

和音の響きの調和性を考慮した歌声に対する伴奏システム

吉本侑平^{†1} 堀内靖雄^{†1} 黒岩眞吾^{†1}

概要: 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で実現するシステムである。従来の伴奏システムは主に楽器の独奏に対し、ピアノやオーケストラで伴奏を行うものであったが、歌声を独奏とする伴奏システムも研究が進められている。歌声を対象とする楽曲の中でも、アカペラは音楽の表現においてテンポ変化を伴うことが多いため、伴奏システムへの応用に適している。アカペラではハーモニー（和音）の美しさがとくに重要な要素となるが、従来の伴奏システムでは一般に平均律が用いられ、純正に響く美しいハーモニーの伴奏は実現できなかった。そこで本研究ではアカペラなどの合唱におけるハーモニーの美しさ（和音の響きの調和性）に着目し、ユーザの声に調和した伴奏出力が可能な伴奏システムの実現を目的とする。あらかじめ与えられた伴奏システムの楽譜を純正なハーモニーで出力できるように事前に音高を調整した上で、ユーザとの合唱時にはユーザの歌声の音高をリアルタイムで認識し、その音高と調和するようにシステムの音高をさらに調整する手法を提案した。評価実験の結果、定量的にはユーザの声に調和した伴奏を出力できたが、ユーザの主観評価からは十分な有用性が示されなかったため、問題点の分析を行い、今後の課題を検討した。

キーワード: 伴奏システム, 歌声, アカペラ, 和音

1. はじめに

伴奏システムとは独奏パートと伴奏パートの楽譜情報を事前に計算機に与えた状態で、人間の独奏者の演奏に協調した演奏を、人間の代わりに計算機が行うシステムである[1-8]。これまで、伴奏システムはフルート等の楽器の独奏に対して、ピアノやオーケストラで伴奏を行うものが多かったが、歌声の独奏を対象とする伴奏システムも検討されてきた[9-12]。[9]では歌声のピッチ検出手法等が提案され、[10]では歌唱者の音高補正や音声認識の利用などが提案されている。[11]ではユーザ歌唱のテンポ変化に追従して伴奏を出力するカラオケシステムが提案されている。[12]ではアカペラで欠員パートが出た場合を想定し、他のパートの歌唱にシステムが同調することで欠員パートを補完するシステムを実現するための楽譜追跡手法が検討されている。アカペラのような音楽ジャンルは合唱中にテンポ変化を伴うことが多いため、伴奏システムへの応用に適していると考えられる。アカペラではハーモニー（和音）の美しさがとくに重要な要素となるが、従来の伴奏システム研究ではこの点についてまだ検討されていない。和音の美しさ、すなわち、和音の響きの調和性は構成する各音の周波数比が簡単な整数比となる場合に実現されるが、一般的に用いられている平均律ではわずかに周波数が異なるため、その響きの調和性が損なわれてしまう。人間同士の合唱では互いの歌唱する音高を聴きながら、和音の響きが調和するように音高を調整することにより、美しいハーモニーが実現されている。従来の伴奏システムや歌声の研究では平均律の音源を出力に用いていることが多く、純正に響く美しいハーモニーは実現できない。そこで本研究ではアカペラなどの合唱におけるハーモニーの美しさ（和音の響きの調和性）に着目し、ユーザの声に調和した出力が可能な伴奏システムの実現を目的とする。

2. 提案システム

本研究ではアマチュアの独唱者がアカペラを歌う状況を想定し、リアルタイムで独唱者の歌声を認識し、その音高とテンポを独唱に追従して変化させながら伴奏のコーラスを出力するシステムを提案する。ただし、現時点では歌詞の伴う歌声への対応は困難であるため、すべての音を「た」で歌うこととし、歌詞付きの歌での合唱は今後の検討課題とする。すべての音を「た」で発音した場合、われわれが開発している楽器用の伴奏システム[8]でテンポ追従は可能となるため、本稿では歌声の音高に追従する手法と純正律を基本とした伴奏を出力し、和音の響きの調和性の高い合唱を実現する方法について述べる。

2.1 音階の構成

和音の響きを調和させるため、本研究では純正律を基本とした。純正律の音階は主要三和音を構成する各音の周波数比が簡単な整数比で表すことができるように作られている。表1に純正律音階（長音階）の構成を示す。

表1 純正律音階（長音階）の構成

長音階	ド	レ	ミ	ファ	ソ	ラ	シ	ド
基音との比	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

^{†1} 千葉大学
Chiba University

純正律では主要 3 和音 I, IV, V に加えて, III と VI の短三和音は純正な響きとなるが, II の短三和音は 27:32:40 となり, 純正な響きの比率 10:12:15 からずれてしまいます。そこで本研究ではアカペラのように奏者が個々に音程を調整できる状況を想定し, 純正な響きにならない三和音は個別に調整し, 純正な響きとなるようにする。長三和音と短三和音以外の和音 (属七和音など) をどのように扱うかは難しい問題であるため, 本研究では純正律のままとし, 今後, 専門家の意見や実際の合唱などから検討したいと考えている。

伴奏システムの出力を上記の純正な響きにするため, 本研究では後述する MIDI のピッチベンドを利用した。なお, 伴奏システムの出力は MIDI 音源のコーラスを用いた。

2.2 ピッチベンド

MIDI のピッチベンドとは音の高さを基準ピッチから微妙に変化させることである。MIDI 規格では音の高さは半音単位で表現されるが, 半音以内の細かい音高の調整を行う場合, ピッチベンドの MIDI メッセージを利用することで音高を制御することができる[10]。本研究の伴奏システムは伴奏の演奏出力に MIDI 音源を用いるため, MIDI のピッチベンドを音高の調整に利用する。

MIDI において, ピッチベンドのメッセージにより変化する音高はピッチベンドの値と事前に設定するピッチベンドセンシティブィティの値によって決まる。ピッチベンドセンシティブィティは基準となる音高から調整可能な範囲を表しており, 本研究では一般的な値である上下に全音分 (±200 セント) とした。ピッチベンドの変化値は-8192~+8191 の値で決定され, それに対応する音高の調整が施される。表 2 に音高レを例としたピッチベンドの値を示す。

表 2 ピッチベンド値と音高の関係

ピッチベンドの値	音高 (センシティブィティ 2)
+8191 (最大)	ミ
0 (中央)	レ
-8192 (最小)	ド

2.3 楽譜データ

提案手法では, まず始めに事前に与えられている楽譜データに音高の調整を加える。楽譜データが持つ情報として, 独奏の音高や伴奏の音高がある。独奏の音高および伴奏の音高によって構成される和音の響きを良くするため, 2.1 節に従い, 調整を加える。具体的には, 修正後の音高が平均律に比べて何 cent ずれているかに基づいてピッチベンド値を求める。MIDI メッセージとして反映するため, 入力となる SMF ファイルの独奏, 伴奏の各音符のノートオンメッセージの直前にピッチベンドメッセージを追加する。この

楽譜データを用いて伴奏システムを実行することにより, 出力として調和性の高いハーモニーを実現することができる。さらに後述のリアルタイム調整を行うことにより, ユーザーの音高の微小変化に追従して, 伴奏システムの音高を微調整する。

2.4 リアルタイム調整

アマチュアの独唱者の歌声の音高は, 楽器のように正確な音高で歌うことは困難であり, わずかに音高が変化することが多い。そこで本研究では伴奏システムと合唱する際により響きの良いハーモニーを実現するため, リアルタイムで認識した歌唱者の音高を用いて, 伴奏システムの音高を微調整する。

伴奏システムが独奏の歌唱位置推定に用いている音高の推定情報を利用して楽譜データ上の独奏の音高推移と実際の歌唱による音高推移の比較を行う。比較によって得られた音高の誤差の情報に基づいて伴奏が出力すべき音高を再計算し, 誤差を相殺するようにピッチベンドのメッセージを用いて伴奏システムの出力の音高を全体的に修正する。しかしながら, 伴奏システムのすべての音高を調整し, 歌唱の音高に追従する場合, 伴奏の音高が変化してしまうため, 歌唱の楽譜追跡に用いる歌唱者の音高情報も伴奏システムの修正分を補正して再計算しなければならない。独唱者が歌っている楽譜はそのまま音高が変化するという事は合唱における基準ピッチ (例えば A=440Hz のように示される音高) が動的に変化していることを意味している。そこで本研究では伴奏の音高を変化させた量に応じてシステムが持つ基準ピッチを再設定することで, 伴奏の出力音高と歌唱の楽譜追跡に用いる音高を連動させることによって整合性が取れたシステムを実現する。ただし, 伴奏を出力する MIDI 音源のマスターピッチをリアルタイムで変更することは現実的ではないため, MIDI 音源に対しては純正律を基本とするピッチベンド値に基準ピッチの変動分を加算してピッチベンドメッセージを送信することにより, 独唱者に追従した音高での出力を可能とする。MIDI 音源に送信するピッチベンド値が半音を超えた場合は出力データを半音移調させることにより, ベンド値が±200 セントを超えないようにした。

ここで, 歌唱の音高に追従した伴奏音高を適切に決定し出力するためには, 歌唱時における歌声の音高の推移を分析しなければならない。そこで, 実装に先立ち歌声の音高推移の分析を行った。

2.5 歌声の分析とシステムの実装

文献[14]において, 歌声の音高推移は楽曲のメロディーに依存するが, 歌唱者や歌唱のスタイルによらず, 次に挙げる 4 つの成分の存在が確認されている。

- ・オーバーシュート
音高変化時から変化直後にかけて観測され、以下の2つの成分から構成される。
ポルタメント：音高変化時の傾斜を持った滑らかな基本周波数変化
オーバーシュートエクステンション：音高変化直後に目的音の音高値を超えて振れる瞬時的な振動成分
- ・ビブラート
同一音高区間での4~7Hzの変動成分
- ・微細変動成分
上記の変動成分を除去した後に残る不規則で細かい振動成分
- ・ブレパレーション
音高が変化する直前に、変化とは逆の方向に振れる瞬時的な振動成分

これらの成分に着目し、我々の伴奏システムと合唱した際の歌声の音高推移を分析した。歌唱者は合唱団所属の学生1名（男性）、音楽サークル所属の学生1名（女性）である。

2名の歌唱者の音高推移を分析したところ、音の開始部分はオーバーシュートの成分が観測でき音高が定まっていなかった。その後パワーが安定してきたところで、音高も比較的安定してくることが観測できた。比較的安定する部分であっても微細変動の成分は常に観測される。

オーバーシュート等が観測される音の開始付近の音高の誤差はリアルタイム調整の音高調整量を決定する誤差計算には用いるべきではない。そこで、独奏者の音の開始時刻からの経過時間を計測し、設定する閾値以上経過した後、パワーが十分に大きくなり音が安定していると判断できた時刻以降をリアルタイム調整の計算に用いる歌唱区間とする。具体的にはシステムは音の開始時の170ms後から誤差を計算する。誤差は符号付きで累積させ、楽譜上の楽音の音価と現在のテンポから予測される音の持続時間を超えるまで、もしくは歌唱の対数パワーがある閾値未満になった時点で一時停止し、次の音の音高安定時から再び累積される。

また全体に観測された微細変動は実際の歌唱によって得られる音高推移と楽譜上の音高推移を比較し、誤差の符号付き平均を求めることで影響が抑制されると考えられる。累積された誤差を最大500ms分保持し、その符号付き平均を計算する。ここで累積する誤差は上下に半音以内の高さの範囲に収まる誤差のみを用いる。これは、歌唱の音高誤り（認識誤りも含む）に対してシステムが過敏に反

応することを避けるためである。比較した誤差を基に伴奏出力の各音にピッチベンドを適用するタイミングは伴奏システムの音の発音時のみとする。これは一音の中で音高を変化させると独唱者にとって違和感が生じると考えたためである。過去の累積誤差平均から、歌唱音高が伴奏に対してずれており、和音の響きが調和していないと判断された場合にそのずれの大きさを小さくする方向に調整することとする。本研究では累積誤差の平均が10centを超えた場合に5centの調整を行う仕様とし、調整後は誤差履歴をリセットし、再び誤差の累積を開始する。

3. 実験

3.1 実験環境

提案システムは Intel® Core™ i7-4500U CPU @ 1.80GHz 2.40GHz(8.00GB RAM)、Microsoft Windows 7 Professional 2009(SP1)が動作するコンピュータ上で Microsoft Visual C++.net 2013 を用いて実装した。

コンピュータ以外にMIDI音源としてRoland INTEGRA-7、独奏の音響情報を取得するマイク用のオーディオインターフェースとしてRoland Quad-Capture (UA-55)を用いた。

3.2 使用楽曲・歌唱方法

実験に使用する楽曲はJ-POPの楽曲をアカペラ用に編曲したもの（「空も飛べるはず」）を使用し、伴奏システムに必要なピッチベンド情報等を書き加えた。また、歌唱の際に歌詞の子音と母音によって音の開始タイミングが誤認識されることを防ぐため、歌詞をすべて「た」に置き換えて歌唱することとし、歌詞付きの歌での歌唱は今後の検討課題とする。

3.3 動作検証

提案システムによる伴奏出力の音高のリアルタイム調整、および、それに伴い変化する歌唱音高からの楽譜位置推定が正しく動作していることを確認するため、歌唱者が意図的に徐々に音高を変化させて歌唱する動作検証を行った。

音高が1小節経過毎に10centずつ変化する演奏データを事前に作成する。歌唱者はこのデータをガイドとして聴きながら、ガイドの音高を模倣した歌唱を行い、伴奏システムが出力するログを解析することで結果を確認した。

システムは徐々に音高の調整を行い、歌唱の音高変化に追従して伴奏の音高出力を決定していることが確認できた。

3.4 主観評価

提案システムを使用して歌唱した際の主観評価実験を行った。楽譜調整に加えてリアルタイム調整を行ったシステムをX、楽譜調整のみを行ったシステムをYとする。実験参加者は4回システムと合唱を行い（システムXとシ

システム Y をそれぞれ 2 回ずつ、主観評価として各歌唱後に以下の 5 段階評価の質問に回答した。この際、実験参加者には X, Y の 2 種類のシステムであることは伝えていない。

質問①：自分の歌声と伴奏システムのハーモニーはどうだったか

(5 とても良い 4 良い 3 どちらともいえない 2 悪い 1 とても悪い)

また、4 回の歌唱後にシステム X と Y についての説明を与え、以下の質問を行う。

質問②：伴奏のリアルタイム音高調整に気が付いたか (気が付いた場合は X, Y どちらが好みかも合わせて回答)

最後に実験参加者全員から自由コメントをいただいた。表 3 に実験参加者の情報を示す。4 回の歌唱は X→Y→X→Y と Y→X→Y→X のどちらかで行い、前者をセット 1、後者をセット 2 とする。

表 3 実験参加者の情報

実験参加者	性別	所属	セット
A	女性	合唱団	2
B	男性	合唱団	2
C	男性	合唱団	1
D	女性	合唱団	2
E	男性	合唱団	2
F	女性	-	1
G	男性	-	1

3.4.1 結果

各歌唱後に行った質問①の 5 段階評価の結果を表 4 に示す。また、システム X とシステム Y の歌唱者毎 (各 2 回) の評価の平均値を表 5 に示す。

表 4 主観評価結果

実験参加者	X1 回目	X2 回目	Y1 回目	Y2 回目
A	4	4	4	5
B	2	2	4	3
C	4	4	5	5
D	4	5	4	3
E	2	4	4	4
F	3	2	5	4
G	3	4	4	4

表 5 主観評価結果 (平均値)

	システム X	システム Y
評価点	3.4	4.1

4 回の歌唱後、質問②で伴奏のリアルタイム音高調整に気が付いた実験参加者は B, D, F の 3 名であった。伴奏のリアルタイム音高調整に気が付かなかった実験参加者は A, C, E, G の 4 名であった。伴奏のリアルタイム音高調整に気が付いた実験参加者のグループを α 、伴奏のリアルタイム音高調整に気が付かなかった実験参加者のグループを β とする。グループ α とグループ β に分けた際の質問①の 5 段階評価の結果として、システム X とシステム Y の歌唱者毎 (各 2 回) の評価の平均値を表 6 および表 7 に示す。

表 6 グループ α の主観評価結果 (平均値)

	システム X	システム Y
評価点	3.0	3.8

表 7 グループ β の主観評価結果 (平均値)

	システム X	システム Y
評価点	3.6	4.4

また各合唱における楽音単位での音高調整量の頻度をグループ別に表 8, 9 に示す。

表 8 グループ α の音高調整量の頻度

[cent]	B		D		F	
	X1	X2	X1	X2	X1	X2
40	1					
35						
30						
25		1	1			
20				1		
15		1	1	1		
10				1		
5	5	3	4	5	4	3
-5	10	12	12	2	16	8
-10	3	3	4	4	1	2
-15	1	1	1	2	2	2
-20	1	1		1		

表9 グループβの音高調整量の頻度

	A		C		E		G	
[cent]	X1	X2	X1	X2	X1	X2	X1	X2
25		1					1	
20	1	1		1			1	
15		1	2		1	1		2
10	3			1	1	2	2	3
5	5	5	7	9	3	1	7	6
-5	8	6	5	8	10	12	9	6
-10	1	5	1	2		1	2	3
-15	3	2			2		1	2
-20								

3.4.2 考察

質問①の評価点の結果から伴奏のリアルタイム音高調整は歌唱者にとって、自分の歌声と伴奏システムのハーモニーが調和していたと感じさせることはできなかったと考えられる。

まずグループαの音高調整に気づいた3名について考察する。3名のうちB, Fの実験参加者は音高変化に気づいた上で、その仕様を好まないと回答した。実験参加者Bが音高の変化に気づいた部分は楽譜の前半部分の最後の長い音から間奏にかけての部分であるが、ログを分析してみると、該当箇所では他の実験参加者と比較して大きな音高調整が行われていた。今回のシステムの仕様では音高の調整タイミングは発音時のみとしているため、一度鳴り始めた音は長い音符であっても音高が再調整されることはない。すなわち、この長い音符の間に調整すべき誤差が累積されて大きくなってしまふと次の音の開始時点で累積された誤差を一度に解消しようと大きく音高を調整してしまうため、その大きな音高変化が不自然な印象を与えてしまったのではないかと考えられる。図1に実験参加者Bの音高調整量の推移を示す。該当箇所では急激な調整量の変化があり(-60cent → -20centへの変化)、システムの音高変化に対して悪い印象を与え、評価が悪くなったのではないかと考えられる。実験後のコメントでも大きく評価点を下げた理由は上記の箇所では音高の変化を強く感じたことに起因するというものであった。そこで、今後は一度に行われる調整量を減らす、もしくは連続的に大きく調整が行われることを抑制しながら調整する手法を検討したい。また、比較的長い音は途中で歌唱者に気付かれない程度のおわずかな音高調整を行うことにより、歌唱者の音高に自然に追従し、調和していく可能性が考えられる。後半の歌唱部分ではそういった伴奏の音高変化の違和感はなかったというコメントもあり、長く歌っていくほどシステムの音高が徐々に歌唱者の理想とする音高に近付いていると考えられる。

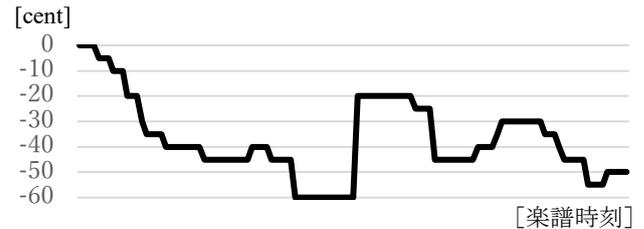


図1 実験参加者Bの音高調整量の推移

実験参加者Fについても冒頭付近の長い音符で誤差が累積し、比較的大きな音高調整が発生していることから、実験参加者Bと同様の理由によるものと考えられる。

一方、伴奏の音高変化に気付いたもう一人の実験参加者Dは、その仕様を好むと回答しており、評価結果も提案手法の方が高かった。後半になるにつれて歌唱しやすくなっているように感じたというコメントをもらい、伴奏が歌唱音高に追従して徐々に調和していたと考えられる。ログを確認したところコメントの通り、前半部分から徐々に音高の調整が行われ、後半は調整が緩やかになっていたため、歌唱者の理想の音高に調整されたことにより伴奏と調和したと考えられる。

次にグループβの音高調整に気づかなかった4名について考察する。C, Gの実験参加者は音高の変化には全く気付かなかったとコメントした。ログでは音高の調整が行われていることは確認できたが調整量が小さく実験参加者にシステムの差異を感じさせるには至らなかったと考えられる。これは後述する定量評価と関連しており、音高の誤差が他の実験参加者に比べて小さい実験参加者であったため、伴奏のリアルタイム音高調整が主観評価に大きい影響を与えなかったと考えられる。しかし、Gの評価点はシステムXとシステムYではほぼ同程度であったが、Cの実験参加者はシステムXに評価点4、システムYに評価点5をつけており、評価に差があった。全体的に良く感じたというコメントをもらったが、この差を生んだ原因はログからも明確に判断できないため、今後の実験では各回で評価点だけでなく、細かいコメントをもらい、ログと照らし合わせながら分析することが必要であると言える。Aの実験参加者は実験後システムの仕様を伝えた際に歌いやすくなった気がしたがリアルタイム音高変化の仕様に起因するものか判断できないというコメントであり、両システムの評価点はほぼ同程度であった。Eの実験参加者は2回目の歌唱(システムXの初回)でのみ低い評価点をつけていた。低く感じたというコメントからログを分析したところ最終部分の長い音符の際に誤差が累積され、比較的大きな調整が行われていた。システムの音高調整には気付かなかったが、音高がわずかに低くなったことが低い評価結果につながったと考えられる。

3.5 定量評価

主観評価実験を行った際に伴奏システムより得られたログデータを使って定量評価を行った。評価指標として歌唱者の音高推移と楽譜上の正解音高との誤差の RMS (二乗平均平方根) を算出した。伴奏システムのリアルタイム音高調整を加えることで RMS の値が小さくなっていけば、歌唱者の音高推移にシステムが追従しており、ハーモニーが調和するように音高が修正されたと考えられる。

3.5.1 結果

実験参加者毎に歌唱の音高推移と楽譜上の正解音高との誤差の RMS を算出した。システム X とシステム Y の各 2 回の平均の結果を表 10 に示す。ここで使用した歌唱の音高推移と楽譜上の正解音高の誤差の算出範囲は 2.5 節に従う。

表 10 歌唱の音高推移と正解音高の誤差の RMS

実験参加者	システム X	システム Y
A	0.26	0.44
B	0.24	0.34
C	0.24	0.27
D	0.25	0.43
E	0.22	0.24
F	0.21	0.30
G	0.26	0.29

システム Y に対してシステム X は全ての実験参加者の RMS 値が小さくなる結果となった。これは歌唱者の音高の推移とシステムが正解とする音高の誤差が小さくなっていることを意味しており、歌唱者の音高と伴奏の音高が調和した響きに近づいていると言える。ユーザの声に調和した伴奏をリアルタイムで出力するという本研究の目的は、以上の点のみを踏まえれば達成されていると考えられるが、主観評価の結果を考慮すると課題が残る。システムの音高調整は結果としてユーザの希望する音高に調和していくと考えられるが、音高調整量や頻度が歌唱者にとって気付かれない、あるいは、自然な音高変化でなければならない。そのため、システムのパラメータや仕様を改善する必要がある。

4. まとめと今後の課題

本研究ではアカペラにおけるハーモニーの美しさ (音の響きの調和性) に着目して、伴奏システムに事前に与える楽譜情報に和音の響きが調和するような調整を加え、さらにリアルタイムで独唱者の歌声を認識し、その音高とテンポを独唱に追従して変化させながらユーザの声に調和した伴奏のコーラスを出力するシステムを提案した。評価実験

の結果、定量的にはユーザの声に調和した伴奏が出力できていることを示すことができたが、ユーザの主観評価では十分な結果を得ることができなかった。

今後の課題として、まず伴奏システムに事前に与える楽譜情報の音高調整について、長三和音と短三和音以外の和音 (属七和音など) は周波数比では調和しづらいため (不安定さや不協和が音楽的な意味をもっている)、これらの和音における各音の音高をどのように決定するかは、専門家の意見や実際の合唱などから検討したい。また、リアルタイムで行う伴奏の音高調整は、歌唱者にとって必ずしも受け入れられていないので、実験参加者や歌唱回数を増やした実験と評価を繰り返し、その仕様やパラメータを改善していきたい。

謝辞 本研究は科研費 17H00749 の支援を受けています。

参考文献

- [1] Dannenberg, R.: An On-Line Algorithm for Real-Time Accompaniment, *Proc. of ICMC*, pp. 193-198 (1984).
- [2] Vercoe, B.: The Synthetic Performer in the Context of Live Performance, *Proc. of ICMC*, pp. 199-200 (1984).
- [3] Horiuchi, Y., Hozumi, T.: A Computer Accompaniment System With Independence, *Proc. of ICMC*, pp.418-420 (1993).
- [4] 中村栄太, 武田晴登, 山本龍一, 齋藤康之, 酒向慎司, 嵯峨山茂樹: 任意箇所への弾き直し・弾き飛ばしを含む演奏に追従可能な楽譜追跡と自動伴奏, *情処学論*, Vol. 54, No. 4, pp. 1338-1349 (2013).
- [5] Raphael, C.: Music Plus One and Machine Learning, *Proc. of ICML*, pp. 21-28 (2010).
- [6] Cont, A.: ANTESCOFO: Anticipatory Synchronization and Control of Interactive Parameters in Computer Music, *Proc. of ICMC* (2008).
- [7] 前澤陽: 自動合奏のためのタイミング結合モデル, *情報処理学会音楽情報科学研究会*, 2016-MUS-112, pp. 1-8 (2016).
- [8] 和田静花, 堀内靖雄, 黒岩真吾: 伴奏システムのための演奏時刻予測モデル, *情報処理学会研究報告[音楽情報科学]*, 2015-MUS-106(9), pp. 1-6 (2015).
- [9] Katayose, H., Kanamori, T., Kamei, K., Nagashima, Y., Sato, K., Inokuchi, S., Simura, S.: Virtual Performer, *Proc. of ICMC*, pp.138-145 (1993).
- [10] 井上渉, 橋本周司, 大照完: 適応型歌声自動伴奏システム, *情報処理学会論文誌*, 37(1), pp.31-38 (1996).
- [11] 和田雄介, 坂東宜昭, 中村栄太, 糸山克寿, & 吉井和佳, “楽曲中の歌声とユーザ歌唱のリアルタイムアラインメントに基づく伴奏追従型カラオケシステム.” *研究報告音楽情報科学 (MUS) 2017-MUS-116*, 3, 1-7(2017).
- [12] 森大毅, 上田新. “アカペラ演奏支援のための歌声に対する楽譜追跡手法の検討.” *研究報告音楽情報科学 (MUS) 2015.62 (2015):1-6*.
- [13] 三浦雅展. "MIDI 規格の問題点と今後の展望 (< 小特集> MIDI 規格がもたらしたものと今後の展望). " *日本音響学会誌* 64.3 (2008): 171-176.
- [14] 齋藤毅: “歌声知覚・生成機構の解明に向けた歌声合成システム構築に関する研究,” *北陸先端科学技術大学院大学 博士論文*, 139p, (2006).