

声帯の開き具合を意識しさせる高音域歌唱練習システム

High-range singing practice system to make conscious of the degree of opening of the vocal folds

松沢 知花
Chika Matsuzawa
法政大学情報科学部デジタルメディア学科
15k1138@cis.k.hosei.ac.jp

Abstract

In order to sing recent popular music, it is necessary for male singers to sing higher range than the range they can sing strongly. If they try to sing such songs in the same vocal register as the original pitch, the voice turns over or it becomes a weak voice. To prevent these, vocalization is important. In this research, we propose a training system for high-frequency singing based on a method called middle voice that a method of singing high-range strongly by controlling a falsetto and a chest voice. Middle voice judgment is performed by estimating fundamental frequencies, the number of spectral peaks, and using an index judged falsetto. As a result, pitch miss was reduced by 25% on average for 3 male students. Also, for a student who could not separate a falsetto and a chest voice, the accuracy of separation improved by 25%. In conclusion, the proposed method is effective.

1 はじめに

カラオケなどの普及によって、歌唱する機会が増加し、歌唱楽曲のジャンルも、ポップスやロック、演歌など多岐にわたる。近年の人気のあるポップスやロックの楽曲は音域が広く、特に高音域の力強い発声が必要とする楽曲が多い。例えば、以下の図で示すように、ONE OK ROCK の The Beginning を歌唱するには、mid1E hiC の音域を発声する必要がある。男性の平均音域は lowG mid2F であるため、一般人で練習をせずに高音域を発声できる人は少ない。高音域を発声する必要がある楽曲を歌唱できるようにするには、何らかのトレーニングをする必要がある。

歌を上手くするには、ボイストレーニングをすることが一般的だが、教室に通うには時間とお金がかかる。独学で練習しようとする、達成度を自己で判断することは難しく、誤った方法で練習し続けることで、声が枯れてしまったり、長時間歌うことが難しくなる可能性がある。また、市販のボイストレーニング本 [1] は、感覚によるところが大きく、本に書かれている通りの正しいトレーニングができていないとは限らない。そのため、喉に負担をかけずに自動トレーニングができるボイストレーニングサポートシステムを提案する。

歌の上手さには、音程・音量・リズム・発声・発音などがあるが、本研究では、発声に着目する。カラオケ採点などの既存のシステムでは、音程、ビブラートは評価しているが、発声や声帯の制御の可否は評価できないためである。これらができていないと、歌唱時に喚声点と言われる地声から裏声へ切り替わる音域で声が裏返ったり、歌唱後には声が枯れたり喉が痛くなったりして、支障がでる。そこで、以下の2点に着目してシステムを作成する。1点目は歌唱するのに最も適している呼吸と言われている腹式呼吸である。腹式呼吸を用いると喉に負担をかけずに楽に大きな声を出せるようになり、長時間歌っても疲れにくい。2点目は、地声のように強く裏声の音域を発声する方法 [2] である。本研究では、この発声法のことをミドルボイスと呼ぶ。この発声法を習得すると、腹式呼吸と同様に、喉に負担をかけずに歌唱音域が広い歌が歌えるようになる。

2 人間の歌唱・声帯の制御

これまで、歌唱音声の特性を明らかにする研究や、人間の歌唱理解に関する研究がおこなわれてきた。例えば、歌唱音声の音響解析に基づく歌唱力評価の考察 [3]、などの研究事例がある。歌唱音声の自動評価に用いられる特徴量は、楽譜情報を用いる場合は、音程やリズム感などであり、楽譜情報を用いない場合は、相対音高やビブラートなどである。木立らの研究 [4] では、呼気量や声質などに着目し、高音域の歌唱をより力

強い歌唱に修正した。しかしこれは歌唱自体の上達を目指すものではない。片岡らの研究 [5] では、歌唱練習システムの構築を目的とし、ピッチ、音長、音量を特徴量として分析を行ったが、ミドルボイスの習得といった声区についての記述はない。発声状態や声帯の制御に着目した歌唱音声評価の研究事例 [6][7][8][9][10] は存在するが、ミドルボイスの習得を目指すトレーニングシステムの構築を目的とした研究事例はない。一方で教育学の分野では、ミドルボイスの習得法を用いた発声に関する問題点の改善の検証 [12] が行われている。本研究では、教育学の分野で行われてきたミドルボイストレーニングを自動化することを目指す。

3 高音域歌唱練習システム

高音域歌唱練習システムの実現のために、YUBA メソッドを利用する。YUBA メソッドは、ミドルボイス習得法の1つで、6つのステップを踏んで習得を目指す [12][13]。以下の表1のように、裏声と地声をはっきり出し分けることから始め、最終的に、裏声と地声の境目をなくして滑らかに歌唱する。これら

表1. YUBA メソッドの手順

| | |
|--------|---------------------|
| LEVEL1 | 裏声と地声をはっきり出し分ける |
| LEVEL2 | 裏声と地声を色々な高さで出す |
| LEVEL3 | 裏声と地声で簡単なメロディーを歌う |
| LEVEL4 | 両方の声を行き来して歌う |
| LEVEL5 | 両方の声を混ぜて喚声点を目立たなくする |
| LEVEL6 | 裏声と地声の境目をなくして滑らかに歌唱 |

のステップを踏むことで、各声区で異なる筋肉を使うことを歌唱者に意識・トレーニングさせることができる。本研究では簡単のために、3点2でミドルボイスを習得できたかの達成度をはかる。

表2. 判断基準

| | |
|---|----------------------|
| 1 | 裏声と地声を出し分ける |
| 2 | 裏声と地声を出し分けてピッチも正確に取る |
| 3 | 喚声点を目立たなくする |

それぞれの項目を習得できたかを自動で判定するには、基本周波数推定と、声区判定をする必要がある。ここで、トレーニング全体の流れを以下の図1に示す。初めに、評価用に用意したフレーズ4.1を歌唱する。次に、YUBA メソッドに沿ったトレーニングフレーズを歌唱し、システムでの判定を行う。判定で合格となった場合には、次のステップに進み、トレーニングフレーズの歌唱を繰り返す。ステップ6のトレーニングフレーズまで合格となったら、最後にもう1度評価用フレーズを歌唱する。

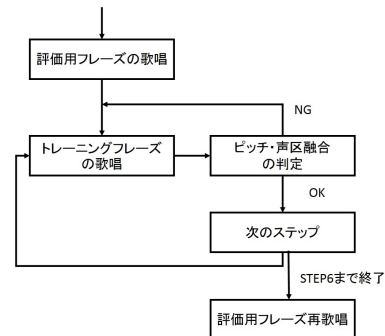


図1. トレーニング全体の流れ

3.1 基本周波数推定

基本周波数推定には、自己相関関数を用いる。まず、対象の歌声の音声ファイルを読み込み、16kHzにダウンサンプリングする。次に自己相関関数を求める。この時の分析フレーム長は512点、フレームシフトは256点とする。上記の手順で得られた歌声の基本周波数を、楽譜情報から得たガイドメロディの基本周波数を重ねて表示し、ピッチが取れているかを可視化する。その後、ガイドメロディと歌声の基本周波数を比較し、歌声の基本周波数がガイドメロディの基本周波数から50cent以上ずれていた場合、ピッチが取れていないと判定し、ミスとして検出する。ただし、音程を変えるタイミングによっては、正しくピッチが取れていてもミスとして検出されてしまう場合があるため、1音1音の変わり目の前後4フレームは、ミスの検出は行わない。

3.2 声区推定

3.2.1 スペクトルのピーク数のモデル化

前述のYUBAメソッドのステップ1～ステップ4までは、歌声のスペクトルのピーク数のモデル化で声区推定を行う。ステップ1～ステップ4までは裏声と地声という2つの声区を分けて出せるようにするトレーニングとなっている。そのため、裏声か地声かを判定することが必要になる。裏声か地声かを判定するには、歌声のスペクトルを利用する。ここで、裏声と地声にはどのような違いがあるのかを以下の図を用いて説明する。

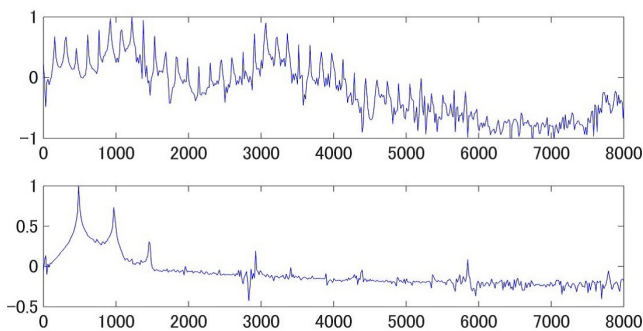


図2. 歌声のスペクトル (上:地声 下:裏声)

図のように、地声のスペクトルは裏声のスペクトルと比べて、倍音が多く存在する。裏声の場合は、基本周波数成分のエネルギーが大きく、倍音成分は地声と比べて少ないことが分かる。このような特徴を用いて、裏声と地声の判別を行う。

まず、対象の歌声の音声ファイルを読み込み、16kHzにダウンサンプリングする。次に、分析フレーム長512点、フレームシフト256点でフーリエ変換を行い、スペクトルを得る。ここで得られたスペクトルのピークをMATLABの関数findpeaksで検出する。このピークの数と学習し、正規分布でモデル化し、対象の声の尤度を求めることで判別を行った。

3.3 スペクトル重心

浅野ら[14]によって、裏声と地声を判別する指標が提案されているが、この指標では、ミドルボイスの特徴は考慮されておらず、そのままでは声区融合の判定はできない。そこで、従来手法では50～2500Hzの間でスペクトル重心を求めていたところを、発声による違いがみられる高周波成分を含んだ50～16000Hzに拡張して求めた。

まずはじめに、声帯振動を求め、線形予測係数の逆フィルタを用いて声道特性を除去することで推定した。人間の声は、以下の図3のように声帯振動と声道特性によって特徴づけられる。

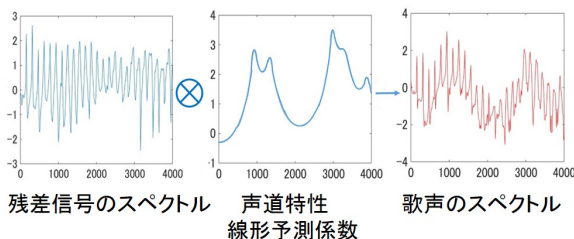


図3. 人間の声の仕組み

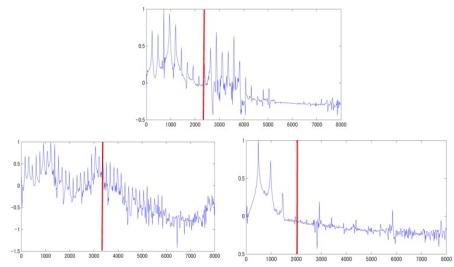
具体的には、肺から送られてくる息によって声帯が振動し、その振動が声道や口の形の影響を受けて発声される。この声帯の振動が声帯振動、声道を通るときの周波数の影響が声道特性

である。声帯振動は、振動数が高いと音程が高く、振動数が低いと音程が低くなるといった声の高さに影響する。声道特性は、誰でも似たような概形になり、音韻性に影響を与えている。

声帯振動を求める過程を以下の通りである。対象の歌声の音声ファイルを読み込み、高域強調・32kHzにダウンサンプリングする。次に線形予測係数を求め、これを逆フィルタとして歌声に畳み込む。この時の分析フレーム長は512点、フレームシフトは256点とする。この方法で得た声帯振動のスペクトルから次の式で各フレームごとにスペクトル重心を求める。

$$f_g = \int_0^{\infty} fS(f)df \quad (1)$$

判別には、声区が上がるにつれて重心が高くなる特徴を利用する。各フレームごとに求められたスペクトル重心の値をプロットし、線形回帰をして直線で近似する。その直線からしきい値以上ずれた値を除いてもう1度線形回帰を行い、直線で近似する。2回目に得られた直線からのずれを計算し、誤差の平均を求める。このような指標を利用して声区が融合されたかを確認する。



上:ミドルボイスのスペクトル
左下:地声のスペクトル、右下:裏声のスペクトル

図4. 重心の位置の違い

4 評価

4.1 実験

システム上での評価がボイストレーナーの耳で聞いたときの感覚を反映できているかを確かめるために、システムでの評価と主観評価の一致を確認する評価実験を行った。被験者は、音楽を専門に学んでいない一般男性3名である。以下の表3に、被験者に関する情報を示す。ここでこの喚声点は、被験者の自己申告によるものである。裏声発声ができていると主観で判断した被験者には、裏声欄に○を、裏声発声できていないと判断した被験者には△をつけた。

表3. 被験者の情報

| 区分 | 年齢 | 喚声点 | 裏声 |
|------------|--|-----|----|
| 一般学生 A・初心者 | 22歳 | G# | ○ |
| 発声に関する所見 | 高音が出にくい 滑らかなピッチ変化が困難 喚声点付近でピッチを外すことがある | | |
| 一般学生 B・初心者 | 22歳 | G | △ |
| 発声に関する所見 | 裏声と地声が極端に変わってしまう フレーズの最後まで息が持たない 高音に気を取られてプレスを忘れがち 1オクターブ下げて裏声発声を避けがち | | |
| 一般学生 C・初心者 | 22歳 | A | △ |
| 発声に関する所見 | 自分がどの音程で歌っているか分からない 高い声が出せない お腹から声を出せない | | |

実験期間は、1回30分～40分ほどの練習を3回行った。実験の最初に、トレーニング前後での効果を測るために、図4.1の楽譜に記されたフレーズを歌唱してもらい、ピッチ制御の可否、裏声地声の出し分けの可否を判定する。図の赤い縦線は、喚声点の位置を示している。この時、音韻は/a/で固定する。録音にはZOOMのハンディレコーダーH2nextを使用する。収録条件は、44.1kHz,16bitである。



図5. 評価に用いたフレーズ (赤い縦線が喚声点)

トレーニングフレーズの例を以下の図??に示す。例に示したフレーズは、LEVEL4のフレーズである。トレーニングフレーズは全部で13種類用意した。各トレーニングフレーズに対して、ピッチ検出と裏声判定を行う。



図 6. トレーニングフレーズの例

4.2 結果

被験者 A に関しては、トレーニング中は、喚声点付近でピッチを外してしまうことが多かった。トレーニング後は、裏声と地声の差がはっきりと分かれている問題が改善し、ミドルボイスを発声できた。また、歌いだしのピッチが不安定になることがあったが、練習を繰り返すことで改善した。被験者 B に関しては、喚声点以外で時折ピッチを外すことがあったり、裏声を使わずにフレーズを歌唱しようと、1オクターブ下で歌ってしまう傾向にあったが、練習を繰り返すことで改善した。1オクターブ下で歌ってしまった場合は、ピッチが1オクターブずれていることを示し、オクターブ上で歌うアドバイス (YUBA メソッドに沿ったもの) を行った。被験者 C に関しては、喚声点以外でもピッチを外すことが多かった。また初めは、1音1音を切って歌ってしまい、滑らかに歌唱できなかった。しかしこれら2点も、練習を繰り返すことで改善した。はじめに、評価用フレーズ歌唱時のピッチの誤り率の変化 4 を示す。

表 4. ピッチ誤り率

| 被験者 | 練習前の誤り率 | 練習後の誤り率 | 改善率 |
|-----|---------|---------|------|
| A | 0.39 | 0.10 | 0.74 |
| B | 0.56 | 0.27 | 0.52 |
| C | 0.77 | 0.36 | 0.53 |

続いて、被験者 A のトレーニング前後のピッチ推移とスペクトログラムを以下の図 4.24.2 に示す。ピッチのグラフの横軸が秒単位の時間 (time[s]) を表し、縦軸は周波数 (cent) を表している。スペクトログラムのグラフの横軸は、秒単位の時間 (time[s]) を表し、縦軸は周波数 (Hz) を表している。

トレーニング前のピッチは 3 秒付近でピッチがずれていることが分かるが、トレーニング後には改善した。また、スペクトログラムを見ても、練習前はフレーズの前半部分と後半部分で声区が分離してしまっていたのに対し、練習後は声区が融合していることが分かる。

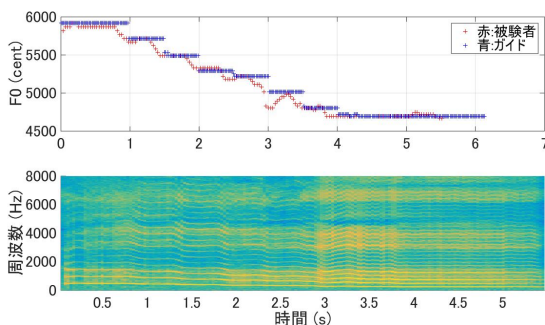


図 7. 被験者 A:ピッチ推移とスペクトログラム (練習前)

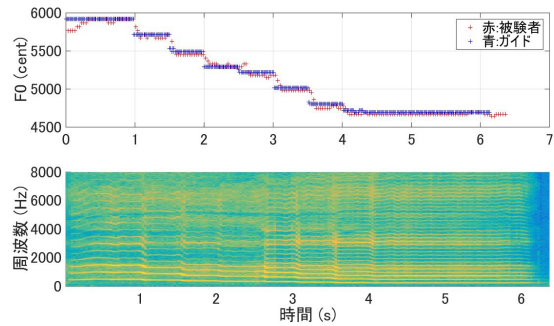


図 8. 被験者 A:ピッチ推移とスペクトログラム (練習後)

続いて、スペクトル重心による声区融合エラーを以下の図 94.2 に示す。

スペクトル重心 94.2 を見ても、喚声点付近 (3~4 秒) で練習前は大きく外れてしまっていたのが、練習後にはずれが軽減していることが分かる。被験者 B、被験者 C においても、トレーニング前より、ピッチを正しく取れるようになり、声区の融合が見られたが、スペクトル重心では有意差は見られなかった。

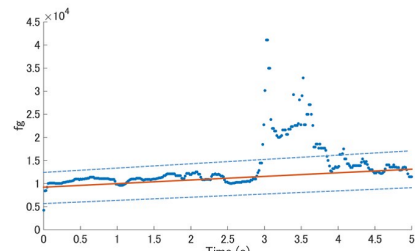


図 9. 被験者 A:スペクトル重心 (練習前)

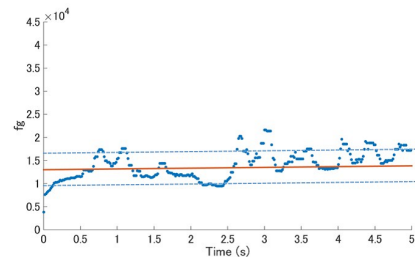


図 10. 被験者 A:スペクトル重心 (練習後)

5 考察

ここで、システムの評価と主観評価との比較を行う。まず、ピッチが取れているかについての比較を以下の表 5 に示す。

表 5. ピッチ誤り率と主観評価の比較

| 被験者 | システム | 主観評価 |
|-----|------|------|
| A | 0.10 | ○ |
| B | 0.27 | △ |
| C | 0.36 | × |

主観評価については、ピッチが取れていると感じた場合には○、外すことがあると感じた場合には△、ピッチが取れていないと感じた場合には×をつけた。

次に、声区が融合したかについての比較を以下の表 6 に示す。

表 6. 声区融合エラーと主観評価の比較

| 被験者 | システム | 主観評価 |
|-----|-------------------|------|
| A | 3.3×10^3 | 2 |
| B | 5.6×10^3 | 1 |
| C | 8.0×10^3 | 1 |

主観評価については、喚声点が目立たないと感じた場合には3点、裏声と地声を出し分けてピッチも正しくとれたと感じた場合には2点、裏声と地声をはっきり出し分けられたと感じた場合には1点をつけた。いずれの結果を見ても、プロのピッチ

誤り率が約 0.10、声区融合エラーが、約 2.8×10^3 であることから、システムの評価と主観評価の一致が確認できる。

各ステップ終了後の裏声地声の出し分け率 7、ピッチ誤り率 8、声区融合エラー 9、主観評価の表 10 を示す。ただし、主観評価で達成できていないと判定されたステップ以降の値は、参考の値という意味でかっこ書きとした。主観評価の表は、そのステップを達成したと判断した場合は○を、達成できていないと判断した場合には△をつけた。

表 7. 各ステップ終了後の裏声と地声の出し分け率

| 被験者 | STEP1 | STEP2 | STEP3 | STEP4 |
|-----|-------|-------|--------|--------|
| A | 0.85 | 0.90 | 0.96 | 0.95 |
| B | 0.83 | 0.88 | 0.94 | 0.93 |
| C | 0.77 | 0.89 | (0.92) | (0.89) |

表 8. 各ステップ終了後のピッチ誤り率

| 被験者 | STEP3 | STEP4 | STEP5 | STEP6 |
|-----|--------|--------|--------|--------|
| A | 0.13 | 0.12 | 0.25 | 0.20 |
| B | 0.33 | 0.35 | 0.86 | 0.60 |
| C | (0.67) | (0.60) | (0.90) | (0.59) |

表 9. 各ステップ終了後の声区融合エラー

| 被験者 | STEP5 | STEP6 |
|-----|---------------------|---------------------|
| A | 3.4×10^3 | (4.9×10^3) |
| B | (6.4×10^3) | (6.2×10^3) |
| C | (6.9×10^3) | (6.3×10^3) |

表 10. 各ステップでの主観評価

| 被験者 | STEP1 | STEP2 | STEP3 | STEP4 | STEP5 | STEP6 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | △ |
| B | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | △ |
| C | ○ | ○ | △ | △ | △ | △ |

各ステップでの達成度を見ても、主観評価とシステムの評価の一致が確認できる。

ここで、被験者 A の STEP5 におけるピッチ誤り率、声区融合エラーを以下の表 11 に示す。1 回目から 3 回目までで、ピッチ誤り率、声区融合エラーともに改善が見られたため、STEP5 で歌唱したトレーニングフレーズはピッチ改善と声区融合に有効であると考えられる。

表 11. 各ステップ終了後の声区融合エラー

| | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|
| ピッチ誤り率 | 0.36 | 0.23 | 0.12 |
| 声区融合エラー | 4.5×10^3 | 4.1×10^3 | 3.2×10^3 |

次に、被験者 B の STEP3 における裏声と地声の出し分け率を以下の表 12 に示す。システムを使用した時の練習 1 回目では、トレーニングフレーズを 1 オクターブ下げて全て地声で発声していたが、出し分け率とピッチを示すことで、裏声発声できていないことを被験者が認識したことが、2 回目以降の改善につながったと考えられる。一方で、システムを使用せず、歌唱練習のみを行った場合は、被験者が裏声発声できていないことを認識できず、改善率が低かった。このことより、出し分け率とピッチを示す本システムは裏声発声を促すのに有効であるといえる。

表 12. 被験者 B の STEP3 における出し分け率の比較

| | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 |
|--------|------|------|------|
| システム使用 | 0.00 | 0.83 | 0.94 |
| 歌唱のみ | 0.00 | 0.16 | 0.22 |

被験者 C に関しては、裏声と地声の出し分け率は改善したものの、ミドルボイス習得には至らなかった。より具体的に述べると、ピッチを正確に取れなかった。YUBA メソッドの STEP3 以降を達成するにはある程度正確にピッチを取れるようにする必要がある。しかし、被験者 C はそれができていないため、STEP2 までの達成と判定されたと考える。現状のシステムを使用してミドルボイス習得が見込めるのは、ある程度正確にピッチを取れる被験者に限られてしまっている可能性が高い。そのため、ピッチが取れない被験者もミドルボイスを習得するには、本システムを使用する前に、ピッチを正確に取るトレーニングをする必要がある。ピッチ外れの改善の研究としては、平井らの研究 [15] や竹原らの研究 [16] などがある。平井らの研究では、被験者をピッチ外れの度合いによってクラス分け (A~E) し、クラスごとのトレーニングを行った。トレーニングは、練習フレーズを歌唱し、リアルタイムでガイドメロディ

のピッチと被験者が歌唱したピッチを表示する。その結果、クラスの中で最もピッチが取れていないクラス E の被験者に対しても、ピッチの視覚的フィードバックが有効だった。ただ、クラス D,E の被験者に対しては、カウンセラーによる指導も不可欠であった。本システムにも、平井らの研究を自動化した機能を追加することで、ピッチが取れない被験者に対してもミドルボイスの習得が見込めると考える。

6 おわりに

発声に着目し、スペクトルのピーク数により声区判別を行うことで、高音域歌唱練習システムを提案した。その結果、一般男子学生 3 名に対して、ピッチ誤り率が平均 52% 改善した。また、喚声点ショック (声区融合エラー) は平均 34% 改善した。さらに、歌声のスペクトルのピーク数を特徴量として、裏声と地声の出し分け判定を行ったところ、裏声と地声の出し分けができていなかった被験者 B に対して、出し分け精度の向上が確認された。被験者 B においては、裏声と地声の出し分け率とピッチの推移を示した時は、出し分け率が大きく改善したが、歌唱練習のみの場合は、改善率が低く、システムの有用性が示せた。

今後の課題としては、ピッチを取れていない被験者に対する練習システムの提案である。今回の被験者 C は、ピッチを正確に取ることができておらず、本システムを使用しても、ミドルボイス習得には至らなかった。被験者 C のようなユーザに対してもミドルボイスの習得が見込めるよう、本トレーニングシステムの前に、ピッチを正確に取るためのトレーニングをする必要がある。

参考文献

- [1] 亀淵 由香, "あなたの声がぐんぐんよくなる!! 1人でできるボイストレーニング CD ブック", 主婦と生活社, 2006
- [2] ロジャー・ラヴ, 高田三郎, 百瀬由美, "歌う力"をグングン引き出すハリウッド・スタイル 実力派ヴォーカリスト養成術", リットーミュージック, 2005
- [3] 中野倫靖, 後藤正孝, 平賀譲 "楽譜情報を用いない歌唱力自動評価手法", 情報処理学会論文誌, 48 巻 1 号, pp.227-36, 2007-01-15
- [4] 木立真希, 他 "呼気量のモデル化に基づく歌唱修正システム Singing modification system based on modeling of expiratory volume" 情報処理学会全国大会講演論文集 76 巻 2 号 p.2369-p.2370 2014
- [5] 片岡靖景, 伊東一典, 池田操, 他 "歌唱支援システム構築のための歌声の分析と評価" 情報処理学会研究報告音楽情報科学 (MUS) 23-30, 1998
- [6] 平山健太郎, 他 "ポピュラー音楽の歌唱を対象とする高音域発声評価システムの構築 Construction of high pitched sound region utterance evaluation system intended for singing of popular music" 第 73 回情報処理学会全国大会講演論文集, 277 -279, 2011.
- [7] 平山健太郎, 他 "喉頭の運動に注目した歌唱音声の自動判別と評価 Discriminant Analysis of Singing Voice Focused on The Movements of The Larynx" 第 75 回情報処理学会全国大会講演論文集, 2.265-2.266, 2013.
- [8] 平野実, "歌声の調節機構" 音声言語医学会誌, 11 巻 1 号, 1970
- [9] 大谷圭介, 他 "声区転換部を含むオペラ歌唱の音響的特性スペクトル変動に見る音響的指標について", 日本音楽知覚認知学会誌, 19 巻 1 号, 2013
- [10] 虫明眞砂子, 財満 健史, 大脇 雅直, "歌唱における声区転換の可視化に関する研究 (1) 音楽専門家による評価結果と被験者へのヒアリング調査との対応", 岡山大学大学院教育学研究科研究集録 第 167 号 (2018) p.37-p.43
- [11] アン・ベッカム, 今野, "ザ・コンテンポラリーシンガー CD 付 ヴォーカルテクニック&パフォーマンスのための", エー・ティ・エヌ, 2002
- [12] 山崎英明, "YUBA 理論 (発声制御理論) に基づいた声区融合の実践における喚声点ショックの改善に関する検証", 三重大学大学院教育学研究科研究集録, 2013
- [13] 弓場徹, "奇跡のボイストレーニング BOOK", 主婦の友社, 2004
- [14] 浅野翔大, "裏声判別指標を用いたボイストレーニングソフトウェア", 三重大学大学院工学研究科研究集録, 2013
- [15] 平井重行, 片寄晴弘, 他 "歌の調子外れに対する治療支援システム" 電子情報通信学会論文誌 D (2001) Vol.J84-D2 No.9 pp.1933-1941
- [16] 竹原 秀和, 山下 賢太郎, 他 "歌唱音声の評価と訓練のための支援システムの開発 -音階ピッチ・マッチングの検討-" 電気関係学会九州支部連合大会 (2011) 講演論文集