

指導者知識に基づく 合唱学習支援システムの構築とその評価

香 山 瑞 恵^{†1} 中 西 将^{†2} 岡 部 真 実^{†1}
浅 沼 和 志^{†3} 伊 東 一 典^{†1}
為 末 隆 弘^{†4} 橋 本 昌 巳^{†1}

本研究の目的は、指導者知識に基づく合唱学習支援環境を探究することである。本稿では、音高と音量を評価するための指導者知識と指導語、合唱学習支援システムの構成と機能、さらに、システムの妥当性および有効性評価の結果について報告する。合唱での歌声の評価や指導は、楽譜に加えて、指導者の音楽観や演奏解釈に基づいて複合的に行われる。そこで、我々は、指導者による歌声の評価と指導のための知識として、音高のずれの適正範囲と、音量のオーバーシュートの有無、さらに歌声指導の際の指導語を具体化した。さらに、これらの知識を具備した合唱支援システムを構築した。このシステムでは、指導対象と判断された学習者の歌声に対して、合唱指導特有の指導語を用いて歌声改善のための指示を与える。本システムを利用した合唱練習により、指導語による指示が特に音高のずれの改善に効果的であることが確認された。

Development and Evaluation of the Chorus Learning Support System Based on the Tutoring Knowledge of Chorus Leader

MIZUE KAYAMA,^{†1} MASARU NAKANISHI,^{†2}
MAMI OKABE,^{†1} KAZUSHI ASANUMA,^{†3} KAZUNORI ITOH,^{†1}
TAKAHIRO TAMESUE^{†4} and MASAMI HASHIMOTO^{†1}

The purpose of this study is to explore the chorus learning support environment based on the tutoring knowledge of chorus leader. In this paper, a chorus learning support system is proposed. At first, the tutoring knowledge of a chorus leader is described. Then, the architecture and functions of the proposed system is shown. Finally, we discuss the evaluation results of the adequacy of the extracted knowledge and the effectiveness of chorus learning with our system. In the general chorus practice, a chorus leader tends to instruct his

chorus member based on the multiple aspects, not score information, but a chorus leader's sense of value and/or his musical philosophy. So, we try to extract the tutoring knowledge of evaluation/reviewing for singing voice from a chorus leader. The extracted results are three types of knowledge. These are the allowable pitch range, the definition of overshoot phenomenon of volume and some instruction words. These knowledge are expressed in computational forms and implemented in our learning support system. Thus, this support system is able to detect the singing phrases which should be paid attention, and also to give automatically appropriate instruction words for correcting the pitch and volume of the learner's singing voice. The learning effectiveness with our proposed system is confirmed by some chorus practices.

1. はじめに

合唱とは、多くの歌唱者が、いくつかのパートに分かれ、各パートの声が互いに和声をしながら、全体で曲をなすように歌うことである。さらに、教師や指揮者などの指導者が大勢の歌唱者の音楽解釈を統一し、自身の音楽観に基づき歌声を総合することで合唱が構成される¹⁾。

小中等教育段階において多くの児童生徒が合唱を経験し、成人した後にも地域や組織のクラブ活動や行事、趣味などで合唱を行う場合があるように、合唱は我々に身近なものである。合唱の専門家を目指す者もいるが、その他の多くの者にとっては、非日常的・非継続的に合唱を行う機会が存在する。本研究では、このような形で合唱に関わる人を初心者と呼び、彼らの合唱練習を支援の対象とする。

本研究の目標は、指導者知識に基づき合唱の個人練習を支援することにある。歌声評価の観点として、ここでは音高と音量とに着目する。それらを評価するための指導者知識、および評価結果に基づく指導のための指導者知識を具体化し、これらを組み込んだ支援システムにより、個々の学習者に適応的な学習かつ指導者の指導意図に基づく効果的な学習支援情報

^{†1} 信州大学
Shinshu University

^{†2} 信州大学大学院
Graduate School of Science and Technology, Shinshu University

^{†3} 長野県工科短期大学校
Nagano Prefectural Institute of Technology

^{†4} 山口大学
Yamaguchi University

の提示による自宅学習や個人練習を可能とする。

以下、2章で先行研究との関連について述べ、3章で合唱練習における指導者の役割と指導者知識について考察する。4章では指導者知識に基づく合唱学習支援システムの構成とインタフェースを示し、5章でシステム評価の結果を考察する。そして6章でまとめとする。

2. 先行研究

先行研究を歌唱の練習支援に関する側面と、スキル学習に関する側面とから示す。

2.1 歌唱の練習支援に関する研究

歌唱の練習支援の主たる方法は、理論的な事柄を中心に座学で学習する方法と、実際の歌唱行為を通して体験的に学習する方法である。前者の先行研究として、三浦ら¹⁷⁾のバス課題実施システムや荻原ら⁵⁾のマルチメディア技術を利用した音楽教育教材などがあげられる。後者の先行研究としては、音高の軌跡を可視化するHowardらの研究²⁾や平井ら⁷⁾の歌の調子外れ治療支援システムなどがある。

これらの研究成果として、目標とされる音高に対する学習者の音高のずれを提示することが、音高の再現の正確さの向上に寄与することが報告されている。また、米沢ら²⁸⁾によると発声音と同一周波数の純音を聴覚刺激として与えることにより音痴の発声周波数の誤差を軽減させることができる可能性が示されている。

近年の研究として、中野ら²²⁾は手本歌唱や自らの歌唱の音高変化を視覚フィードバックとして与えることによる歌唱方法の理解の促進と歌唱力向上のためのシステムを提案している。荻原ら⁶⁾は骨導音声を用いた歌声評価・発声訓練システムを提案している。合唱練習に特化した商用ソフトウェア¹²⁾も発表された。これらでは、楽譜に示された音高や手本歌唱の音高との差異を少なくするような歌唱支援が主眼とされる。

一方、本研究では、合唱学習に際して、指導者の音楽観や演奏解釈、すなわち指導者知識に着目し、これらの知識に基づく支援を検討する。ここでは合唱練習に特有の練習形態であるパート練習および全体練習を再現し、合唱に参加する初心者個人の練習を支援することを目的とする。

2.2 スキル学習

合唱練習は、歌いながら指導者からの指導を受け、歌唱誤りを認識し、それに対して修正を加えて再度歌うという流れを繰り返す行うことで、適切な歌唱方法を身につけていくスキル学習である。スキル学習とは身体動作をともなった学習のことである^{4),25)}。スキル上達のための支援を人間の指導者に代わってコンピュータが行う環境が整えば、学習者は個人で

スキル上達のための学習が可能となる。近年、ペン字⁸⁾、陶芸¹⁵⁾、デッサン²⁶⁾、ドローイング¹⁹⁾、サンバ演奏¹⁴⁾など、様々なスキル学習支援環境が探究されている。これらの学習では、学習者による専門家や上級者の模倣を通して、学習者のスキル向上支援を実現している。

一方、合唱練習は、指導者が理想とする歌唱に近づくことが目的となる。練習の際の指導方法や歌唱の評価方法は、指導者によって様々である^{10),18),27)}。すなわち、指導者により曲の演奏解釈に差異が生じ、その差異が指導方法や歌唱の評価に影響する。特定歌唱に対しても指導者により修正を求める箇所や声の出させ方に差が生じるのである。それゆえ、スキル学習としての合唱練習においては指導者という存在がとても重要となる。現在、指導者に着目した支援を検討したスキル学習の研究事例はない。

3. 合唱練習における指導者知識

本研究では、初心者を中心に構成された特定合唱団の練習に対する継続的観察を通して、指導者がなす歌声評価と指導方法の事例を収集した。その結果に基づき指導者知識を整理する。ここでは、合唱および合唱練習の特徴と合唱練習における指導者の役割、指導者が有する知識の分類を示す。

3.1 合唱および合唱練習の特徴

独唱が1人の学習者が特定の歌曲を構成するのに対して、合唱では複数の学習者が複数のパートに分かれ旋律を重ねながら特定の楽曲を構成していく¹⁾。合唱の練習目的は和声によるアンサンブルの確立である。独唱では単独の歌声で楽曲のすべてを表現するのに対して、合唱では他のパートを聴きながら歌う、パート内およびパート間で音量や音高のバランスを保つ、パート内およびパート間で発声や無音のタイミングを合わせるなど、合唱に特有な事柄を意識しながら歌う必要がある。練習においても同様にこれらの事柄が求められる。通常の合唱練習では指導者がこれらの事柄に対する意識を好ましい方向へと導いていく¹⁸⁾。

本研究では、自パートの音取りだけでなく他パートの存在を意識した練習形態を模擬した環境で、特定指導者が有する指導者知識に基づく学習支援環境を実現する。

3.2 合唱練習への指導者の関わり方

2.2節で述べたとおり、合唱練習は個々の指導者に依存する要素が多く、合唱団の個性や指導者の音楽観を考慮したうえで、特定の指導者によってなされるものである。そのため、合唱の評価方法として標準的な規準や指標が未確立の状況にある。合唱練習における指導者の役割は、手本となる歌声を演示するエキスパート、個人間およびパート間の歌声を統合して1つの合唱を作り上げる指揮者、合唱を鑑賞する聴衆と様々である。本研究では、指揮者

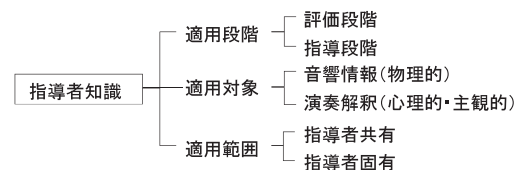


図1 指導者知識の分類

Fig. 1 Classification of the tutoring knowledge of chorus leader.

としての指導者の役割に注目し、その際の歌声評価と指導に関する知識の具体化を図る。

合唱の練習形態には、個人練習、パート練習、全体練習があり、いずれの形態でも指導者と対面する形式で練習が進められる。練習中には指導者から歌唱途中と歌唱後との指導が与えられる。歌唱途中の指導では、指導者が望む歌声を構成するための指示が随時与えられる。歌い出し時の歌詞発声の明瞭さや音高変化の滑らかさなど、特定音やフレーズ単位での指示が多い。この指示は当該歌唱に先立ち、歌唱の切れ間など短時間で与えられる。一方、歌唱後の指導では、次の歌唱で特に意識すべき修正点が説明される。このときは数多くの指導を与えず、2, 3の重要な修正点を指示するのみである。この指示には、指導者特有の指導語が用いられる。指導語には学習者が自らの歌唱を修正するための方法の示唆が含まれる。すなわち、歌唱途中での指導では注意を要する歌唱箇所であることの意識付け、歌唱後の指導では主要な修正箇所と修正方法の提示、さらに次回歌唱時の歌唱途中の指導により主要修正箇所に対する再度の確認といったプロセスを経て合唱指導はなされている。本研究ではこの指導プロセスを模擬し、学習者の歌唱に対する即時指導と事後指導、そして事後指導の結果を考慮した次の即時指導の機能の実現をねらう。

3.3 指導者知識の分類

合唱においては、合唱団の個性や指導者の音楽観、そして演奏解釈を考慮した指導が重要となる。本研究では、これらに関する知識を指導者知識と称する。

(1) 分類

指導者知識の分類を図1に示す。指導者知識を適用段階、適用対象、適用範囲で分類した。適用段階は、合唱練習のフェーズに相当し、評価と指導の2種に分類できる。適用対象は、歌声の情報に相当し、物理量としての音響情報と、心理量としての演奏解釈とに分類できる。適用範囲は、指導者が有している知識が適応される範囲を表す。音楽観や経験により異なる指導者知識には、当該指導者特有のもの(指導者固有)と、多くの指導者に共通するもの(指導者共有)とがある。

(2) 抽出対象

本研究で抽出を試みる指導者知識を以下に示す。

適用段階：評価段階と指導段階

適用対象：音響情報

適用範囲：指導者共通と指導者固有

特に、適用範囲に関しては指導者共通と指導者固有の知識を区別せずに抽出を行うこととする。

指導者知識の抽出対象者は、特定の指導者1名(合唱指導歴29年。以下、対象指導者と称する)とする。指導者知識の抽出対象曲は、対象指導者が初心者向け混声三部用に編曲した合唱曲「夜の歌」²⁷⁾、^{*1}とした。

3.4 指導にかかわる指導者知識

対象指導者に対して、歌声評価および指導の際に着目する歌声の要素(以下、評価観点と称する)を調査した結果、大きさ(音量)、高さ(音高)、音色、長さ(音価)、リズムの5つが指摘された²²⁾。各評価観点への重み付けは指導者によって異なる。これらの重みの違いから指導の優先順位の同定を試みる。ここでは指導者からの聴取と実際の歌声に対する主観評価実験の2つの側面から検討する。

(1) 聴取調査

対象指導者に対して、評価観点の指導優先順位を聴取したところ、1. 音高、2. 音量、3. 音価、4. 音色、5. リズムという順位となった。この順位決定の理由を求めたところ、「上位とした音高や音量、音価は歌唱者の歌唱技術による観点である。今回の指導対象である初心者の場合には、歌唱技術がまだ発達不十分であることから、まず歌唱者に起因する部分から指導を行う。一方、下位に位置づけられた音色やリズムに関しては指導者に起因する観点である。これらの観点は、歌唱者の技術がある程度習熟した段階で指導していくものであるため、学習初期段階での優先順位は低くなる」という回答を得た。

(2) 主観評価実験

対象曲中の2フレーズ分^{*2}の歌唱を対象指導者に聴取させた。歌唱データの歌唱者は合唱経験の異なる20～50代の男女17名とした。17名のうち5名は対象指導者による合唱指導を受けた経験がある者であり、残りの12名は対象指導者からの指導を受けた経験がない初

*1 作詞：阪田寛夫、作曲：佐々木伸尚。

*2 1フレーズは楽譜上で2小節分とする。

心者である。いずれの歌唱者に対しても、歌唱者が自らの歌唱に問題ないと判断するまで対象曲の各自パートのサンプル音声（対象指導者が用意）を聴かせたうえで歌唱させた。

実験条件としての実験環境は次のとおりである。評価フレーズの聴取は無響室において、ノートパソコン（DELL LATITUDE D400）、サウンドボード（EDIROL UA-101）、ヘッドホン（Victor HP-DX1）を用いた。また、評価音特性としては、聴取音量を対象指導者自身に聞きやすい音量に設定させ一定とした。評価フレーズは 44.1 kHz、16 bit でサンプリングされたモノラル音声信号である。その歌声評価の点数（7 段階）と、5 つの評価観点の指導優先順位とを回答させた。評価得点の割合と評価順位との関係の近似直線の傾きより、音高・音色・音量の優先順位が高く、リズムや音価は順位が低いことが示された²¹⁾。これは (1) に示した対象指導者への聴取調査の結果と合致していた。

(3) 考察

聴取調査および主観評価実験で得られた指導優先順位は音色を除いてほぼ合致していた。音色を除く 4 つの評価観点における対象指導者の指導優先順位は、音高、音量、音価、リズムの順である。2 種の結果が合致していたため、学習支援曲の変更に際しては各評価観点の優先順位は指導者からの聴取結果を反映できることが示唆された。

また、一般に、楽譜に示される情報は、曲やフレーズのリズム、ブレス位置、音高、音量、音価、歌詞などがある。本研究では、楽譜に示される情報の中から物理量との対応が可能な音高、音量、音価、リズムに着目し、楽譜基礎情報として組み込む。歌声から得られる特徴量として、音高（基本周波数）、音量、スペクトル構造、シンガーズホルマント¹¹⁾ などがあげられる。さらに、これらの時間変化から、音価、リズム、ヴィブラートなども得ることができる。これらの特徴量のうち、音高、音量、音価、リズムは楽譜基礎情報との対応が可能である。しかし、スペクトル構造やシンガーズホルマントなどは物理量との対応は可能であるが、その可否や良不良の評価が客観的に定まるものではない。

以上より、本研究では指導優先順位が高く、楽譜と歌声の両側面から得られる音響特徴量である音高と音量を指標に用いることとする。

3.5 評価に関する指導者知識

指導者知識のうち音高と音量に対する評価方法に関する知識の抽出を試みる。

(1) 音高

一般に指導者は音高の評価を行う際に、指導者の基準に対してある程度の許容範囲を認めて、その範囲内にあるものを適正とし、範囲から外れたものを指導対象としていと考えられる。そこで、指導者による特定の音に対する音高の評価実験から、適正範囲の具体化を試みる。

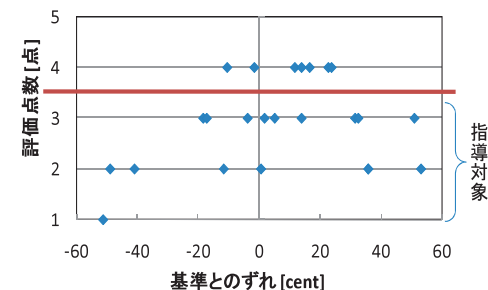


図 2 評価音 D#2 (155.7 [Hz]) に対する音高評価結果

Fig. 2 Relation between the relative pitch and the evaluated score: D#2 (155.7 [Hz]).

対象曲中の 2 フレーズ分の歌唱を対象指導者に聴取させた。実験環境と評価音特性は 3.4 節と同様である。歌唱データの歌唱者は男性 11 名とした。各フレーズ最後の 1 音の音高について 5 段階評価させた。

実験結果を図 2 に示す。横軸が理論上の基準との相対音高、縦軸は評価点数である。指導の必要がないと判断された評価点数 4 以上の音は、理論上の基準を中心に分布している。この実験における音高の適正範囲は $-11 \sim 27$ cent であった。この結果と他の音に対する評価実験の結果とを統合し、対象指導者の音高評価適正範囲は $-25 \sim 25$ cent ($\pm 1/4$ 音) の範囲であると推察された。

しかしながら、適正範囲内の音高ずれであっても指導対象となる歌唱が存在する。これらには以下の特徴が見い出せることを確認している²¹⁾。

- 評価音の前の音が基準から 50 cent 以上ずれる。
- 基準の音高変化の推移傾向に背くような音高変化を示している（例：楽譜では徐々に音高が低くなるのに、歌唱の音高は急に低くなる）。

これらはフレーズに対する音高の指導者知識となり、今後のさらなる検討が求められる。

(2) 音量

音量は、数値で表すことが難しく相対的な変化として表現されるものである。そこで、相対的な音量変化に対する指導者の評価を得る実験から、音量における指導者知識の具体化を試みる。

対象曲中、音高の極端な変化が少なく強弱記号が含まれる約 2 小節分を評価フレーズとした。歌唱データは 3.4 節の歌唱者のうち、男女 12 名が歌唱した 22 データである。対象指導者に対し歌唱データを聴取させ、音量を 5 段階評価させた。実験環境と評価音特性は

3.4 節と同様である。

楽譜上の強弱記号と対象指導者の主観評価との間に相関は見られなかった。しかしながら、**図 3** に示す瞬時的な音量の変動成分（音量のオーバーシュートと称す）が確認された。本研究では、音量のオーバーシュートとは発声区間の定常部分に対して 5 dB 以上の立ち上がりを示す 100–200 ms 継続する音量変動と定義した。この音量のオーバーシュートが 1 カ所でも確認された歌唱は、指導対象と評価された 12 データ中 10 データ（83%、立ち上がりの平均 15 dB）、指導対象外と評価された 10 データ中 4 データ（40%、立ち上がりの平均 6 dB）で存在した。指導対象の立ち上がり値は t 検定により 3%水準で有意な差が確認された。つまり、発声区間の立ち上がりが顕著な音量のオーバーシュートが対象指導者の評価結果に影響を与える 1 要因と考えられる。

実験後に音量評価の判定基準を対象指導者に聴取したところ、以下のコメントを得た。

- 全体/パートとしての音量のバランスが重要。
- 音量は連続性が重要で、滑らかな変化が適切。
- 音量が断続的に変化した場合には指導が必要。
- 音の始まりで突然大きく、もしくは小さくなってしまふものは指導が必要。

対象指導者が指摘した事柄と指導対象となった歌唱の特徴を考慮すると、歌声に顕著な音量のオーバーシュートが存在すると音の始まりでのみ音量が大きくなり、音量変化の連続性が損なわれ、歌唱が断続的になるため、指導対象と判断されたとも考えられる。これらに鑑み、本システムにおいては、音量のオーバーシュートを音量に対する評価指標として採用した。

しかしながら、音量のオーバーシュートが出現する非指導対象歌唱も存在する。これまでの実験の結果から音量のオーバーシュートの立ち上がりの大きさが評価に影響する可能性が示唆されている。そこで、本研究においても立ち上がりの大きな歌唱に対して優先して指導を与

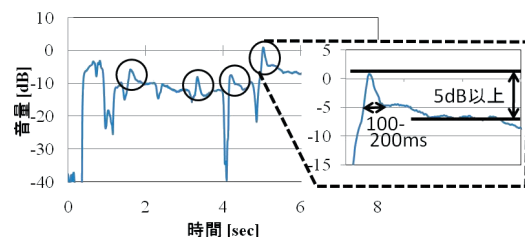


図 3 音量のオーバーシュート

Fig. 3 Overshoot phenomenon of volume in singing voice.

えることとする。

また、特定音の音量だけでなく、フレーズに存在する複数音の音量を評価する指導者知識の抽出および具体化が望まれる。

4. 合唱学習支援システム

3 章に示した指導者知識を組み込んだ合唱学習支援システムを実装した。その構成、機能、インタフェース、利用に際してのユーザとシステムとのインタラクションを示す。

4.1 構成

本研究での合唱学習支援は、学習者の歌声を入力として、その評価をシステムが行い、指導方法を具体化し学習者に示すものである。**図 4** に本システムの構成概要図を示す。本システムは、歌唱情報抽出、評価、指導の 3 つのフェーズから構成される。

歌唱情報抽出フェーズでは、入力された歌声から、音高、音量などの歌唱情報を抽出する。音高抽出にはケプストラム法¹²⁾を、音量抽出には自乗平均を用いた。

評価フェーズでは、前フェーズで抽出された歌唱情報と、楽譜および指導者の楽譜解釈や演奏解釈との差異の検出を行う。楽譜基礎情報として、曲全体のリズム、音高、音量、音価を登録する。指導者による楽譜解釈として、歌唱情報の適不適を判断するための知識を登録する。また、指導者の演奏解釈として、楽譜に反映されない主観的な評価の知識を登録する。まず、歌唱情報と楽譜基礎情報の比較から、楽譜上の音との差異が得られ、楽譜や曲に関する指導者知識に基づき、その差異から指導対象の有無が判断される。それぞれの評価結果は学習者ごとに歌唱履歴として管理され、事後指導に用いられる。

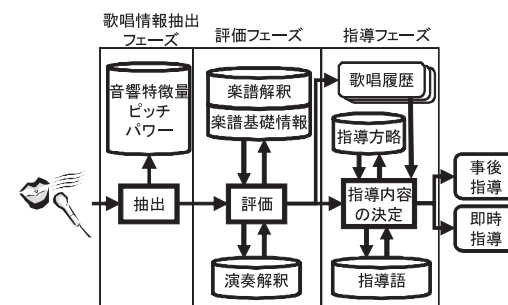


図 4 システムの構成概要

Fig. 4 System architecture.

指導フェーズでは、指導が必要と判断された歌唱情報に対して、修正すべき項目の優先順序、およびその項目を指導するための指導語を決定する。ここで、指導の優先順序は指導者の指導方略に関する知識として、また当該指導者特有の指導表現が指導語データベースとして各々組み込まれる。指導内容は、当該歌唱への評価結果に加えて、学習者の歌唱履歴も参照して具体化される。

そして、これらの処理結果は、学習者に即時指導および事後指導として示される。

4.2 機能

(1) 実際の練習を模擬した練習形態

本システムでは、パート練習、全体練習といった合唱特有の練習形態を模擬しながら学習を進めることになる。利用に際しては、自らが担当するパート（自パート）を指定し、同時に他パートの中から聴覚情報として練習中に提示を希望するものを指示する。パート練習では音取りを中心とした訓練を、他パートとの練習では合唱に特有の和声の訓練やつられ防止の訓練が可能である。

(2) 視覚情報

楽譜情報から得た音高と、学習者の歌唱情報から抽出した音高と音量がリアルタイムに表示される。さらに、以下で示す即時指導の情報が、指導対象箇所と同期しながら提示される。

(3) 聴覚情報

学習者の歌唱に合わせる歌声がシステムから提示される。提示されるパートは複数選択することが可能である。他パートとしてはコンピュータによる歌声合成音^{*1}を利用した。歌声の提示が指定されなかった場合には自パートの MIDI (Musical Instrument Digital Interface) 音源のピアノ音が提示される。

(4) 即時指導と事後指導

学習者は、歌唱時の即時指導と歌唱後の事後指導とを受けながら学習を進める。本システムを利用した合唱学習の流れを図 5 に示す。学習者は、まず即時指導として視覚・聴覚両面からリアルタイムに学習支援情報の提示を受けながら歌唱を行う。次に、歌唱のログデータをシステムに登録することで、全体歌唱に対する評価と修正点に対する指導が学習者に提示される。そして、提示された指導結果をふまえて、再度歌唱し即時指導を受ける。このような流れで繰り返し歌唱することで、修正が必要な箇所とそれへの修正成果の有無を確認しながら合唱学習を進めるのである。

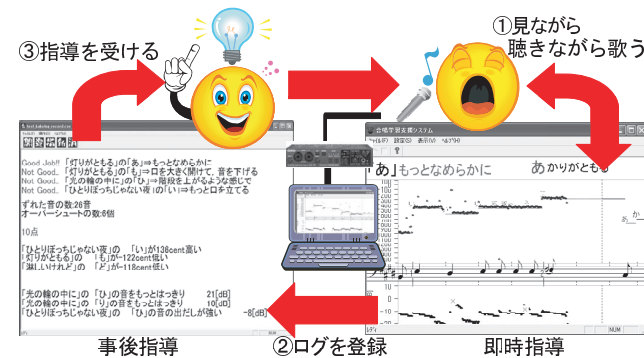


図 5 合唱学習の流れ

Fig. 5 A learning flow with our system.

即時指導の項目を以下に示す。

- 楽譜および楽譜の音高、歌詞の直前提示・歌声の音高および音量の軌跡表示
- 音高適正範囲判定
- 音量のオーバシュート判定
- 指導ログに基づく改善判定
- 当該曲において間違いやすい箇所の提示
- MIDI 音源のピアノ音/合成音声の提示
- 歌唱ログファイルの生成

歌唱後の事後指導の項目を以下に示す。

- 歌唱ログファイルに基づく歌唱結果に対する評価（間違いの数、指導箇所の改善結果、点数、間違いの幅が大きかった箇所）
- 歌唱ログ履歴に基づく音高/音量に対する指導語の生成

なお、指導語の生成には、指導を要すると判断された音響特徴量との対応の強さおよび当該学習者への指導に際しての使用履歴を考慮している。この決定機構の実装に先立ち、合唱練習の継続的観察により収集した対象指導者が用いる指導語 57 語に対して、指導対象となる音響特徴量との対応および対応の強さを整理した¹⁹⁾。その結果から、対象曲に依存せず、使用頻度の高いものでかつ個人練習に際しても利用される語の中から、特に音高と音量に対する指導に用いられる指導語 10 語を本システムに組み込んでいる（表 1 参照）。

*1 歌声合成には VOCALOID2（女声は初音ミク¹⁶⁾，男声はがくっぽいど⁹⁾）を用いた。

表 1 音高と音量に対する指導語

Table 1 Examples of instruction words.

音響特徴量	指導語
音高	音を上飛ばす
	頭の上に音を出すような感じで
	喉の奥を開いて、音を上飛ばす
	にこやかに
音量	言葉を前に出す
	もっとなめらかに
	階段を上がるような感じで
	音の入りを意識して
	楽に入ろう
	音を出す前に準備して

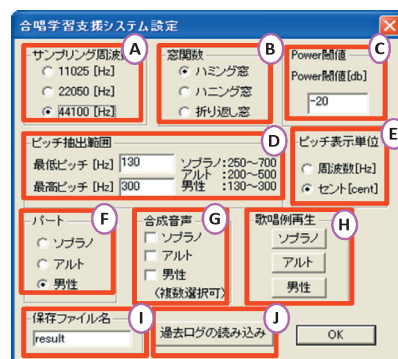


図 6 音声入力時のインタフェース（混声三部用）

Fig. 6 An interface for pre-setting.

4.3 インタフェース

(1) 音声入力時

歌唱情報抽出フェーズで用いる音響特徴量抽出パラメータ設定、および合唱学習時の練習形態設定のインタフェースの例を図 6 に示す。以下、図中の記号（A～J）の順で設定項目について述べる。

A：歌声に対するサンプリング周波数を選択する。音声抽出の際に一般的に用いられる値（11,025 Hz, 22,050 Hz, 44,100 Hz）から選択する。

B：ケプストラム法の処理（フーリエ変換）に必要な窓掛け用の窓関数を選択する。

C：音量の閾値を設定する。システム利用環境によってマイクロホンの種類や感度が異なる

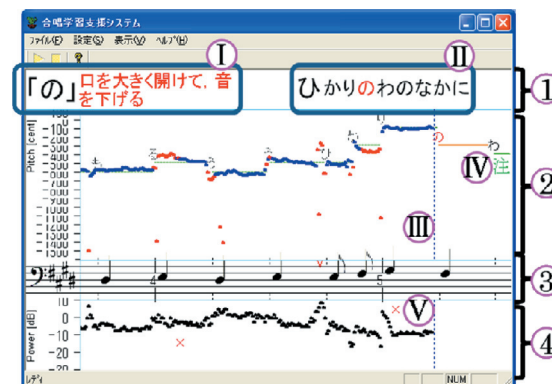


図 7 即時指導時のインタフェース

Fig. 7 An example of interface for real-time feedback.

ため、調整が必要になる。この値は有音・無音の閾値に用いる。この値より大きい音についてのみ即時指導時のインタフェースに結果が提示される。

D：音高の抽出範囲を設定する。歌唱時の最高音高および最低音高を登録し、抽出範囲を限定することで、音高の抽出ミスを減らし精度の向上を図る。また、最高周波数はリフタリング時のカットオフ周波数に用いている。各パートの一般的な音高範囲が示されている。

E：音高の周波数を線形スケール（Hz）か対数スケール（cent）のいずれかで提示するかを設定する。

F：自パートを設定する。この例では、混声三部を想定しているため 3 パートから 1 つを選択する。

G：コンピュータが歌唱するパートを選択する。

H：歌唱例の提示を要求する。初心者には楽譜のみで歌唱することが困難であるため、事前に歌唱例を聞くことで曲のイメージを持たせる。

I：歌唱結果を記録するファイル名を設定する。

J：事後指導時に利用するファイルを設定する。このファイルを登録することで、歌唱履歴に基づく指導語が選定されるようになる。

(2) 即時指導時

即時指導のインタフェース例を図 7 に示す。歌詞・指導語表示エリア（図中 1）、音高エリア（同 2）、五線譜エリア（同 3）、音量エリア（同 4）で構成される。以下、各エリアの

機能と特徴を示す。

1: 歌詞・指導語表示エリア。ここでは、歌詞と前回歌唱時の事後指導で提示された指導語とが示される。一般的な合唱練習において、指導者は歌う前にフレーズ単位で学習者に歌詞を伝えている。本システムもそれにならい、当該歌唱前に歌詞をフレーズで提示する(図中 II)。また、当該曲において誤りやすい箇所を事前に知ることができれば、修正の意識が喚起される。別実験により特定された対象曲歌唱時に初心者が誤りやすい箇所^{*1}を赤文字で表示している(図中 II の“の”)。また、前回の事後指導で提示された指導語が、当該フレーズと同期して示される(図中 I)。その指導語に対する修正成果は即時評価され、対象音の歌唱直後にその評価結果が示される^{*2}。

2: 音高エリア。楽譜音の音高と入力された歌声の音高を可視化し、同時提示する。縦軸が音の高さであり、歌声の軌跡が上にあるほど高い音を示す。楽譜音の音高は緑の直線(初心者が誤りやすい箇所は赤)で示され、その上に提示される点が学習者の歌声の音高となる。このとき、入力された歌声に修正が必要と評価された場合は赤点、不必要な場合は青点が表示される。青色の縦の点線(図中 III)が現時点での歌唱箇所であり、これより右側には次に歌うべき楽譜の音高と歌詞が表示される。特に、学習者が過去の歌唱において音高を誤った箇所に対してはアラート(図中 IV)が提示される。

3: 五線譜エリア。学習者パートの五線譜情報が表示される。ブレス位置の情報も示される。

4: 音量エリア。入力された歌声の音量を提示する。縦軸は音の大きさ(dB)であり、音量が大きいほど上に描画される。また、音量のオーバーシュートが検出された場合は学習者に提示する(図中 V)。

(3) 事後指導時

事後指導時のインタフェース例を図8に示す^{*3}。直近の歌唱ログ(図6中 I)と以前からの歌唱履歴データとを利用することで、直近の歌唱における音高と音量の誤り箇所の提示と、それらに対する修正方法の指示が与えられる。ここでは5つの機能(図中 a~e)が提供される。a: 歌唱ログファイルに基づき、歌唱に対する指導が生成される。まず、前回歌唱時の事後指導において指導対象となった箇所への修正の有無が判定結果として提示される。次に、楽譜音から外れた音の数と、音量のオーバーシュートの数などが示される。さらに、音高と音量

*1 対象曲では、歌い出し音、および音高変化が -500 cent, -400 cent, 900 cent の箇所であった。

*2 図中 I の領域に、改善された場合は「Good!!」、改善されなかった場合は「Bad」と表示される。

*3 この例では、「手紙～拝啓十五の君へ～」(以下、「手紙」と略す)、作詞・作曲: アンジェラアキ、編曲: 大田桜子(2008 年 NHK 全国学校音楽コンクール中学校の部の課題曲)が評価曲となっている。

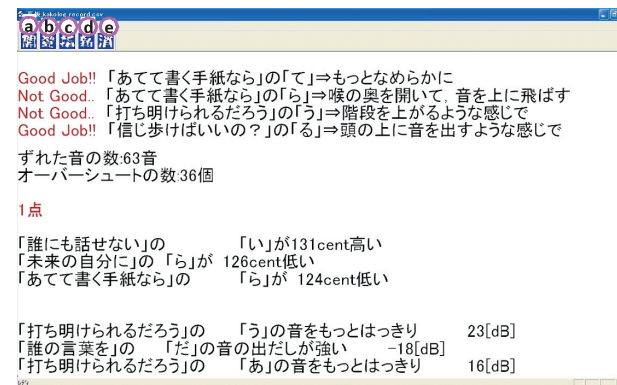


図 8 事後指導時のインタフェース

Fig. 8 An example of interface for reviewing.

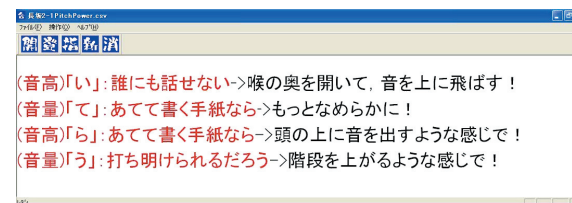


図 9 事後指導時の指導語

Fig. 9 An example of reviewing information with instruction words.

について、基準から大きくはずれた音とはずれの程度をそれぞれ提示する(音高は基準音高とのずれ幅を、音量は定常音量に対するオーバーシュートの立ち上がり値か落ち込み値)。ここに示された指導内容は指導ログとして保存され、次回歌唱時に参照可能となる。

b: aで開いたログファイルをログ履歴に追加する。直前の歌唱結果のみの評価では、偶然のミスでの結果が反映されてしまい、本当に苦手な音の情報が反映されない可能性がある。そこで、過去の歌唱評価の結果をもふまえることで、学習者の歌唱の特徴をより反映した指導の生成が可能になる。

c: 経時を考慮した重みづけにより統合されたログ履歴に基づき、指導フレーズを決定し、指導語を生成する(図9参照)。最大過去10回の歌唱ログを対象に、より直近の歌唱時の指導対象箇所の重みを大きくした個々の指導箇所ごとの特徴量に基づき、今回歌唱の指摘箇所

所を決定する。これは繰返し指導対象とされ、改善が定着しないフレーズは歌唱者にとって苦手な箇所であることが予測されるからである。

d: cの内容を指導ログとして保存する。保存することで、その指導内容が次回歌唱時の即時指導に反映される。指導語は事後指導だけでなく次回歌唱時の即時指導時に再度提示されるようになる。

e: 事後指導を終了する。

4.4 インタラクション

本システムを利用するためには、まずシステム運用者による楽譜情報と各パートの歌唱データの登録が必要になる。楽譜はMIDIとして定義する。ここからノートナンバを特定し、休符とブレス位置の情報を追加する。そのうえで各音に対して音価/歌詞を追加していく。さらに曲全体のテンポ情報を与える。各パートの歌唱データを生成する際にはMIDIに歌詞を付加し合成音声出力させる。現行では曲ごとにこれらの作業が必要となる。

指導者知識は、システムの外部ファイルとしてシステム運用者により定義される。そのため、指導者ごとに音高適正範囲を書き込み、音量のオーバーシュートのパラメータを変更し、指導語と音響特徴量との対応に関する情報を記述することで、その指導者に適応した評価機能が具体化する。

学習者は、図6に示した初期設定を経て、図7の画面を見ながら歌唱を行う。現行ではI~Vの学習支援情報は固定された領域に表示される。まず曲のテンポが提示され、続いて歌い出しのタイミングがシステムから示される。曲の途中からの歌い直しが可能である。曲の最後まで歌った場合は歌唱ログが記録される。歌唱ログが存在している場合には必要に応じて図8の事後指導を参照できる。再度歌唱する場合には図6の設定から繰り返すことになり、直前の事後指導の結果が反映した即時指導を得ることができる。学習者が新たな曲を練習する際には、現行ではシステム運用者による楽譜情報および各パートの歌唱データの登録が不可欠である。今後は個人利用に際しての利便性の向上を検討する必要がある。

5. システム評価

本システムの評価を、歌声から音高・音量を抽出する手法の妥当性、3章で示した指導者知識の妥当性の検討、4章で示した即時指導/事後指導の有効性の検討とから試みる。

5.1 歌声からの音響特徴量抽出の妥当性

音高および音量抽出手法の精度の妥当性と抽出結果の適切性を評価するために、「夜の歌」の最高音高と最低音高とを含む5音からなる簡易音階²¹⁾のMIDI(持続音としてクラリネッ

表2 本手法と比較手法と音高抽出結果のずれ

Table 2 Differences of the pitch extraction with our method and a comparison method.

		抽出結果のずれ[cent]		
評価音		平均	最大	最小
MIDI	クラリネット	1.6	4.0	0.0
	ピアノ	7.8	13.0	2.0

ト、減衰音としてピアノ)、コンピュータによる合成音声、人の歌声の3形態4種を用いた実験を行った。抽出精度はMIDI音の抽出結果から、適切性は合成音声と人の歌声に対する抽出結果から検討した。

(1) 精度

音高に関する抽出精度の妥当性の検証結果を表2に示す。採用手法においてMIDIの正解音高の抽出はできている²¹⁾。より詳細に精度を検討するために、本手法と変形相関法(商用音声処理ソフトウェアを利用)での抽出精度を比較する*1。ピアノの平均誤差の7.8centはA4(440Hz)に対して2.0Hzの差(A3で1Hz, A5で4Hz)に相当し、誤差と考えられる。本手法による音高の抽出は正確になされており、その精度に問題はない。

音量に関しては、本手法と同手法が実装されている商用音声処理ソフトウェアとによる抽出結果を比較する*2。なお、本手法ではRMS値10000を0dBとして、音量の閾値により有声/無声を判定し、有声に関してのみ抽出結果を出力している。本手法と比較手法とでは窓長・フレーム長が異なるため、パワー包絡の形状を比較した。その結果、両者の差は計算手法の分解能に対して無視できる程度であった。このことから、商用ソフトウェアでの抽出精度と比べ遜色のない精度で音量抽出がなされていることが確認された。

(2) 適切性

音高抽出の適切性については、人の歌声特有の音高の変動成分(オーバーシュート、ヴィブラート、ブレパレーション、微細変動)²⁴⁾を目視で確認した結果に基づき確認する。比較手法として商用ソフトウェアに実装された変形相関法を用いた。いずれの手法においても、合成音声と人の歌声に対して歌声特有の音高の変動成分が確認され、音高抽出の結果に差はない²¹⁾。これにより、本システムでの歌声抽出の適切性は商用ソフトウェアと比べ遜色ないと判断される。

*1 抽出条件は、標本化: 44.1 kHz, 量子化: 16 bit, 窓関数: ハミング窓, 窓長・フレーム周期³⁾: 23 msecである。

*2 抽出条件は、標本化: 44.1 kHz, 量子化: 16 bit, 窓長: 23 msec(本手法)/30 msec(比較手法), フレーム周期: 23 msec(本手法)/10 msec(比較手法)である。

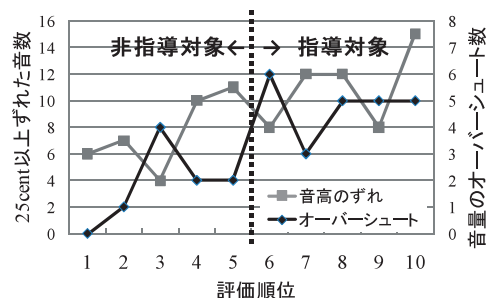


図 10 妥当性評価の結果

Fig. 10 Result of an adequacy evaluation of the extracted tutoring knowledge.

音量抽出の適切性については、音量のオーバーシュートの検出性能に基づき確認する。音量のオーバーシュート検出に利用する発声区間の定常部分とは、歌声の音高変化から得た有声区間に対して、発声開始から音量変化における 2 番目の変曲点までを除いた区間とした。その定常部分の区間平均音量と比較し、5 dB 以上の立ち上げを示す区間を音量のオーバーシュートとして検出する。テンポが MM = 140 までの曲に対して 16 分音符までの検出性能は 100%であった。

5.2 評価に関する指導者知識の妥当性

指導者知識である音高の適正範囲と音量のオーバーシュートによる歌声評価と、対象指導者の主観による歌声評価の比較から妥当性を検証する。

(1) 実験方法

被験者は合唱経験の異なる男性 10 名とした。10 名のうち 5 名は対象指導者の合唱指導を受けた経験のある者であり、残りの 5 名は対象指導者からの指導を受けた経験がない初心者である。実験環境と評価音特性は 3.4 節と同様である。指導者の主観評価として、10 名の歌唱データを聴取させ、指導の必要性の程度を無段階評価^{*1}させた。さらに指導対象と判断した歌唱データを指示させた。一方、それぞれの歌声を本システムにより評価させ、音高のずれの程度および音量のオーバーシュート数を求めた。

(2) 結果

図 10 に、主観評価の結果である評価順位に対する、音高のずれと音量のオーバーシュートの関連を示す。横軸が対象指導者によって評価された順位である。左の縦軸が基準音から

±25 cent 以上ずれた音の数であり、グレーの折れ線に対応する。右の縦軸が音量のオーバーシュート数であり、黒の折れ線に対応している。

(3) 考察

対象指導者からの指導を受けた経験のない被験者は 5 名中 4 名が指導対象となった。対象指導者からは「自分が指導した被験者の歌声とそうでない人の歌声は区別できる」「音取りや歌い出し部分の声の出し方が明らかに不安定だった歌声を優先して指導対象とした」という評価を得た。

音高のずれの数は順位が下がるにつれ、多くなっていく。このことから、音高のずれを評価基準としたことは歌声評価において妥当であることが示唆される。しかし、順位 3 と 6 の歌声は、前後の歌声より音高のずれが少ないにもかかわらず、順位が下がっている。これは、これらの歌声に音量のオーバーシュートが他の歌声よりも多く生じていたためであると考えられる。すなわち、音高がまず優先的に評価され、次に音量についての評価が補足されたことがうかがえる。今回、指導者知識として具体化された音高のずれと音量のオーバーシュートを歌声評価に用いることで、指導者に近い評価が可能となることが確認された。

しかしながら、順位 9 の歌声は今回抽出した 2 つの指標のみからでは説明がつかない。対象指導者はほかにも評価指標を用いて歌声を評価していることが推察される。

5.3 指導機能の有効性

有効性の検討として、即時指導と事後指導の有無が、音高のずれと音量のオーバーシュートの改善に及ぼす影響を取り上げる。評価対象曲は「夜の歌」と「手紙」(未習曲)を用いる。指導者知識抽出時の対象曲以外の曲を用いることで、合唱学習支援システムの汎用性の検討もあわせて行う。

(1) 実験方法

被験者は対象指導者からの指導を受けた経験がない初心者とした。被験者数は「夜の歌」で 12 名^{*2}、「手紙」で 9 名である。実験環境と評価音特性は 3.4 節と同様である。被験者を均等に 3 グループに分け(「夜の歌」は 4 名ずつ、「手紙」は 3 名ずつ)、以下の条件を与えた。

A: 即時指導と事後指導を与える。

B: 即時指導のみ与える。

C: 指導を与えない。個人練習を想定し、MIDI 音源での聴覚情報のみ与える。

*1 システム内部では 500 段階の数値として処理。

*2 「夜の歌」の被験者は 3.4 節の実験の歌唱者と同一である。3 章の実験で歌詞や理想音高を覚え、本実験で間接的に対象指導者の指導を受けることになる。

表 3 実験前後で歌唱に改善がみられた被験者数の比較

Table 3 Comparison of the number of the subjects whom the evaluation result of the song improved (a: learned song, b: not-learned song).

(a) 「夜の歌」(4名中) (b) 「手紙」(3名中)

グループ	音高		音量	
	条件 I	条件 II	条件 I	条件 II
A	4	2	1	1
B	2	3	1	0
C	1	1	2	0

グループ	音高		音量	
	条件 I	条件 II	条件 I	条件 II
A	2	3	1	0
B	2	2	2	0
C	0	0	0	0

「手紙」に関してはすべての被験者が歌唱の経験がない。実験前に合成音声による歌唱を聴取させ、メロディ進行のイメージをつかませてから実験に参加させた。歌唱条件は以下の2つとした。

条件 I：聴覚情報は合成音声の自パート。

条件 II：聴覚情報は合成音声の全パート。

条件 I はパート練習，条件 II は全体練習を想定している。この条件下で，各曲を日を変えながら 10 回ずつ歌唱させた。実験期間は 2 週間となった。また A と B に対しては，毎歌唱後にシステムから提示される学習支援情報の利用に関する質問紙調査を実施した。

(2) 結果

A, B, C の各グループにおいて，1 回目の歌唱と 10 回目の歌唱での音高が ± 25 [cent] 以上ずれた音数，および音量のオーバーシュートの出現数を比較し，数値が減少していた被験者数を表 3 に示す。

音高に関しては，両曲ともに，A と B で条件による改善の幅に違いがあるものの，半数以上の被験者に改善がみられた。C ではいずれの条件でも改善はみられなかった。

音量に関しては，「夜の歌」では，いずれの条件でも改善された被験者は 0～2 名であり，グループ間での差はみられなかった。「手紙」では，いずれの条件でも C の改善がみられず，総体として音高ほどの練習効果は確認されなかった。

(3) 考察

即時指導と事後指導の効果，および学習支援情報の利用に関して考察する。

・**即時指導の効果**：表 3 での C と他グループとの比較から，即時指導を用いることで単純な音取り練習 (C) と比べて，指導を与えながらの練習の方が音高のずれが修正されることが示唆された。また，未習曲である「手紙」の練習に際して，いずれの条件でも半数以上の被験者に音高の改善が確認された。すなわち，本システムの即時指導機能は，音高の改善に

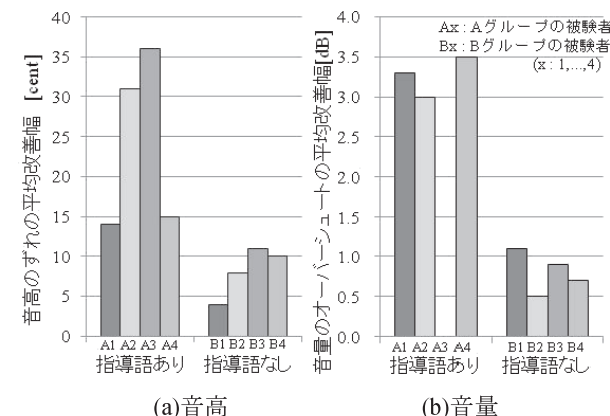


図 11 指導語の有無による音高と音量の平均改善幅 ((b) の被験者 A3 はプレス音が付加された音量が評価されたため，図中から削除した。現行システムでは歌声とプレスとを区別できない。)

Fig. 11 Degree of improvement of pitch (a) and power (b) with/without instruction words.

関して曲および練習形態を限定することなく，多様な状況での合唱練習に適用できる可能性が見い出せた。

一方，音量の改善が顕著でないのは，本実験の被験者にとってオーバーシュートの制御が容易ではなかった，あるいは音高の調整を優先していたなどが考えられる。また，システムからの指導が音高改善を優先して与えられていたため，音量に対する指導が多くなされなかったことも要因の 1 つであろうと推察される。

・**事後指導の効果**：事後指導で与えられる指導語は次回歌唱の即時指導でも利用される。この指導語に着目し事後指導の効果を検討する。A において指導語が与えられた音での音高と音量の改善の程度を A と B とで比較する。「夜の歌」の歌唱練習前と後とで，条件 II での指導語の有無が歌唱変化に及ぼした影響を図 11 に示す。(a) は音高の平均改善幅，(b) は音量のオーバーシュートの立ち上がりの平均改善幅である。図中，指導語ありが A，指導語なしが B である。

(a) に示す音高変化では，指導語ありでは平均 24.3 cent (最小 13.9 cent, 最大 36.8 cent)，指導語なしでは平均 8.2 cent (最小 3.7 cent, 最大 10.7 cent) の改善幅であった。条件 I^{*1}と

*1 条件 I では指導語ありで平均 15.5 cent (最小 4.4 cent, 最大 27.6 cent)，指導語なしで平均 4.8 cent (最小 1.1 cent, 最大 7.3 cent) の改善幅であった。

比較して、条件 II の方が顕著な差を示した。この結果に対して t 検定を行ったところ、条件 I で 3%水準、条件 II で 1%水準の有意な差が認められた。「手紙」では条件 I, II ともに 1%水準で有意な差が認められた。

(b) に示す音量のオーバーシュートの改善幅では、指導語ありでは平均 3.2 dB (最小 3.1 dB, 最大 3.4 dB), 指導語なしでは平均 0.8 dB (最小 0.2 dB, 最大 1.1 dB) の改善幅であった。この結果に対する t 検定では 5%水準で有意な差が認められた。条件 I*¹ も同様の結果であった。しかしながら、「手紙」では両条件において有意な差は認められなかった。

これらより、事後指導において指導語を用いて修正方法を示唆することが音高および音量をより改善させる効果があることが確認された。この要因として以下の 2 点が考えられる。

- 指導語により学習者が修正方法を理解し、次の歌唱時にその方法を実行できた。
- 事後指導だけでなく即時指導でも指導語が提示されることで、歌唱方法の修正への意識付けがより強力になされた。

実際の合唱練習において、これらは指導者からの指導によりなされることである。

・**学習支援情報の利用**：毎歌唱後に A と B の被験者に対して、歌唱に際しての学習支援情報の利用の様子を調査した。調査では即時指導時に提示される 8 種の学習支援情報を「見た/見ようとした/見てない」のいずれかで答えさせた。

同一期間に実験に参加した 5 名分 (A : 2 名, B : 3 名) の結果として 10 回の調査結果をまとめた利用率を表 4 に示す。指導語と評価結果は A のみに提示され、各条件の初回には提示されないため、9 回 × 2 条件 × 2 名で計 36 データとなる。それ以外の情報は A と B 共通に提示されるため、10 回 × 2 グループ × 5 名で計 100 データとなる。これらのデータを 100%とした結果を表に示す。

図 7 のエリア 1 に示される指導語は全員毎回見ていた。エリア 2 に示される音高に関する情報も全員がほぼ毎回見ていた。指導語と音高に関する情報の利用率が高いことから、従来研究のように音高軌跡をフィードバックすることに加え指導語を提示する方が、学習者の視認性が高く、音高調整に効果的であったと考えられる。

一方、エリア 4 に示される音量に関する情報のうち、軌跡を 54%は見ているが、30%は見えていない。オーバーシュートの出現は 43%が見ておらず、見た割合は 28%にとどまる。音量に関する情報の利用率が高くないことが本システムからの指導において音量の改善が顕

表 4 学習支援情報の利用率

Table 4 Ratio of utilization of the learning support information generated by our system.

エリア	学習支援情報	見た	見ようとした	見てない
1	指導語	100%	0%	0%
	評価結果	67%	33%	0%
	上部の歌詞	52%	3%	45%
2	音高軌跡(学習者)	100%	0%	0%
	音高軌跡(楽譜)	99%	0%	1%
3	五線譜	16%	10%	74%
4	音量の軌跡	54%	16%	30%
	音量のオーバーシュート	28%	29%	43%

著ではなかった要因の 1 つとも推察される。エリア 3 に示される五線譜は 74%が見ておらず、歌唱に際しての参照が多くないことが分かった。

5.4 合唱学習支援の有効性の検討

他パートを意識した練習に際して、本システムの有無による学習効果を検討することで、本システムによる合唱練習支援の有効性を検証する。

(1) 実験方法

対象曲は「夜の歌」とし、5.3 節の実験終了 2 週間後に実施した。これは対象曲での自パートの音高変化や歌詞が被験者におおむね記憶されている状態での、他パートを意識した練習を再現するためである。被験者は 5.3 節の A および B グループに属した 8 名とした。システムが提示する学習支援情報のうち、聴覚情報の別 (MIDI の自パート、合成音声の自パート、合成音声の全パート、合成音声の自パート以外) を実験条件として、それぞれシステムありとなしの場合とで 3 回ずつランダムに計 24 回の歌唱をさせた。

(2) 結果

5.3 節の実験結果をふまえて音高の改善にのみ着目する。システムの有無の歌唱結果を比較し音高が ±25 cent 以上ずれた音の数が 5%以上減少した場合を改善、増加した場合を悪化、それ以外を変化なしとまとめた (図 12 参照)。全パートを聴きながらの練習時に最も改善割合が高く、自パート以外を聴きながらの練習においても自パートを聴きながらと同程度に改善がみられる。一方、自パート、特に MIDI を聴きながらの練習ではシステムを利用することで音高評価が悪化した割合が多い。

*1 条件 I では指導語ありで平均 2.0 dB (最小 1.3 dB, 最大 2.9 dB), 指導語なしで平均 0.7 dB (最小 0.2 dB, 最大 1.4 dB) の改善幅であった。

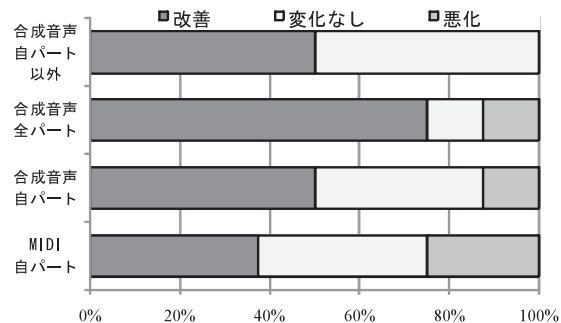


図 12 実験前後での音高ずれの変化の比較
Fig. 12 Comparison of the change of the pitch gap in pre and post experiment.

(3) 考察

他パートを意識した合唱特有の練習形態において本システムの利用による音高改善が確認された。改善の内容を分析したところ、特に全パートを聴きながらの練習では他パートへの“つられ”の改善が8名中6名で確認された。観察されたつられには、音高のつられと音価のつられがある。音高のつられとは他パートの音高に影響され同調するような音高が変化してしまう現象であり、他パートの音高変化が自パートの変化と類似しており、かつ、自パートの音高変化量が多い場合に発生する傾向がみられた。音価のつられとは、本来歌唱すべき音価よりも短い長さで歌を止めてしまう現象であり、自パートの方が他パートより長い音価で同一の音を歌唱する場合にみられた。

図 13 にソプラノ/アルト/男声の混声三部合唱の練習におけるつらの改善の様子を示す。これは8名の被験者のうちで代表的な例である。図にはアルトと男声パートの音高推移と各音価、被験者の音高推移とを示す。(a)がシステムなし、(b)がシステムありの場合である。図中(a)の45~47secでは音価のつられと音高のつられが、51~55secにおいては音価のつられが確認できる。前半のつられでは、まず男声パートの音高まで下がるのができず、次にアルトの音高変化のタイミングに同調するかのように音高を変えようとし、結果的に歌唱を中断している。後半のつられでは、男声パートの音高は保っているが、その音価はアルトの音価の切れ目に同調する箇所まで途切れている。しかし(b)では、両者の音価のつられは改善され、特に前半では音高のつられも改善が確認できる。

ここに示した歌唱時にはシステムから表1に示した音高および音量の改善を促す指導語が示されている。他パートとの調和を促す指導語は使用していない。自パートを正確に歌

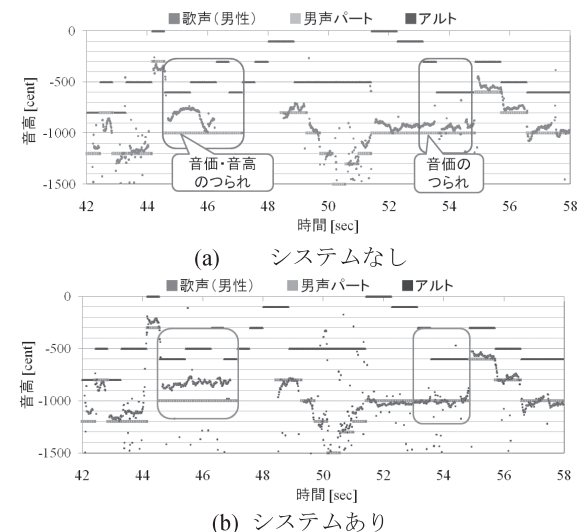


図 13 音価のつられと音高のつらの改善例

Fig. 13 Improvement examples of the off-key phenomenon and incorrect phonetic value.

唱するような指導語を示すことのみでも、つられが改善されていたといえる。また、対象指導者に同一被験者の本実験後の歌唱と3.4節の実験時の歌唱とを聴取させた。その結果、「音の高さの不安定さがだいぶ改善された」「音の大きさの推移が滑らかになったし、歌詞もしっかりとしてきた」という主観評価を得た。

これらのことから本システムは合唱特有の練習形態への支援においても有効であると考えられる。また、今回の実験において、音高および音量に関する指導機能を利用することで音価の改善が確認された。音価に関する指導者知識を具備することでよりいっそうの学習効果が期待される。

6. おわりに

本稿では、個人で合唱練習ができる合唱学習支援環境の実現を目指し、音高と音量の評価に関する指導者知識の抽出と、それらを組み込んだ学習支援システム、システムによる学習の有効性に関して述べた。提案システムでは、コンピュータによる音声合成機能を用いることで擬似的にパート練習や全体練習の再現を可能とし、即時指導と事後指導による効果的

かつ効率的で、個々の学習者に適応的な合唱練習環境を実現した。

今後の課題として、以下の事柄が指摘できる。

- 4.4 節に示した、個人利用に際してのインタラクションの改善
- 音価やリズムに関する指導者知識の具体化
- 事後指導で用いる指導語のさらなる収集
- 指導語と評価観点との対応の整理
- 学習者へ提示する学習支援情報の精査

参 考 文 献

- 1) 秋山日出男ほか(編): 合唱事典, pp.16–20, pp.316–336, 音楽之友社 (1967).
- 2) Howard, D.M. and Welch, G.F.: Microcomputer-based Singing Ability Assessment and Development, *Applied Acoustics*, Vol.27, pp.89–102 (1989).
- 3) 古井貞熙: 音響・音声学, pp.115–122, 近代科学社 (1992).
- 4) 古川康一: スキルサイエンスの展望, 人工知能学会第 21 回全国大会予稿集, 1H3-7 (2007).
- 5) 荻原 尚, 木川 裕: マルチメディア技術を利用した音楽教育教材の開発, 教育システム情報学会第 29 回全国大会講演論文集, pp.243–244 (2004).
- 6) 荻原慎洋, 森 幹男, 谷口秀次, 高橋謙三, 吉田千夏, 平井哲也: 骨導音声を用いた歌声評価・発声訓練システム, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, p.343 (2005).
- 7) 平井重行, 片寄晴弘, 井口征士: 歌の調子外れ治療支援システム, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-D-II, No.9, pp.1933–1941 (2001).
- 8) 稲見 望, 富永浩之, 松原行宏, 山崎敏範: 筆記具の動きを学ぶ体感型書き方学習システム, 電子情報通信学会論文誌 D-1, Vol.J87-D-I, No.12, pp.1128–1135 (2004).
- 9) INTERNET. 入手先 <http://www.ssw.co.jp/products/vocal/gackpoid/> (参照 2009-02-16)
- 10) 伊藤雅子, 藤井 憲, 渡辺陸雄: 児童発声の研究と合唱指導, 明治図書出版 (1976).
- 11) Sundberg, J.: *The science of the singing voice*, Northern Illinois University Press (1987).
- 12) 鹿野清宏, 伊勢史郎, 中村 哲: 音声・音情報のデジタル信号処理, pp.7–11, 昭晃堂 (1997).
- 13) 河合楽器製作所: プリマヴィスタ 2.
入手先 <http://www.kawai.co.jp/cmusic/products/pv/index.htm> (参照 2008-02-16)
- 14) 河上聖人, 藤波 努: シェイカーによるサンバ演奏技能の習得支援システムの開発, 人工知能学会第 22 回全国大会予稿集, 1B2-1 (2008).
- 15) 凍田和美, 西野浩明, 宇都宮孝一: 対話型 3 次元仮想陶芸作業環境の設計と実現, 大分県立芸術短期大学研究紀要, Vol.35 (1997).
- 16) クリプトン, VOCALOID2 特集. 入手先 <http://www.crypton.co.jp/mp/pages/prod/vocaloid/cv01.jsp> (参照 2009-02-16)
- 17) 三浦雅展, 下石坂徹, 齊木由美, 柳田益造: 和声学学習のためのバス課題実施システムのユーザインタフェースとその評価, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.100, No.113, pp.33–40 (2000).
- 18) 村谷達也, 関谷 晋: コーラスハンドブック, 西田書店 (1980).
- 19) 永井 孝, 香山瑞恵, 伊東一典: 遠隔ドローイング学習支援の可能性とドローイングプロセスの再利用に関する検討, 教育システム情報学会研究報告, Vol.23, No.4, pp.54–61 (2008).
- 20) 中西 将, 砂押聖三, 香山瑞恵, 為末隆弘, 伊東一典, 橋本昌巳, 浅沼和志, 池田 操: 初学者のための合唱学習支援システムにおける教師知識の基礎的検討, 情報処理学会研究報告, Vol.2008, No.12, pp.19–24 (2008).
- 21) 中西 将, 岡部真実, 香山瑞恵, 浅沼和志, 伊東一典, 為末隆弘, 橋本昌巳: 指導者知識に基づく初心者向け合唱学習支援システムの構築とその評価, 教育システム情報学会研究報告, Vol.23, No.12, pp.46–53 (2008).
- 22) 中野倫靖, 後藤真孝, 平賀 譲: MiruSinger: 歌を「歌って／聴いて／描いて」見る歌唱力向上支援インタフェース, 情報処理学会インタラクション 2007 論文集, pp.195–196 (2007).
- 23) 岡部真実, 中西 将, 香山瑞恵, 浅沼和志, 伊東一典, 為末隆弘, 橋本昌巳: 合唱指導者の歌声に対する指導方略に関する基礎的研究, 教育システム情報学会第 33 回全国大会講演論文集, pp.266–267 (2008).
- 24) 斎藤 毅, 後藤真孝, 鶴木祐史, 赤木正人: SingBySpeaking: 歌声知覚に重要な音響特徴を制御して話声を歌声に変換するシステム, 情報処理学会研究報告, Vol.2008, No.12, pp.25–32 (2008).
- 25) 曾我真人, 松田憲幸, 高木佐恵子, 瀧 寛和, 吉本富士市: スキル学習に共通な特徴とスキル学習支援システムに必要な機能について, 人工知能学会第 18 回全国大会予稿集, 3D2-04 (2008).
- 26) 曾我真人, 松田憲幸, 瀧 寛和: デッサン描画中に描画領域に依存したアドバイスを提示するデッサン学習支援環境, 人工知能学会論文誌, Vol.23, No.3, pp.96–104 (2008).
- 27) 竹内秀男: 合唱指導の実際と運営, 音楽之友社 (1992).
- 28) 米沢義道, 伊東一典, 平野圭蔵: 音痴の音高感覚に関する検討, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J71-A, No.8, pp.1532–1538 (1988).
- 29) 全日本合唱指揮者協会: リーダーシャッツ 21, Vol.1 [混声合唱/日本のうた篇], pp.72–74, カワイ出版 (2007).

(平成 21 年 4 月 16 日受付)

(平成 21 年 11 月 6 日採録)



香山 瑞恵（正会員）

信州大学工学部准教授。博士（工学）。電気通信大学大学院助手，専修大学助教授を経て，2007 年より現職。研究テーマは学習支援工学。特に，知識処理，協調技術，教育工学の研究に従事。著書には『人工知能と教育工学』。電子情報通信学会，日本人工知能学会，教育システム情報学会，日本教育工学会等の各会員。



中西 将

2008 年信州大学大学院工学系研究科修了。工学修士。現在，NTT データ（株）所属。在学中は合唱支援システムの研究に従事。



岡部 真美

2008 年信州大学工学部卒業。現在，富士フィルム（株）所属。在学中は合唱支援システムの研究に従事。



浅沼 和志

長野県工科短期大学校准教授。富士通株式会社，富士通コンポーネント株式会社，セラテックジャパン株式会社を経て 2007 年より現職。呼吸情報計測，光デバイス工学，品質管理工学の研究に従事。電子情報通信学会，日本生体医工学会，計測自動制御学会，日本品質管理学会等の各会員。



伊東 一典（正会員）

信州大学工学部情報工学科教授。工学博士。長野工業高等専門学校助手，信州大学工学部助手，助教授を経て，2005 年より現職。1998～1999 年デンマークオールボー大学客員研究員。音響情報，生体情報の計測処理およびヒューマンインタフェースの研究に従事。電子情報通信学会，IEEE，日本音響学会，日本生体医工学会，ヒューマンインタフェース学会，日本人間工学会等の各会員。



為末 隆弘

山口大学大学情報機構助教。博士（工学）。長野工業高等専門学校助手，信州大学助教を経て，2009 年より現職。研究テーマは音響情報工学。主として環境騒音の計測，予測，評価および制御に関する研究に従事。日本音響学会，電子情報通信学会，システム制御情報学会等の各会員。



橋本 昌巳（正会員）

信州大学工学部准教授。博士（工学）。信州大学助手を経て，2007 年より現職。生体情報の計測処理，ヒューマンコンピュータインタラクション等の研究に従事。日本生体医工学会，電子情報通信学会，日本人間工学会等の各会員。