理状態が変化することが知られている。例えば心拍数、発汗や瞳孔径は大きく変化することが知られているが、これらの生体情報をリアルタイムに反映させることにより、人間と音との一期一会の出会いを提供するデバイスの作成を目指している。

数ある生体情報の中で、我々は呼吸に着目している。それは、音楽と呼吸の間にもある程度のある関係があることがわかってきているからである [1]。例えば、音楽を受動的に聴くだけで呼吸変化が生じることが知られており、この傾向は一般の実験参加者より、音楽経験者で大きいことが報告されている [2], [3]。ただし、これらの研究では主に呼吸周

期とテンポという観点からしか解析がなされていないという問題があった。

しかし、最近の著者らの研究から [4]、音楽聴取による呼吸変化は、呼吸周期が音楽のテンポに近づくというよりは、ある音楽的なタイミングと呼吸の位相が揃ってしまう現象であり、個々人による癖があることが分かってきた。ここで言う音楽のタイミングは、小節の頭や、フレーズの始まり、歌詞のはじまりといった、なんらかの特徴的な変化がみられる楽譜上の位置を指す。演奏者と聴取者または演奏者間での呼吸の相互引き込みがあるという報告 [5], [6] もあることから、音楽と呼吸の関係は、単なる呼吸の周期と音楽のテンポではなく、呼吸の位相と音楽のタイミングに注目することが重要であると考えられる。

そこで、我々は新たな音楽呈示デバイスを設計するにあたって、呼吸位相と音楽タイミングの同期を実現できる効果的な音楽呈示の方法を模索してきた [7]。前回の報告では、体性感覚を用いた呼吸指示をおこない、聴取者の呼吸状態を積極的に変えてもらうことで、再生音と呼吸タイミングを合わせることを行い、音楽の印象にある程度の影響があることが分かった。しかしながら、呼吸指示に呼吸を合わせることに意識を取られてしまうという問題があった。そこで、我々は聴取者の呼吸変化を積極的に促すことはおこなわず、音楽再生の速度を変えることによって、呼吸の位相と音楽タイミングの同期を実現し、その影響を調べることにした。この音楽呈示装置は音楽データに対して、どこで吸うか吐くかといった呼吸の楽譜に相当するような目標データを付与し、聴取者の呼吸を測りながらこの呼吸目標になるべく近い状態で音楽データが再生されるように再

<sup>1</sup> 日本電信電話（株）、コミュニケーション科学基礎研究所  
NTT Communication Science Laboratories, Nippon Telegraph and Telephone, Atsugi, Kanagawa 243-0198, Japan

<sup>a)</sup> takashi\_goto\_sato@ieee.org

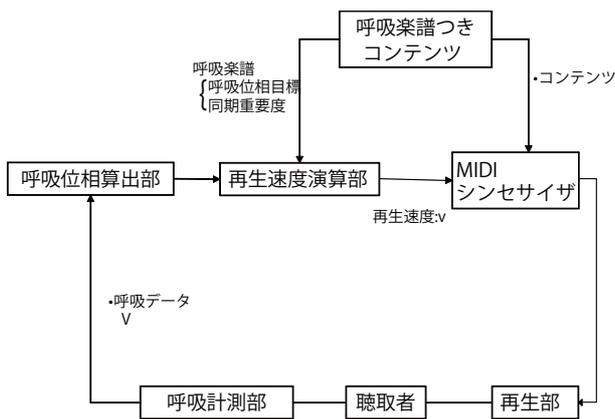


図 1 システムブロック図. 計測された呼吸は位相情報に変換される. 再生速度調節部では, 現在の再生位置に記録された呼吸楽譜つきコンテンツの呼吸目標情報と計測された呼吸を比較し, 両者が近づくように再生速度を調節する.

Fig. 1 Block diagram of the present system.

生速度の調節を行う [8]. その結果, 聴取者はあらかじめ呼吸の楽譜に記録されていた呼吸状態に近い形で音楽を聴くことになる. このシステムデザインを採用したことにより, 呼吸の楽譜を切り替えるだけで同じ MIDI 音源でも異なるコンテンツとして存在できるようになっており, 将来的に個人特性などを取り込めるようになっていく.

本報告では平成 25 年 6 月 6 日, 7 日に開催された NTT コミュニケーション科学基礎研究所のオープンハウス会場にて上記のシステムをデモ展示し, 来場者に対してアンケートを取った結果を中心に報告を行う.

## 2. 音楽呈示装置の概要

### 2.1 概要

詳しくは既に CHI2013[8] にて発表した内容であるが, 簡単に構成を説明する. 開発した音楽呈示装置は図 1 に示すブロック図のように構成される.

呼吸計測部では聴取者の呼吸を呼吸計測バンドにより計測し, 肺容量に相当する値が出力される (ニホンサンテック Polyam-RESP). この出力は 500 Hz でサンプリングされている. あらかじめ 2 Hz のローパスフィルタ, および時定数 3 秒のローカットをかけ, ノイズは取り除いている. 呼吸位相算出部ではこの呼吸出力を位相情報に変換する. 周期信号から位相を求める手段は複数存在するが, 本研究では短時間ヒルベルト変換による位相遅れ信号を求め, 擬似的な解析信号とすることで位相情報に変換している [9]. 横軸に呼吸計測機からのこの際, ヒルベルト変換を求めるために用いるフーリエ変換の窓幅は約 250 ms に設定した.

呼吸楽譜つきコンテンツには, MIDI 情報とともに, 呼吸目標情報と同期重要度が記録されている. 呼吸目標情報はその記録された位置が再生される際に聴取者の呼吸がどの位相であるべきかを記したもので, 同期重要度はその目標と聴取者の位相をどのくらい合わせるべきかを表してい

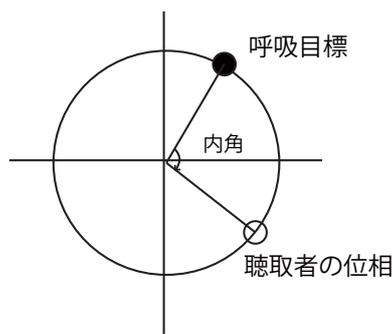


図 2 符号付きの位相差. 現在再生中の位置に記録された呼吸目標情報からみて, 現在の聴取者の位相が進んでいるか, 遅れているかを符号付きで計算する. 聴取者の呼吸の位相が遅れている (この図の) 場合, 再生速度を遅くすることで, 聴取者の位相が追いついてくるのを待つ. 逆に聴取者の位相が進んでいる場合は再生速度を早める.

Fig. 2 Internal angle with plus minus.

る. この呼吸目標情報と同期重要度がどのように呼吸のほうに合わせるかを定める情報であるため, 我々はこの二つを合わせて「呼吸の楽譜」と呼んでいる.

再生速度制御部では聴取者の呼吸位相と呼吸目標情報となるべく近くなるように再生速度の制御を行う. 具体的には呼吸目標情報  $\Phi(\tau)$  と聴取者の呼吸位相  $\phi(\tau)$  の方向つきの内角  $L(t)$  を次のように求める. ここでは  $t$  を時刻,  $\tau$  を時刻  $t$  に再生中の MIDI 上の位置 (例えば tick) としている.

$$L(t) = \begin{cases} \phi(t) - \Phi(\tau) & (|\phi(t) - \Phi(\tau)| < \pi) \\ \phi(t) - \Phi(\tau) - 2\pi \cdot \text{Sgn}(\phi(t) - \Phi(\tau)) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

次に, この内角を小さくする方向に再生速度を設定するが, その際に同期重要度  $\alpha(\tau)$  に基づいて次のように  $v(t)$  を変更している.

$$v(t) = C\alpha(\tau)L(t)^2 \cdot \text{Sgn}(L(t)) + 1 \quad (2)$$

ここで,  $C$  は係数である. また, 呼吸バンドからのノイズ混入に対して過度に反応しないよう,  $v(t)$  の範囲は 0.25 ~ 1.75 倍に制限をかけている.

## 3. デモ展示

### 3.1 目的

本呈示手法は他に例を見ない手法のため, 確立された評価手法等はない. 見たいものは音楽と呼吸が関連したことによる音の印象の違いであるが, 音の再生速度を個人に合わせて変えるため, 単純な比較は難しい. そこで今回は用いる MIDI 音源を固定し, それに対して 3 つの呼吸の楽譜を適用した場合に, その差異がデモ参加者に知覚されるかを調査することとした. 使っている MIDI 音源は変わらないため, 異なるのは再生速度の変化のみである. 呼吸の楽譜を切り替えただけで聞こえ方に顕著な差が見られたと

したら、開発した音呈示システムに何らかの効果が存在するといえる。呼吸の楽譜のみを変えた3種類の音を呈示し、呼吸に音楽を合わせた場合の印象のばらつきを調べることにした。

### 3.2 音源、呼吸楽譜

使用した MIDI は今回のデモのために作曲 (NTT ラーニングシステムズ社) したもので、音圧と音階が6秒周期で上下するように作成されている。細かい音形はあまり含まれておらず、再生速度の変化に対してもリズムの崩れが知覚されにくいようになっている。シンセサイザの音源は SampleTank2 (IK multimedia 社) を使用している。

追従すべき呼吸の楽譜として、3種類のパターンを用意した。一つは通常の再生である。これは同期重要度を0に設定した呼吸の楽譜を用いることで、同じシステムで再生することができる。二つ目は6秒周期で繰り返されるフレーズの始まりと、吸い始める位相が合わせられるようにしたものである。ただし、同期重要度はこのうち吸う位相でのみ大きく設定されており、吐く位相では通常の再生速度で再生される。3つめは同じくフレーズが始まると同時に吸い始める設定としているが、同期重要度は常に最大値を設定している。同期重要度は $-\pi$ から $\pi$ までの一様分布を0とするため最大値を3.29とし、係数 $C$ は0.61としたが、これらは適当に設定した値である。用いた3種類の呼吸の楽譜を対比した図を図3に示す。

### 3.3 デモ手順

デモに参加した来場者には、まず呼吸と音楽の同期再生の概要の説明をおこなった。特に詳しい制御方法などの説明は行っていない。デモの体験を希望された場合に着座してもらい、呼吸バンド (Polyam-RESP, ニホンサンテック社) とヘッドホン (K271, AKG 社 または ATH-SAX1a audio-technica 社) を装着してもらう。次に、呈示する内容は明かさなまま先ほどの3種類の呼吸の楽譜を順に呈示していく。その後アンケートにご協力いただける了解を得た場合に、アンケートを取った。アンケート回答後にどのような呼吸の楽譜が設定されているかを説明し、デモは終了となる。聴取中の呼吸データと呈示された音波形は2kHzでサンプリングされ、再生速度の変化情報は別途1kHzで記録されている。

### 3.4 アンケート内容

アンケートでは、3パターンの音を呈示したが、その違いを感じたかどうかをまず問い、次に「良かった」、「悪かった」という観点から順位付けを行った。アンケートの内容を図5に示す。

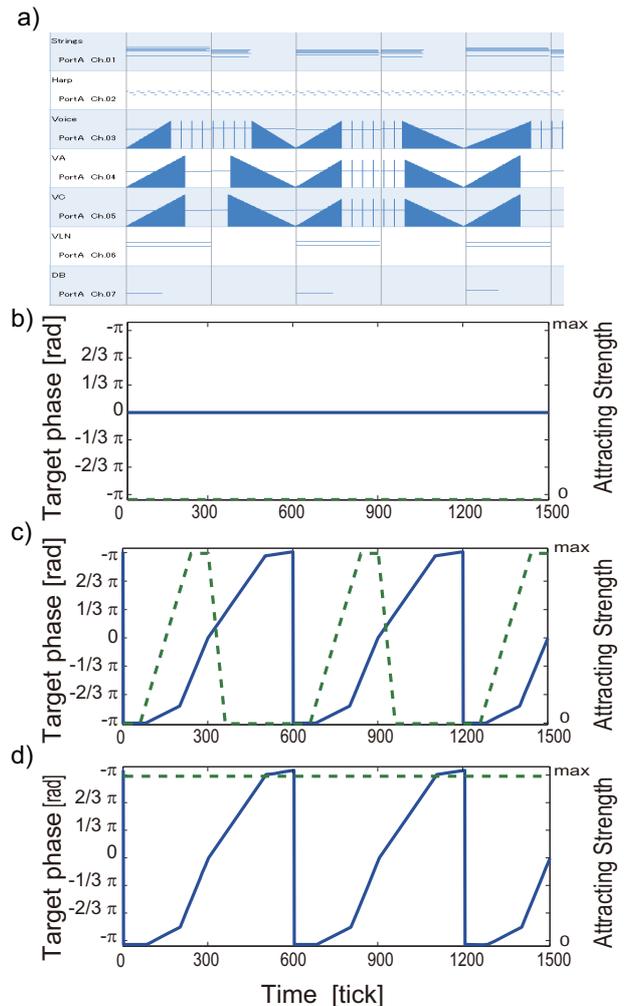


図3 a) デモで使用した MIDI ノートの一部。音高と音量が各楽器ごとに記載されている。2小節で1周期の音の高さの変化と音の大きさの変化を持つように作曲されている。b), c), d) MIDI ノートに対応付けられた呼吸目標情報と同期重要度をパターン別に示している。b) は同期重要度が0に設定されているため、呼吸と合わせる速度の調節は行われない。c) は音の音量が上昇し、音高が高くなる際に吸気になるように、逆に音の音量が下がり、音高も低くなる時に呼気に合わせるような呼吸目標情報が設定されている。しかし、同期重要度は吸気位相の時のみ値が大きく設定されているため、実際には音量が上昇するフレーズでしか再生速度の調節はおこなわれない。d), c) との違いは同期重要度の設定のみで、常に呼吸の位相に近づくようにフレーズ全域で最大値を取るよう設定されている。

Fig. 3 a) Part of the MIDI note, that used in the demonstration. Musical phrase that increase and decrease in loudness and pitch compose one cycle. b), c), d) are the target phases and attracting strengths set for the demonstration patterns. b) replays in normal way. c), d) target phase is set synchronize inspiration phase with increase phase in loudness and pitch of phrases. The difference between c) and d) are attracting strength.

## 4. 結果

165人より回答を得た。そのうち有効な回答数は159で

表 1 アンケート結果.  $\chi^2$  乗検定では 5%水準で分布が等しい仮定が棄却された. ボンフェローに補正による下位検定はパターン 3 のみに有意水準 10%で分布の等しさが棄却された.

Table 1 Result of questionnaire

	最も良い	中間	最も悪い
パターン 1	44	55	44
パターン 2	42	58	43
パターン 3	57	29	56

デモでは同じ一つの曲に 3 パターンの呼吸情報を付けました.

(1) パターンの違いは感じましたか?  
はい (質問 2 へ) ・ いいえ (質問 4 へ)

(2) 違いがあった場合, 最も良かったパターンはどれですか?  
1 番 ・ 2 番 ・ 3 番

(3) 違いがあった場合, 最も悪かったパターンはどれですか?  
1 番 ・ 2 番 ・ 3 番

(4) その他コメントをお願いします.

図 5 デモ体験者へのアンケート内容

Fig. 5 Questionnaire for demo participants

あった. パターンの間に違いがあると答えたのは 142 名で, 残り 17 名は違いがあまりないと答えた. 結果を表 1 に示す. 3 パターンの間で, 特に違いがなければ, 獲得する順位の頻度も等しいと考えられる. そこで, 頻度がすべて等しいと仮定してピアソンのカイ 2 乗分布による検定 (独立性検定) を行った. その結果 5%の有意水準で等分布の仮説は棄却された. 下位検定として, ボンフェローに補正によりパターン内での順位をばらつきを同じくカイ 2 乗検定にかけた. その結果等分布の仮定はパターン 3 の場合にだけ, 10%の有意水準で棄却された.

また, 参加者に音楽を呈示した際の再生速度の特徴についてまとめたものを図 4 に示す. 再生速度は 100 Hz までダウンサンプリングし解析に用いた.

## 5. 考察

本研究では呼吸のほうに合わせて音楽の再生速度をリアルタイムに変えるという試みを行った. この音楽呈示装置の特徴は, あらかじめ音楽に, どのような呼吸パターンで聞くのが望ましいかを記録した呼吸の楽譜をデータを用意し, そのデータと聴取者から計測されたデータを逐次的に突き合せ, 最小化する方向に再生速度を変化させることに特徴がある. オープンハウスという場を利用して多人数に対して実施した. その他の再生手法と比べて好み嫌いが分かれる傾向にあることがわかる.

パターン間の違いは主に再生速度の変化のみによってもたらされている. 従ってデータに何らかの特徴がみられる

場合には, それが再生速度の変化によってもたらされたのか, あるいは (我々が目標としている) 呼吸と音楽の揃い具合で生じたのかを区別する必要がある.

再生速度の変化に関しては図 4 に示した, 平均再生速度が速いと好みが高くなる, あるいは下がるといった傾向は見られなかった. すなわち単にテンポアップで順位付けが上がっているわけではないことを示している. また, 平均再生速度ではなく, 頻繁な再生速度の変更が好き嫌いに影響を与えている可能性も考えられる. 図 4 d)-e) のデータを見る限り, 顕著な影響は出ていないと思われる. しかし, これは音源の性質にも大きく依存しており, 今回はリズムの強くない音源を用いた故に影響が少なかったというべきだろう. 残念ながら今回は呼吸の楽譜と聴取者の呼吸の揃い具合に関してはデータの不整合がみられるため, まだ解析できていない.

今回は実験環境ではない所で, 音源として音楽を呈示する初の試みであったため, 問題点も多く見えてきた. 以下, 各項目ごとに議論したい.

### 5.1 呼吸バンドによる計測の安定性

呼吸バンドは非常に簡便な方法であるが, 必ずしも安定的に呼吸情報が計測できるわけではない. 服のよれや体格, 付け方によりノイズの多いデータになってしまう. また, 深呼吸と浅い呼吸の振幅差も大きいため, ゲインコントロールがうまく調節できない場合も見られた. 呼吸バンドの計測安定性に関しては, インピーダンス計や, マグネットメーターによる計測で解決する方向を模索中である [10].

### 5.2 呼吸の楽譜

本来呼吸の楽譜は音楽に対する個々人の聞き方に強く依存するため, 個々人に合わせたものを用意する必要がある. しかしながら今回は我々が適当に設定したものを利用した. また, 簡単のために呼吸目標情報を同じものを使い, 同期重要度を一部変更することでパターンの違いを作った. そのため参加者が音楽を聴くことによって引き起こされる呼吸変化, つまりどのように音楽と呼吸を合わせたいかのイメージと, 我々が設定した呼吸の楽譜がずれていると再生が進まなかったり, 逆に再生が早すぎて音楽に追い立てられる状況が生じてしまう. 後述する追従方法との兼ね合いでも決まるため, 明確な解決手段はない. しかし一つの方法として, 呼吸の楽譜の作成の際に同じ楽曲を聴いたときの呼吸データを大量にあつめ, その中から呼吸の合いやすい部分を抽出してくる方法が考えられる. 既にその作成する基本アルゴリズムは [8] にて一部紹介しているが, 大量にデータを集めることができれば検証していきたい.

### 5.3 教示の効果

全く何も知らないナイーブな参加者と, 今回のようにあ

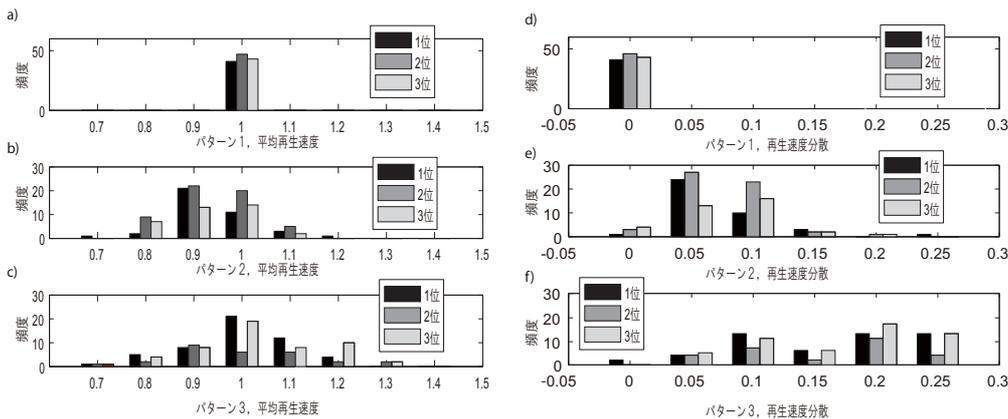


図 4 各呈示パターンごとにそのパターンを聞いた際の再生速度毎の頻度分布を作成した。そのパターンを何番に順位付けしたかで3群に分けている。a) パターン1 (再生速度変化なし) に対しての再生速度で分けた頻度分布。b), c) は a) と同じくパターン2 とパターン3 に関して分類した。d) パターン1 に対して再生速度の分散での頻度分布。e)f) は d) と同じくパターン2, パターン3 に関して再生速度の分散に基づいて頻度分布を作成した。いずれも平均や分散に有意差はない。

Fig. 4 Frequency distribution based on replay speeds and its variations. Distributions are categorized based on the rank order that participants gave.

る程度説明を受けた参加者で、反応が異なる可能性がある。そのため、今回のアンケートで違いを感じるかという質問に関して、「はい」と答えるバイアスはかなりかかっていると思われる。しかしながら、パターンの違いに関しては呼吸情報を利用しているという事前情報のみで、実際にどのパターンにどの方法がつかわれているかまでは知らされていない。そのため実際に違いを感じていない場合でもランダムな順位付けを行うはずである。従って、音楽と聴取者の呼吸を合わせ続けるパターン3の順位分布で有意差が出ていることは、我々の呈示方法が何らかの聴感上の印象に影響を与えているといえる。

#### 5.4 追従方法

本システムでは極端に再生速度が変わると音楽性を失ってしまう恐れがあると考え、再生速度の変化に限界点を設けている。しかしながら、呼吸変化はこのリミッターよりも大きく生じるため、追従しきれない状況がデモ中に散見された。例えば、呼吸目標情報が聴取者の呼吸より遅れている状態では再生速度を早めることで位相差を縮小しようとするが、リミッターで最大速度は1.75倍に制限されている。しかし呼吸が2倍以上変化することは頻繁に生じる、この状況がしばらく続くと位相の遅れが広がっていく。ところが、半周期以上ずれると今度はシステム側では位相が半周期早い状況と判断しなおし、再生速度を逆に遅くすることで位相差を近づけようとする。結果的に位相差は瞬間的に近づくが、音楽を呼吸の楽譜の通り聞くとという本来の趣旨からずれた状況になってしまうのである。今回はオリジナルで音楽周期が6sの曲を用意したがこれは一般的な

呼吸周期よりはやや長い。会場では来場者が歩き回っている状態であるため、安静時より呼吸が早くなっており、その結果、音楽が1周期回る間に呼吸が2周期進んでしまう状況を生みやすくなっていたと考えられる。そのため、アンケート結果にも影響を与えている可能性があり、現在調査中である。

#### 6. 結び

音楽に対して自然に呼吸が合ってしまうという現象を逆手に取り、呼吸に合わせて音楽を呈示するというコンセプトをもとに音楽呈示装置を作成した。聴取者に追従させる呼吸の楽譜として呼吸の呼吸目標情報と同期重要度を音楽データに付与し、呼吸の位相を再生速度を変化させることで近づけることを行った。デモ参加者のアンケート結果では、常に呼吸と音楽を合わせるパターン3で好き嫌いははっきりと分かれる傾向にあり、呼吸の位相に音楽を合わせる何らかの印象上の変化を生む可能性を示している。システムとしては未だ未完成で、評価手法も含めて対処すべき問題も多いが、今後さらなる実験と改良を通じてその意義を明らかにしたい。

#### 参考文献

- [1] Haas, F., Distenfeld, S. and Axen, K.: Effects of perceived musical rhythm on respiratory pattern., *J Appl Physiol*, Vol. 61, No. 3, pp. 1185-1191 (1986).
- [2] Bernardi, L., Porta, C. and Sleight, P.: Cardiovascular, cerebrovascular, and respiratory changes induced by different types of musics in musicians and non-musicians: the importance of silence, *Heart*, Vol. 92, pp. pp.445-452 (2006).

- [3] Bernardi, L., Porta, C., Casucci, G., Balsamo, R., Bernardi, N. F., Fogari, R. and Sleight, P.: Dynamic interactions between musical, cardiovascular, and cerebral rhythms in humans, *Circulation*, Vol. 119, No. 25, pp. 3171–3180 (2009).
- [4] T. G. Sato, M. Ohsuga, T. M.: Increase in the timing coincidence of a respiration event induced by listening repeatedly to the same music track, *Acoustical Science and Technology*, Vol. 33, pp. 255–261 (2012).
- [5] YAMAMOTO, T., FUJII, N. and MIYAKE, Y.: A musical communication between a player and a listener, *Proceedings 2003 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, IEEE, pp. 330–335 (2003).
- [6] Müller, V. and Lindenberger, U.: Cardiac and Respiratory PPattern Synchronize between Persons during Choir Singing, *PLoS ONE*, Vol. 6, p. e24893 (2011).
- [7] 佐藤尚大須賀 美恵子守谷健弘：呼吸とリズムを合わせる音楽呈示の可能性-呼吸とフレーズの位相関係の違いの効果-, 題92回SIGMUS (2011).
- [8] T. G. Sato, Y. Kamamoto, N. H. T. M.: A Playback System that Synchronizes the Musical Phrases with Listener's Respiration Phases, *CHI2013*, pp. 1035–1040 (2013).
- [9] Kotani, K., Takamasu, K., Jimbo, Y. and Yamamoto, Y.: Postural-induced phase shift of respiratory sinus arrhythmia and blood pressure variations: insight from respiratory-phase domain analysis., *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, Vol. 294, No. 3, pp. H1481–H1489 (online), DOI: 10.1152/ajpheart.00680.2007 (2008).
- [10] Banzett, R. B., Mahan, S., Garner, D. M., Brughera, A. and Loring, S. H.: A simple and reliable method to calibrate respiratory magnetometers and Resptrace, *J Appl Physiol*, Vol. 79, pp. 2169–2176 (1995).