

曲中のブレスによる合図を利用した 伴奏システム

大三川晴香[†] 堀内靖雄[†]
西田昌史^{††} 黒岩眞吾[†]

我々は独奏者のブレスによる合図を伴奏制御のインタフェースとして利用可能な伴奏システムを開発してきており、以前の研究では曲の冒頭部においてブレスの合図を利用できるシステムを提案した。本研究では曲の冒頭だけでなく、曲中でもブレスによる合図を利用可能な手法を提案する。システムを実装し、人間の演奏者による評価実験を行った結果、ブレスによる合図を用いた方がずれが減少し、演奏者による主観評価も高いことが示された。

Accompaniment System Using Cue by Breath During Ensemble

Haruka Omikawa[†] Yasuo Horiuchi[†]
Masafumi Nishida^{††} Shingo Kuroiwa[†]

. We are developing the accompaniment system using musical cues by the soloist's breath. In our previous study, we introduced the method of using breath cues at the beginning of musical piece. In this study, we introduced the method using breath cues not only at the beginning but also during a piece and performed the evaluation experiment by human soloists. As a result, it was suggested that the new system achieved better synchronization between the soloist and the system than the previous system and the performers who used the system preferred the new system better than the previous system.

1. はじめに

音楽情報処理の一分野として伴奏システムが研究されている。伴奏システムとは、人間が行う伴奏のように、独奏者に協調した伴奏を計算機により実現しようとするシステムである。これは実用的な側面もさることながら、人間と計算機とのリアルタイム・インタラクションを考えることによって人間の動作を解き明かすといった認知的な側面も持ち合わせている。人間の実演奏ではテンポのゆらぎがあり、一定のテンポで伴奏を行うとずれが発生し、独奏と伴奏があっていない演奏となってしまう。またテンポ変化は演奏表現の一部であり、独奏者が録音された伴奏に合わせて合奏している場合は、その表現を制限されている事になる。伴奏システムはこの問題を解決するため、人間と同じように相手の演奏を聴き取って解釈し伴奏のテンポを制御する必要がある。

本研究で開発している伴奏システムでは独奏楽器としてフルートを対象としている。伴奏システムの処理の概要を図1に示す。まず伴奏システムは独奏者の演奏を楽器用の集音マイクを用いて音響情報として逐次取得する。次にシステムは取得した音響情報から音の高さを推定し、あらかじめ与えられている楽譜情報と照らし合わせて、演奏している位置を把握する。人間の実演奏は間違える場合もあるので、一度計算した結果をうまく再利用して、効率的に計算する DP マッチング (動的計画法) を使ってより確からしい位置を推定しなければならない。演奏している位置がわかったら、あらかじめ与えられている伴奏楽譜を演奏しながら、独奏者との合奏が不自然にならないように伴奏のテンポや音量の修正を行いながら合わせていく。伴奏の演奏には MIDI (Musical Instrument Digital Interface) と呼ばれる音色・音高・音の大きさといったデジタル情報で演奏情報を伝達する規格を用いている。MIDI を用いる理由は、あらかじめ録音された伴奏の音響情報を用いるのに比べ、テンポなどを制御することが容易だからである。テンポや音量が修正された伴奏出力は MIDI 信号として MIDI 音源に送信され、音響波形信号に変換された後、スピーカから出力される。

従来の伴奏システムでは独奏者と伴奏システムが曲の冒頭で同時に演奏を開始するような曲に対して、冒頭の音符を同時に発音することが困難であった。人間同士の合奏の場合、音響情報のみではなく独奏者が伴奏者に体の動き、視線、ブレス等の合図を送り、演奏タイミングやテンポなどの指示を伴奏者に対して行うことがあるのに対し、従来の伴奏システムではそれらの合図を利用することができず、独奏者がペダルスイッチを踏むことにより伴奏を開始させたり、独奏の音が演奏されてから即座に

[†] 千葉大学
Chiba University
^{††} 同志社大学
Doshisha University

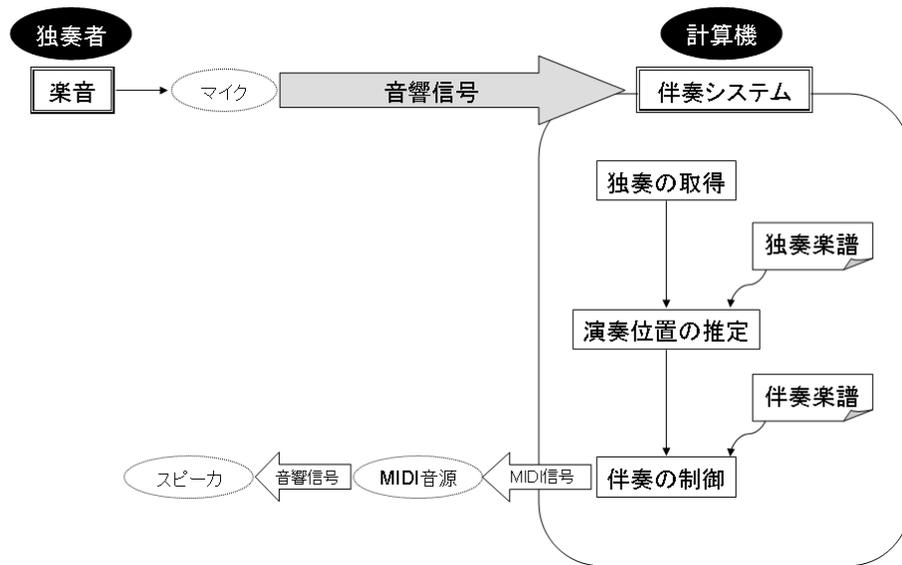


図 1 伴奏システムの処理の概要

伴奏を開始させたりする、などの方法がとられてきた。しかし、これらの方法は人間にとって非常に扱いにくく、人間同士のような自然な合図を行うことが困難であった。そこで本研究では、独奏者が伴奏システムに対し、演奏を制御するための合図を出すことができないかと考え、人間が通常の演奏で用いている合図のうち、ブレスによる合図に注目した。

ブレスとは息継ぎのことである。管楽器では楽器に息を吹き込んで演奏するが、ずっと息を吹き続けることはできないので時々息を吸わなければならない。そこで演奏中に息継ぎを行う。しかしながら、ブレスは息継ぎとしてだけではなく、合図として用いられる場合がある。楽器の音情報だけでは演奏を合わせにくい場合、独奏者がブレスの音によって演奏タイミングの指示を出し、伴奏者はそれに合わせて伴奏を行うことがある。例えば、曲やフレーズの出だしで独奏者と伴奏者が同じタイミングで合奏を開始する際、独奏者はその一拍前でブレスによる合図を出し、伴奏者はそのブレスから独奏者の演奏タイミングを予測して、独奏者と合わせるように伴奏を行うのである。そこで、本研究では伴奏システムに対するタイミング制御のためのインタフェースとして、ブレスによる合図を利用することとした。すなわち、伴奏システムに対し、

意図的に演奏以外の合図を送ることにより、独奏者の演奏意思を伝えるインタフェースを実現するということである。先行研究ではブレスによる合図と演奏開始のタイミングの分析結果から伴奏システムが人間の独奏者が曲冒頭に行ったブレスを検出して独奏と伴奏が同時に合奏を開始することのできるシステムを提案・実装し、評価実験を行ってその有効性を確認した¹⁾。しかしながら、先行研究の伴奏システムでは独奏者の合図としてのブレスが活用されているのは曲の冒頭のみで、曲中のブレスによる合図の活用がなされていない。実際の人間同士の合奏では、曲冒頭のみならず曲中でも合図によるタイミングやテンポの指示が行われることがあるため、伴奏システムにおいても、曲中のブレスによる合図を利用できることが望ましいと考えられる。

そこで、本研究では伴奏システムが曲中の独奏者のブレスによる合図を認識し、その合図から適切な伴奏制御を可能にすることを目的とする。これらの目的を達成するための手法をシステムに実装し、評価実験を行う。

2. 曲中のブレスによる合図を利用した伴奏制御

2.1 本研究で対象とするブレス

音響情報として入力されるブレスのうち、曲の途中で独奏と伴奏が同時に発音する際に、その一拍前を指示する合図として利用されるブレスを対象とする。特に、タイミングを合わせる音の直前まで独奏と伴奏の音が鳴っているのではなく、直前にブレスで合図が可能な休符あるいは音楽的な間が存在する箇所を対象とした（直前まで演奏される場合は、その後の音符がずれにくくなるため、通常は合図を出す必要はないため）。

2.2 ブレス箇所の表現方法

曲中でブレスを合図に利用する場合、システムに与えられている楽譜情報にどの位置で合図としてのブレスが提示されるのかをあらかじめ位置情報として入力しておく必要がある。しかし、曲中で楽譜上に休符を挿入するだけでは、楽譜情報としての休符とブレス位置を示す情報としての休符の判別が不可能である。また、特殊なソフトウェアを必要とせず、一般的な楽譜入力ソフトウェアで入力できれば利用しづらいものになってしまう。そこで本研究では、ブレスの1拍前に、対象の楽器の音域外の音をダミーデータとして、それぞれ1拍追加することとした。本研究の対象の楽器は独奏がフルート、伴奏がピアノであり、各音域はMIDIのノートナンバー（音高）で表すとフルートが60から96の間で、ピアノが21から108の間である。そこで独奏はMIDIノートナンバーが36、伴奏は12の音をブレスによる合図を表わすダミーデータとする。システムは楽譜上にこのデータを見出したらブレス検出処理を開始する。また、合図のブレスにおいては間が生じること等があり、テンポが不安定となるため、ブレス後の両者が合わせるべき音から再びテンポを初期化し、独奏と伴奏の演奏テン

ポを合わせるようにした。

2.3 楽譜中のプレス箇所の認識

楽譜上のプレスに該当する位置まで独奏が演奏されたら、伴奏システムは独奏者の演奏位置の追跡および伴奏パートの演奏を停止する必要がある。停止には楽譜に新たな情報として追加したダミーデータを利用する。

独奏部の処理

伴奏システムは独奏の演奏位置を推定する際に、音響情報を逐次取得し、その都度複数保持している状態候補（各状態は独奏者が現在演奏している可能性がある楽譜上の位置を意味する）に対して尤度の計算を行い、尤度が高いものから上位 30 位までの状態を保持している。演奏中は常に状態候補が複数あり、過去の状態遷移のログによって楽譜上の位置とテンポを計算している。システムは独奏者の演奏状態がプレスによる合図に到達した際に、状態候補が複数あると、プレスの処理をすべきか、通常の伴奏処理を継続すべきかによって、システムの挙動を大幅に変更する必要があるため、ここでは、最尤候補は正しく追跡できていると仮定し、それ以外の候補は削除することとする。そこで、独奏の最尤候補の次の状態としてダミーデータが来ることが分かった瞬間に、独奏の演奏位置の追跡を止めてプレス待機状態とし、現在の楽譜上の追跡位置をプレス開始の位置で停止している状態とし（独奏者のテンポがゼロであると仮定）、かつそれ以外の状態候補を削除する。

伴奏部の処理

システムは伴奏の演奏データにおいて、次にダミーデータの演奏イベントが来ることがわかった場合、まず、ダミーデータの直前までの MIDI イベントをスケジュール通りに実行し、ダミーデータの直前の状態で停止する（伴奏システムの演奏テンポをゼロとする）。その状態でプレス検出処理を行い、プレスが認識された後、伴奏の演奏テンポをリセットし、プレスから一拍後の時刻を推定し、その時刻から与えられたテンポで伴奏の演奏を再開し、独奏にあわせられるようにした。

2.4 プレス検出処理

曲中ではプレスの直前まで独奏の音が鳴っている状態である。そこで、プレスの 1 つ前の独奏者の演奏イベントに次がプレスであることを示すフラグを事前にセットしておき、その演奏イベントが最尤候補となった（その音符の演奏が開始された）瞬間に、上記のように演奏追跡を停止し、プレスの冒頭に強制遷移する。ただし、この段階ではまだその音が鳴っているため、その音が鳴り終わった後にプレス検出処理を開始する。プレスの立ち上がりでは独奏の音のパワーが上昇するため、パワー情報で検出することが可能であるが、もしプレスのパワーが小さいなどの理由によりプレスの検出に失敗した場合、次の楽音開始をプレスの開始と誤認識してしまうため独奏と伴奏が大きく食い違ってしまう。そのため、プレス検出処理では、入力された独奏の音がプレスなのか楽音なのかを区別する必要がある。プレス検出アルゴリズムでは、以

下の 6 種類の状態を定義し、各時刻の状態を決定することによりプレスまたは楽音を検出する。

- 状態 1:無音状態（無音が続いている状態）
- 状態 2:音が鳴り始めた状態（無音から有音になった状態）
- 状態 3:楽音が鳴り続けている状態（有音が続いている状態）
- 状態 4:プレスが鳴り続けている状態（有音が続いている状態）
- 状態 5:楽音が鳴り終わった状態（有音から無音になった状態）
- 状態 6:プレスが鳴り終わった状態（有音から無音になった状態）

この各状態の決定方法を図 2 に示す。まず、有音か無音かを示すパワーフラグ（初期値 0）を参照し、フラグが無音を意味する 0 の場合は現在の音響パワーとパワー閾値を比較し、閾値以下ならば状態 1 とし、それ以外の場合（パワーが閾値を越えた場合）は状態 2 としてパワーフラグを 1 にする。次にパワーフラグが 1 の場合、自己相関を算出し、調波性がみられたら（その音が楽音であることを意味する）、自己相関フラグ（初期値 0）を 1 にする。その後、現在の音響パワーとパワー閾値を比較し、閾値以上ならば（楽音やプレスが鳴っている状態）自己相関フラグを見てその値が 1 ならば状態 3 とし、0 なら状態 4 とする。また、閾値未満ならば（楽音やプレスが終わった状態）、自己相関フラグを見てその値が 1 なら状態 5 とし、0 なら状態 6 としてパワーフラグを 0 にする。

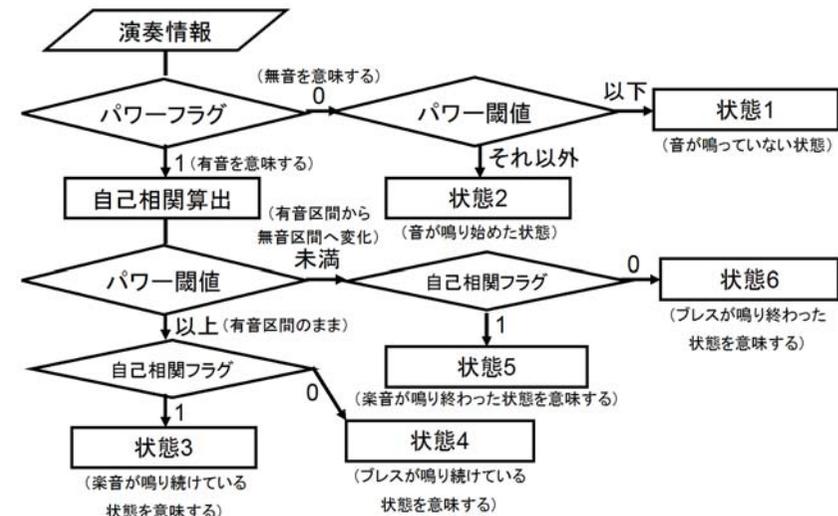


図 2 状態決定法の概要

上記において、状態2のときは有音（ブレス、楽音、ノイズ）の開始を意味するため、この立ち上がり時刻を記録する。その後状態5または状態6になった場合、立ち上がり時刻からの経過時間が短い場合にはノイズと判定し、それ以外の場合にはブレスまたは楽音を検出されたとする。有音が続いている場合、状態3または状態4となるが、立ち上がり時刻からの経過時間がある閾値を越えたら、ブレスまたは楽音を検出されたとする[a]。これらにより、ブレスまたは楽音を検出された後、伴奏制御を再開する。

2.5 遅延補償

伴奏システムがブレス検出時に音響情報を認識して、ブレスか楽音かの判別を行うためには、音の立ち上がりから最長120ミリ秒程度がかかる。これをそのままにして演奏を行っていきと伴奏が独奏よりも遅れてしまい、不自然な伴奏になってしまう。そこで、ブレスが検出された場合には、その検出に要した時間を考慮して独奏の開始時刻を推定し、その時刻から伴奏を再開する。楽音を検出された場合には、独奏と伴奏の楽譜位置を検出に要した時間だけ先に進めて、そこから伴奏を開始するようにした。具体的な処理としては、まず音響情報を分類し、状態3（楽音が鳴り続けている状態）および状態5（楽音が鳴り終わった状態）の場合、音の立ち上がり時刻からの経過時間を遅延時間として取得しておく。次に独奏と伴奏の楽譜位置をその遅延時間の分だけ進め、その楽譜位置から独奏と伴奏を開始させる。これにより、より自然な合奏開始が可能となる。

3. 評価実験

3.1 実験の目的

曲中で独奏と伴奏が同時に発音する際、その1拍前にブレスによる合図を利用する場合と利用しない場合の曲をそれぞれ人間の演奏者に行ってもらい、ブレス直後の独奏の音の立ち上がり時刻と伴奏の音の立ち上がり時刻とのずれを調べることによって、曲中のブレスによる合図の伴奏制御に対する有効性を評価することを目的とする。また、演奏者に従来手法と提案手法の伴奏システムのどちらが好ましいかを比較してもらうことによって、人間の演奏者による主観評価をもう1つの目的とする。

3.2 実験参加者

実験に参加した演奏者は音楽大学フルート専攻の卒業生一名（以下、演奏者A）とフルート経験25年以上のアマチュアのフルート演奏家（以下、演奏者B）の二名である。

a) 有音区間が終了した段階でブレスまたは楽音を検出するのでは、伴奏制御の再開が大幅に遅れてしまうことがある。

3.3 実験に用いた曲

データ収録にはA.Dvorak作曲の「ユーモレスク第7曲」を収録用に編曲して使用した。また、曲中のブレスによる合図を利用するために楽譜上のブレス利用位置にダミーデータを追加した曲1と、比較用に同じ曲でダミーデータを追加していない曲2を用意した。（以下、曲1に追加したブレス利用位置を曲冒頭から演奏される順にaからeとする）。曲1のブレス位置a～eを図3及び図4に示す。楽譜上で15mbと記されている音符がダミーデータである。



図3 ブレスの位置（上からa,b）



図 4 ブレスの位置 (上から c,d,e)

3.4 実験手順

上述の2種類の楽曲(曲1, 曲2)に対し, 各楽曲5回ずつデータを収録し, 演奏者一人あたり合計10回の演奏を行ってもらった. 楽譜の演奏順番は演奏者Aが先に曲2を収録してから曲1を収録し, 演奏者Bは順番を逆に収録を行った. 曲中のブレスによる合図の位置および方法の説明は各演奏者とも曲1を演奏する直前に行い, 実際に伴奏システムを動かして何度か練習を行い, 十分に曲中のテンポおよびブレスの合図に慣れてから収録を行った. 収録後各演奏者に対して, 「どちらの方が独奏を行いやすいか?」および「どちらの方が好ましい合奏であったか?」と質問し, 曲1と曲2のどちらかを選択してもらった.

3.5 実験環境

伴奏システムは Genuine Intel(R) CPU T2600 @ 2.16GHz(1.00GB RAM)Microsoft Windows XP Professional 2002 (SP2)が動作するコンピュータ上で Microsoft Visual C++ .net 2003 を用いて実装された. また, 音源として Edirol SD-20, オーディオインタフェースとして Edirol UA-20 を用いた. 実験において, 独奏者はヘッドフォンにより伴奏システムの音を聞きながら演奏を行った.

3.6 実験結果

曲中で独奏と伴奏が同時に演奏を開始する際, その1拍前にブレスによる合図を利用する場合と利用しない場合のどちらがより同期がとれているかを分析するため, 曲1と曲2のブレス位置aからeについて, ブレス直後に人間の演奏者が演奏を開始した時刻(ブレス直後の楽音の立ち上がり時刻)と伴奏システムが演奏を開始した時刻(演奏者のブレス直後の楽音の立ち上がり時刻)の時間的なずれ(伴奏の立ち上がり時刻から独奏の立ち上がり時刻を引いたものとする. 単位ミリ秒)を求め, その絶対値の平均を算出した. 結果を表1に示す. 表より, 提案手法を実装したシステムのほうが独奏と伴奏とのずれがより少ないということがわかる. 先行研究1)より人間は独奏と伴奏との演奏のずれが70~80ミリ秒までしか許容できないことがわかっている. 曲1については許容範囲よりも大幅に下回っているが, 曲2については全体的に曲1よりもずれが大きく, 許容範囲を超えたものもいくつか存在する.

今回の実験では演奏者Aと演奏者Bで曲の演奏順を逆に収録を行った. これは演奏者がブレス後の伴奏システムの伴奏出力のタイミングに慣れることにより, 後半に演奏を行う曲のずれが小さくなるのではないかと考えた実験手順である. そこで, 演奏者ごとの曲1, 曲2の各ブレス位置の独奏と伴奏との演奏のずれの絶対値の平均値のグラフを図5, 図6に示す. 図5, 図6ともに菱形のプロットが曲1, 白丸のプロットが曲2の演奏のずれをそれぞれ示している. これらの図より, 慣れを考慮に入れても曲1のほうがおおむねずれが小さいことがわかる.

表 1 独奏と伴奏とのずれ (ミリ秒)

	楽譜位置	演奏者 A	演奏者 B	平均
曲 1 ブレス合図有り	a	27.8	27.6	27.7
	b	43.0	43.0	43.0
	c	35.2	25.0	30.1
	d	27.8	32.8	30.3
	e	18.6	24.6	21.6
曲 2 ブレス合図無し	a	62.8	80.6	71.7
	b	39.8	69.4	54.6
	c	66	69.0	67.5
	d	92.4	63.4	77.9
	e	21	110.4	65.7

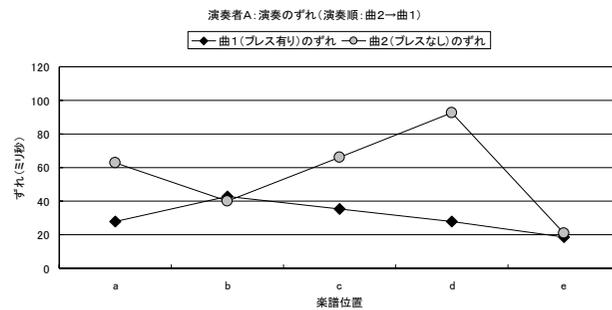


図 5 演奏のずれ (演奏者 A)

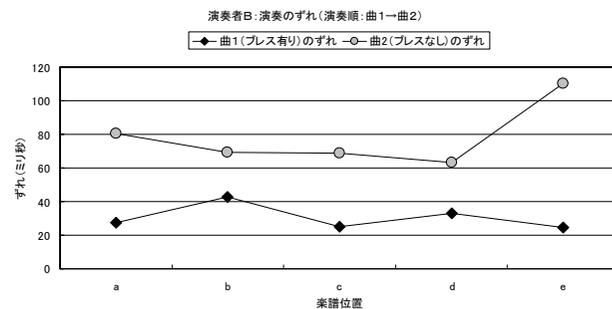


図 6 演奏のずれ (演奏者 B)

なお演奏者 A に関して、楽譜位置 b と e において曲 1 と曲 2 のずれの差がほとんどない。楽譜位置 b と e は、間をあげたりテンポを変化させたりしない演奏表現が可能

であるため、ブレスがない場合でも一定のテンポで演奏することにより両者のずれは小さくなったのではないかと考えられる。一方、楽譜位置 a と c と d はテンポ変化やフェルマータ (音の長さを演奏者の解釈によって自由にのばす指示) などにより音楽的な間が挿入されることが多い。そのためブレスによる合図が利用できない場合にはずれが大きくなってしまったのではないかと考えられる。

収録後各演奏者に対して、「どちらの方が独奏を行いやすいか？」および「どちらの方が好ましい合奏であったか？」と質問し、曲 1 と曲 2 のどちらかを選択してもらった。結果を表 2 に示す。表より、提案手法を実装したシステムのほうが、演奏者にとって演奏が行いやすく、好ましい合奏であったことがわかった。

表 2 演奏者の主観評価

	どちらの方が演奏を行いやすいか？	どちらの方が好ましい合奏であったか？
演奏者 A	提案手法	提案手法
演奏者 B	提案手法	提案手法

4. おわりに

本研究では独奏者による伴奏システムに対するタイミング制御のためのインタフェースとして、人間の独奏者にとって日常的に使い慣れているブレスによる合図を利用することとし、先行研究で実現された曲冒頭のブレスによる合図に加え、曲中のブレスによる合図を認識し、伴奏の制御を行なえるシステムを実現した。評価実験の結果、ブレスの合図を使わないシステムに比べ、ブレスの合図を用いることにより、独奏者と伴奏システムの演奏のずれを減少することができた。また、主観評価の結果からも提案手法の有効性を示すことができた。

今後の課題としては人間が通常の演奏で用いているブレス以外の合図も利用した伴奏システム制御手法を検討したいと考えている。

参考文献

- 堀内靖雄, 西田昌史, 市川薫:ブレスによる合図を検出する伴奏システム, 情報処理学会論文誌, Vol.50, No.3, pp.1079-1089 (2009).