

歌声の響きの調和性を考慮した伴奏システムにおける 音高調整手法の検討

嵯峨良理^{†1} 堀内靖雄^{†1} 黒岩眞吾^{†1}

概要: 伴奏システムとは、人間の独奏者に協調した伴奏を計算機が出力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検討されてきた。我々の歌声に対する伴奏システムの先行研究では、歌声同士の合奏であるアカペラを対象とし、アカペラの重要な要素である和音の調和を実現するため、純正な響きとなる伴奏の出力や独唱の音高に合わせて伴奏の音高をリアルタイムで調整する手法を提案している。しかし、先行研究では音高のリアルタイム調整により独唱の音高に調和した伴奏が出力できていないにもかかわらず、ユーザの主観評価値が低いという問題があった。そこで本研究ではユーザの主観評価値を下げる原因として長い音符における和音の不調和や短い音符における音高誤りへの過度な追従に着目した。それらの改善方法を提案、実装し、先行研究のシステムとの比較実験を行うことで提案手法の有効性が示された。

キーワード: 伴奏システム, 歌声, アカペラ, 和音

1. はじめに

1.1 伴奏システムとは

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伴奏を人間の代わりに計算機が行うシステムである。これまで、伴奏システムは、フルートなどの楽器の演奏を独奏とし、ピアノやオーケストラの伴奏を出力するものが多かったが、歌声を独奏とする伴奏システムも検討されてきた[1-5]。[1]では歌声のピッチ検出手法等が検討され、[2]では歌唱者の音高補正や音声認識を利用した歌詞に基づく独唱追跡手法が検討されている。[3]ではアカペラで欠員パートが出た際に、複数人の歌声を入力として欠員パートの歌声を出力するシステムが検討されており、[4]では歌唱者のテンポに追従した伴奏を出力するカラオケシステムが提案されている。[5]では人が歌唱をする際に、一般的に母音を音符のタイミングに合わせることに注目し、母音の開始時刻をリアルタイムで検出する手法を提案している。

1.2 歌声の響きの調和性を考慮した伴奏システム

我々の先行研究[6]では、アカペラにおける声の響きの調和に着目し、伴奏の音高をリアルタイムで調整することで、歌唱の音高と伴奏の音高の誤差(以下、単に“音高の誤差”と呼ぶこととする。)を軽減し、歌唱と調和した和音を出力できる伴奏システムを実現した。しかしながら、主観評価実験の結果、先行研究のシステムは伴奏の音高を調整しないシステムよりも評価値が低かった。そこで本研究では先行研究[6]における評価実験の合奏データの分析から主観評価値が低かった原因を考察し、改善手法を提案することにより、先行研究のシステムよりも歌唱者が和音の調和を感じながら合奏を行うことができるシステムを実現することを目的とする。

2. 先行研究の分析

2.1 先行研究のシステム

我々の伴奏システムでは、伴奏出力として MIDI (Musical Instrument Digital Interface) 音源を用いている。先行研究のシステムでは、MIDI のピッチベンドを用いて音高調整を行っている。MIDI のピッチベンドはピッチベンドメッセージを用いて音高を細かく制御することができる。先行研究では、以下の2種類の音高調整を、ピッチベンドを用いることで実現している。

2.1.1 楽譜情報の調整

従来の伴奏システムでは音律として平均律が用いられているが、先行研究のシステムでは、和音がより調和する音律である純正律を基本として音高を調節している。ただし、純正律では一部の和音が純正な響きにならないため、先行研究ではアカペラのように伴奏も状況に応じて柔軟に音程を調整できる状況を想定し、純正な響きではない和音は純正な響きになるように個別に調整を行っている[6]。

実装では入力とする楽譜データのノートオンメッセージの前にピッチベンドメッセージを挿入し、それぞれの音符を鳴らす前に平均律と純正な響きの音との音高の差を補正する。この操作を全てのチャンネルに対して行うことにより、それぞれの音が鳴り出す前に音高が調整され、純正な響きを持つ伴奏の出力が実現された。

2.1.2 伴奏の音高のリアルタイム調整

楽譜の調整に加えて、独唱の音高と調和する和音を伴奏として出力するために、リアルタイムで伴奏の音高を調整する。

音高の誤差を最大 500ms 分保持し、その符号付き平均の値を基に伴奏の音高調整量を計算する。具体的には、求め

^{†1} 千葉大学
Chiba University

た符号付き平均の値が 10cent を超えると音高調整量の内部パラメータを 5cent 増減する操作を繰り返す。ここで cent とは音程を測定する単位であり、半音の音程が 100cent、1 オクターブの音程が 1200cent に相当する。なお、ここで計算された音高調整量の内部パラメータはすぐに音高調整量として出力に適用されず、楽譜データ中のピッチベンドメッセージが挿入されているタイミング（伴奏の音の発音タイミング）で、先述の楽譜の調整に加算する形で音高調整が行われ、出力に反映される。これは一音の中で音高を変化させると歌唱者にとって違和感が生じると予想されたためである。

2.2 先行研究の問題点

先行研究において評価実験に用いたデータから、先行研究の問題点を分析した。使用したデータは、歌唱者の主観評価データ、実験の際の合奏の録音データ、および合奏の際の伴奏システムの挙動を示すシステムのログデータである。このうち、主観評価データの詳細について以下に記す。

用いた主観評価データは、先行研究における主観評価実験の結果のデータである。主観評価実験では、先行研究の手法でリアルタイムに音高変化を行うシステムをシステム X、音高変化を行わないシステムをシステム Y とし、各歌唱者は 2 種類のシステムとそれぞれ 2 回ずつ、計 4 回歌唱を行った。歌唱曲は J-POP の楽曲「空も飛べるはず」をアカペラ用に編曲したものをを用いた。なお、歌詞により音の開始タイミングが誤認識されることを防ぐため、歌詞はすべて「た」に置き換えた。

主観評価実験では、歌唱者はシステムが 2 種類あることを知らされていない状態で歌唱し、以下の質問①に回答した。

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)

さらに、4 回の歌唱後にシステム X と Y について、その違いの説明を受け、以下の質問に回答した。

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）

表 1 に、実験参加者と質問①に対するそれぞれの回答結果を示す。実験参加者のうち、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 名であり、3 名のうち B、F はシステム Y（音高調整なし）を、D はシステム X（音高調整あり）を好みと回答している。これらの結果も考慮したうえでデータの分析を行った。

表 1 先行研究の主観評価実験結果

実験参加者	性別	所属	X	Y
A	女	合唱団	4.5	4.5
B	男	合唱団	2.0	3.5
C	男	合唱団	4.0	5.0
D	女	合唱団	4.5	3.5
E	男	合唱団	3.0	4.0
F	女	-	2.5	4.5
G	男	-	3.5	4.0
平均			3.4	4.1

2.2.1 音符の後の大きな音高変化による不和

先行研究では、提案手法の主観評価が下がった理由として男性歌唱者 B とシステムの合奏例を挙げ、システムが正しく動作したにもかかわらず、楽譜の前半部分から間奏にかけての部分で 40cent もの大きな音高変化が起こり、歌唱者に不自然な印象を与えてしまったのではないかと考察している[6]。本研究では、この合奏についてさらに詳細な分析を行った。この合奏における、楽譜上の音高と歌唱者ならびに伴奏システムの音高との差を図 1 に示す。ここで楽譜上の音高とは音高調整を行っていない状態の音高を指し、歌唱者の音高が楽譜上の音高からずれるのに追従して、システムは出力する音高を変化させる。

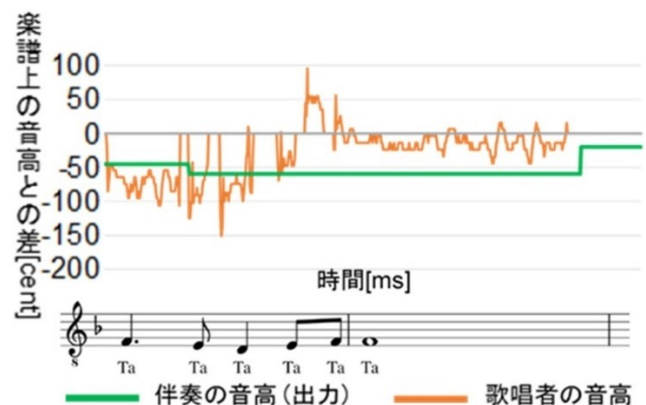


図 1 男性歌唱者 B の歌唱例

図から、先行研究の考察の通り、6 音目で歌唱者の音高が伴奏よりも約 40cent 高い状態で歌唱されていたため、その直後にシステムが出力する音高が急激に高くなってしまっていることが確認できる。このような伴奏の大きな音高調整が歌唱者に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が、その原因は伴奏が長い音符を演奏している際、伴奏の音符のタイミングにしか音高調整を行えないために、歌唱者との音高のずれが大きい状態のまま長時間続いてしまった後、次の音の開始時点において、その間に累積された誤差を補正するため、大きな音高変化が生じ

てしまったと考えられる。

また、長い音符の直後以外にも、1つの音符における独唱の音高と伴奏システムの音高とのずれが大きい場合に、伴奏の音高変化量が大きくなってしまふ現象もいくつか見られた。最も顕著な例として、女声歌唱者Dと先行研究のシステムの合奏における、歌唱者と伴奏の音高と楽譜上の音高との差を図2に示す。女性歌唱者は提案システムに対する主観評価が低かった歌唱者には該当しないが、主観評価が低くなる可能性があった一例としてここに示す。図2から、7音目の歌唱者の音高と楽譜上の独奏の音高の誤差が大きいため、その直後に25centの急激な音高変化が起きていることがわかる。

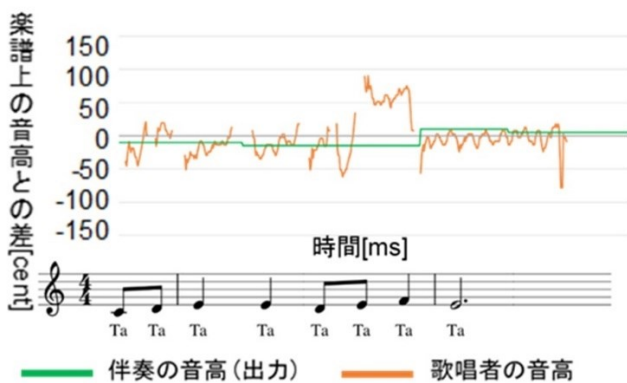


図2 女性歌唱者Dの歌唱例

[7]では、連続する刺激音の間に音高変化があった場合、単音であれば15~20cent程度で音高の違いを判別できるとしている。以上から、図1や図2のように伴奏の音高が急に変化することは歌唱者に違和感を与える可能性が高いと考えられる。これらの例より、一度の音高調整量を小さくすれば、歌唱者が気付かずに音高調整を行うことができ、結果として違和感を与えない可能性が考えられる。

2.2.2 長い音符における不調和

2.2.1で示した図1の例では、既に述べたように、6音目において独唱の音高と伴奏の音高に大きな差が見られることがわかる。この6音目の音符は時間長が長い全音符であり、この例では歌唱者の6音目の開始をシステムが認識してから、その音の歌唱の終了をシステムが認識するまで、時間長にしておよそ2.5秒に及んでいた。

ログデータと録音から、該当する部分で歌唱者と伴奏の調和は長時間にわたり実現していなかったと考えられる。音符長が長い音は短い音に対して音高が安定している時間が長いことから、歌唱者が自身の音高と伴奏の音高を聴取しやすい。このように、長時間にわたり調和性が乱れることは主観評価の低下につながると考えられる。そこで、長い音符に対して歌唱者に調和を感じさせることができれば、歌唱者のシステムに対する評価は向上すると考えられる。

3. 提案手法

3.1 リアルタイム調整の仕様変更

先行研究では、楽譜ファイルに対し、2.1で述べた通り、ピッチベンドメッセージを各音符のノートオンメッセージの直前にのみ追加している。これは一音の中で音高を変化させると歌唱者にとって違和感が生じると予想されたためである。しかしながら、一音の中で音高を変化させられないことは、2.2.1で述べたように、一音の中で音高の誤差が大きくなったときに、音符の直後に大きな音高調整が起これてしまい、歌唱者に違和感を与えてしまう原因となっていたと考えられる。また、2.2.2で述べたように、歌唱者がそれまでの音高調整量と異なる音高で歌唱した場合や、一音の中で音高が変化した場合に、音高の誤差が大きくなり和音の調和が損なわれる原因となっていた。

そこで本研究では、一音の中で音高を変化可能な手法を提案する。具体的には、楽譜データに対し、発音タイミングの間隔よりも短い時間間隔でピッチベンドメッセージを挿入し、そのタイミングで音高調整することとした。今回実装したシステムでは8分音符の時間長ごとにピッチベンドメッセージを追加した。ピッチベンドメッセージの挿入のイメージを図3に示す。それぞれ、図の下段のタイミングで音高調整を行う。この操作を行うことで、先行研究では音符ごとに挿入されていたピッチベンドメッセージの頻度が増え、音高変化を従来手法のものよりも短い間隔で行えるようになった。



図3 ピッチベンドメッセージ挿入イメージ

3.2 音符長に着目した音高誤りへの反応調整

3.1で述べたリアルタイム調整の仕様変更で、音符長が長い音符における不調和による問題は改善できるものと考えられた。しかし、この手法では、図2の例のように、音符長が比較的短い音符による音高誤りに対する不自然な音高の追従を防ぐことができない。歌唱中のある短い音で誤差が大きくなった場合、続く複数の音の音高の誤差に同様の傾向が見られれば音高調整を行うべきであるが、それらの傾向が全く異なれば、一音だけに追従した伴奏の調整は行うべきではないと考えられる。そこで、音符長が比較的

短い音符で大きな音高の誤差が生じたとき、伴奏が過剰に反応しないようにする必要がある。

先行研究の合奏データのうち、歌唱者が音高調整を行っていないシステムと合奏した際のデータを対象に、独唱の音高の誤差と、楽譜上の音符長の関係について調べた。例として、先行研究の合奏データから、男性歌唱者 E の歌唱における音符ごとの符号付誤差平均のヒストグラムを図 4 に示す。ただし、ヒストグラムは音符長ごとに色を塗り分けてある。ヒストグラムから、4 分音符以上の長さを持つ音符はある程度誤差が小さいのに対し、8 分音符以下の長さを持つ音符は誤差が幅広く分布しており、±50cent 以上の誤差はすべて 8 分音符のものであった。先行研究で実験に参加した多くの歌唱者に同様の傾向が見られたことから、歌唱者は、短い音符で音程を誤ることが多い傾向があると考えられた。原因として、短い音符は瞬時に歌唱することを求められる点、歌唱者が音高を誤っていることに気がついて修正する時間が十分でない点などが考えられる。一方、音符長がある程度長い音符になると、音中に安定部が生まれ、独唱の音高の誤差もある程度小さな範囲内で安定する傾向にあることがわかった。よって、音符長が短い音符に伴奏が追従しすぎると、予期しない音高変化につながると考えられる。

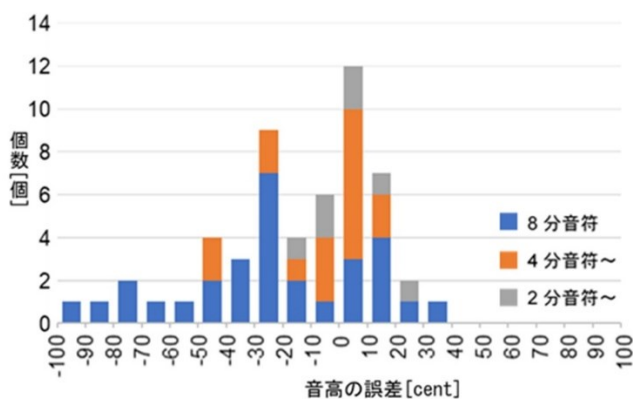


図 4 男性歌唱者 E の音符ごとの誤差傾向

そこで、音の立ち上がり部分において音高の誤差の平均の計算に用いない区間を、従来手法と比べてより長くする手法を提案する。先行研究の手法では、音の立ち上がり部分では歌唱の音高が不安定であるとして、音符の開始から 170ms 分の誤差は音高の誤差の平均の計算に用いていなかった。本研究ではこの時間を 270ms に変更した。この変更により、音符長が短い音符への伴奏の過度な追従を抑制する効果が期待される。

例えば、先行研究の演奏では、楽譜上の 8 分音符の時間長は約 345ms であった。実際の合奏では、ブレスや音の立ち上がり、次の音符の準備などの時間があるために音符の時間長はより短くなり、図 4 で示した合奏では 8 分音符は

最大 250ms に収まっていた。以上から、提案手法を用いることで、先行研究の合奏の例では 8 分音符の全ての区間を誤差計算に用いなくなり、8 分音符の音高の誤差の影響を無視できる。一方で、4 分音符以上の長さの音符については、音符中の安定した部分の誤差が累積することによって十分に音高調整ができると考えられる。

4. 実験

4.1 実験環境

提案システムは Intel® Core™ i7-4500U CPU @ 1.80GHz (8GB RAM) 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には、AKG C414 XLS コンデンサーマイク、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。

4.2 実験手順

音高のリアルタイム調整を行わないシステムを X、先行研究による音高のリアルタイム調整を行うシステムを Y、提案手法による音高のリアルタイム調整を行うシステムを Z とする。先行研究の評価実験に参加していない実験参加者 6 名が実験に参加した。各実験参加者は、楽曲 1 曲につき 3 種類のシステムとそれぞれ 2 回ずつの歌唱を行った。

実験には 2 つの楽曲を使用した。1 曲目は先行研究の評価実験と同様に J-POP の楽曲「空も飛べるはず」をアカペラ用に編曲したもの（以下、楽曲 1）を用い、加えて、2 曲目は文部省唱歌でもある童謡「故郷」を四部合唱用に編曲したもの（以下、楽曲 2）を使用した。2 曲それぞれに対して 6 回の歌唱を行うため、各歌唱者は計 12 回の合奏を行った。なお、歌唱時の歌詞は先行研究と同様に「た」に統一している。表 2 に実験参加者の情報と、各システムとの合奏順を示す。システムの評価は以下に示す定量評価実験・および実験参加者による主観評価実験で行う。

定量評価実験では、評価指標として、先行研究と同様に音高の誤差の RMSE（平方二乗平均誤差）を用いた。ただし、誤差の単位は半音の音程を 1 (1cent は 0.01) とした。システムのリアルタイム音高調整を加えることで RMSE 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、独唱の音高の誤差が小さくなるよう適切な音高変化が行われていると言える。

なお、RMSE の計算に用いる区間に関しては、システム Z と評価基準を揃えるため、システム X とシステム Y では各音符で音高調整量の計算に用いる区間のうち先頭 100ms を RMSE の計算に用いないこととした。これは、3.2 で述べた通り、システム Z で音高の誤差の平均の計算に用いない区間を 170ms から 270ms に変更しているためである。

表 2 実験参加者

実験参加者	性別	歌唱経験	所属サークル	歌唱順
A	男	6年	合唱	楽曲 1- ZYXZYX 楽曲 2- YXZYXZ
B	女	15年	アカペラ・ミュージカル	楽曲 2- ZXYZXY 楽曲 1- XYZXYZ
C	女	3年9ヶ月	合唱・アカペラ	楽曲 1- YXZYXZ 楽曲 2- XZYXZY
D	女	1年	吹奏楽	楽曲 2- YZXYZX 楽曲 1- ZXYZXY
E	男	2年8ヶ月	アカペラ	楽曲 1- XZYXZY 楽曲 2- ZYXZYX
F	女	2年9ヶ月	アカペラ	楽曲 2- XYZXYZ 楽曲 1- YZXYZX

主観評価実験では、実験参加者は各歌唱後に主観評価として先行研究と同様の以下の5段階の質問に回答した。この際、実験参加者はX, Y, Zの3種類のシステムであることは知らされていない。

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)

この際、2, 1と回答した際には、実験参加者に回答の判断基準についてコメントをいただいた。また、5, 4, 3と回答した際にも、特筆すべきことがあれば自由記述でコメントをいただいた。

また、12回の歌唱後に、システムX, システムY, システムZについての説明を与え、以下の質問を行った。

質問②：伴奏のリアルタイム音高調整に気が付いたか

実験の最後に、自由コメントをいただいた。

4.3 定量評価結果

それぞれの実験参加者の、各システムとの4回ずつの合奏におけるRMSEの平均を表3に示す。

表 3 定量評価結果 (平均誤差: 半音が1)

実験参加者	X	Y	Z
A	0.35	0.29	0.27
B	0.27	0.20	0.21
C	0.35	0.20	0.19
D	0.34	0.25	0.25
E	0.49	0.20	0.21
F	0.21	0.20	0.19
平均	0.34	0.22	0.22

4.4 主観評価結果

それぞれの実験参加者の、各システムとの4回ずつの合奏における主観評価の平均、および質問2の結果を表4に示す。

表 4 主観評価結果

実験参加者	X	Y	Z	質問②回答
A	3.75	3.00	4.50	気づいた
B	3.50	3.25	2.75	気づいた
C	2.25	2.75	3.75	気づいた
D	4.25	3.75	4.25	気づいた
E	4.00	4.25	4.00	気がつかなかった
F	4.50	4.25	4.00	気がつかなかった
平均	3.67	3.42	3.87	

4.5 考察

表3から、システムZ(提案)のRMSEはシステムX(音高調整なし)のRMSEよりも小さく、システムY(先行研究)のRMSEと比較すると同程度であることがわかった。これは、提案手法により、独唱と伴奏の誤差が先行研究と同程度になっていることを示している。よって、定量評価の観点から、提案手法は先行研究と同様、独唱と伴奏の調和を実現するために適した音高変化を行っていたと考えられる。

また、表4から、主観評価値の平均を用いて比較すると、システムY(先行研究)、システムX(音高調整なし)、システムZ(提案)の順に評価値が高くなった。この結果から、先行研究の評価実験と同様に、先行研究の評価は伴奏の音高を調整しないシステムの評価よりも低かったが、提案手法は先行研究の主観評価結果を改善し、伴奏の音高を調整しないシステムよりも評価が良くなったと言える。以上から、提案手法の有効性が示されたと言える。

次に、歌唱者ごとの主観評価値を考察する。まず、質問②に対し、音高調整に気がつかなかったと回答した歌唱者E, Fの2名については、主観評価平均値にも大きな差は見られなかった。この2名はシステムごとの差をほとんど感

じなかつたと考えられる。一方、音高調整に気が付いたと回答した歌唱者 A, B, C, D の 4 名のうち、A, C, D の 3 名について、システム Z (提案) の主観評価値が最も高く、システム Y (先行) の評価はシステム X (音高調整なし) の評価よりも低い、もしくは同程度であった。この 3 名については主観評価値の平均と同様に、提案手法が先行研究の評価の低さを改善したと言える。一方、歌唱者 B については、システム X (音高調整なし) の評価値が最も高くなり、システム Z (提案) の評価値は 3 つのシステムの中で最低値となった。

歌唱者 B が評価を下げた歌唱の例として、システム Z (提案) との合奏データの一部を図 5 に示す。歌唱者 B はこの歌唱に対し、図中の 7 音目の音符の部分の歌唱が伴奏よりも高かった、という旨のコメントを残している。なお、この例は、6 名の歌唱者とシステム Z (提案) との合奏のうち、主観評価値が唯一 3 を下回った例である。図から、2 音目、および 7 音目に歌唱者が伴奏よりも低い音高で歌唱している部分が見られ、誤差が累積した結果 7 音目において伴奏の音高が低く調整されていることがわかる。一方で、歌唱者は音符の中間部において、自身の音高が伴奏より低いことに気が付き、歌唱の音高を上げたと考えられる。このように、歌唱者とシステムがお互いに和音を調和させようとして、互いに逆向きの音高調整を行った結果、かえって違和感につながってしまったと考えられる。

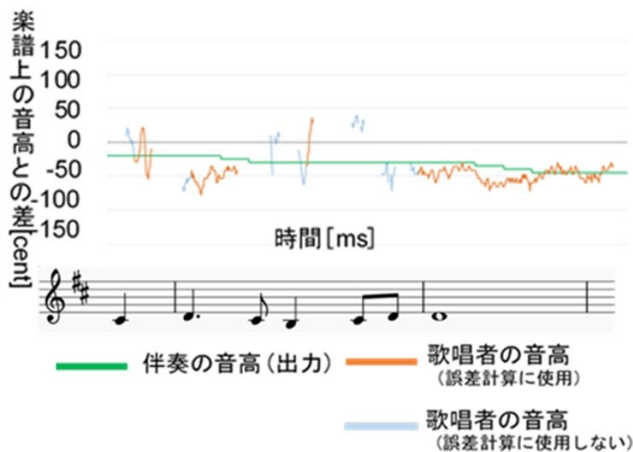


図 5 女性歌唱者 B の歌唱例

本研究、および先行研究で行った主観評価実験では、全体的に歌唱者と調和するような合奏が行われていたとしても、合奏中に一度でも歌唱者に違和感を与えてしまうと歌唱者の合奏全体への主観評価が下がってしまうと考えられる。歌唱者 B については、音高の追従は正しく行われて定量的には誤差が減少しているものの、歌唱中に違和感を与える箇所があったために、提案システム Z の主観評価値が低くなったと考えられる。

図 5 の例から、歌唱者とシステムが相互に音高を近づけ

る様子が見られた。本研究では、システムが歌唱者の音高に追従する伴奏を出力することを目指してきた。今後は、アカペラの合奏における相互作用を分析し、歌唱者の協調動作も考慮に入れたシステムを検討する必要があると考えられる。

5. まとめと今後の課題

本研究では先行研究[6]のアカペラに対する伴奏システムの主観評価を改善するため、問題点を分析し、より独唱と調和する音高調整手法を提案し、システムへの実装を行った。定量評価実験、主観評価実験を行った結果、提案手法によって主観評価が改善され、提案手法の有効性が示された。一方で、提案手法でも主観評価を改善できなかった事例も見られた。

今後の研究では、本研究の評価実験で提案手法の評価が低かった歌唱者について、さらに分析、考察を行い、より歌唱者に違和感を与えない音高調整手法やパラメータの検討を行いたい。また、本研究の評価実験で用いた楽曲は、調和の評価という観点からいずれも伴奏の一音の音符長が長く、音が変化する回数が比較的少ない楽曲を採用している。実際のアカペラの歌唱では、より音の変化の回数が多く、伴奏が複雑な楽曲が多い。より複雑な伴奏との合奏についても、同様に実験と評価を行いたい。

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] Katayose, H., Kanamori, K., Kamei, K., Nagashima, Y., Sato, K., Inokuchi, S., Simura, S.. "Virtual Performer," Proc. of ICMC, pp.138-145 (1993).
- [2] 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)
- [3] 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-MUS-107(62), pp1-6 (2015).
- [4] 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, pp.1-7 (2017)
- [5] 野口真太郎, 堀内靖雄, 黒岩眞吾, "歌声の歌唱タイミングと同期する伴奏システム," 情報処理学会研究報告音楽情報科学(MUS), 2020-MUS-126(13), pp.1-6 (2020)
- [6] 吉本侑平, 堀内靖雄, 黒岩眞吾, "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," 情報処理学会研究報告(MUS), 2019-MUS-122(23), pp1-6 (2019)
- [7] 新山王政和, "異なる提示音の間で出現するピッチ知覚の相違に関する実験的研究 —フラットシンギングとの関係に着目して—," 音楽教育学, 2008 年 38 巻 1 号, pp1-9 (2008)