

ScoreIlluminator : スコア色付けによる オーケストラスコアリーディング支援システム

松原正樹^{†1} 岡本紘幸^{†1} 佐野智久^{†1}
鈴木宏哉^{†1} 延澤志保^{†2} 斎藤博昭^{†1}

オーケストラなど大編成用に作曲された楽曲のスコア（総譜）は、パート数の多さから判読性に欠け、異なるパート間の関連性を把握するには音楽構造を理解する必要があり、楽譜（パート譜）を読むことができてもスコアを読むことができない演奏者が多いという問題点がある。そこで本稿では、異なるパートの似た役割を持つフレーズをクラスタリングし、各クラスタに異なる色を割り当てて楽譜上に着色する手法と、音楽を再生しながら色付け楽譜を見ることで異なるパート間の関連性を把握しやすくするインタフェースを提案する。提案手法では、合奏において重視すべき、リズム、響き、メロディ、和声を考慮した4つの特徴量を用いてパート間の距離を定義し、k-means アルゴリズムを利用してクラスタリングを行うことで色付け楽譜の生成を実現している。また提案するインタフェースにおいて、ユーザは操作の繰返しにより、スコアリーディングを熟達させることができ、楽曲の構造について考えて聴くようになった。実験結果より異なるパート間の関連性を把握する色付け楽譜の生成が可能であることを示し、スコアリーディング支援を実現できることを示した。

ScoreIlluminator: A Score Reading Support System for Orchestral Scores by Illumination

MASAKI MATSUBARA,^{†1} HIROYUKI OKAMOTO,^{†1}
TOMOHISA SANO,^{†1} HIROYA SUSUKI,^{†1}
SHIHO HOSHI NOBESAWA^{†2} and HIROAKI SAITO^{†1}

For orchestral players, the score reading skill is required for better understanding of the musical structure of the orchestral scores which consist of many instrumental parts. We expect that an intuitive part clustering system for orchestral scores should be an efficient support for beginners to understand complicated orchestral scores. Thus we propose an automatic and intuitive system for score illumination according to part clustering of the orchestral scores. Our

system illuminates each cluster of parts according to its role. The colors show the roles and the relations between parts clearly and it increases the readability of the orchestral scores. Our system estimates the parts' similarity with four simple features based on rhythmic activity, sonic richness, melodic activity and consonance activity. Clustering phase is based on an unsupervised learning algorithm (k-means algorithm). Our system provides an easy interface for users to try various parameter settings and see the change in illuminating results, which enables users to learn the role of parts and the relationship between parts. Empirical results showed the possibility of automatic score illumination according to the role of parts, which can be expected to be a support for music lovers.

1. はじめに

オーケストラや吹奏楽など大編成のために作曲された楽曲は、多数のパートがそれぞれの楽譜を演奏することで1つの音楽を構築する。各々のパートの楽譜を記した譜面をパート譜、すべてのパートの楽譜を記した譜面をスコア^{*1}と呼ぶ。スコアは通常、指揮者が演奏の指揮を行う際にすべてのパートの動きを把握するために用いられる。スコアを読むことをスコアリーディングと呼び、作曲家、指揮者には必須のスキルである。そのうえ、練習のために誰かが指揮者の代わりに務める場合や、各楽器の奏者が同類の音型の担当楽器を認識する場合など、演奏者にとっても様々な用途でスコアを参照することが多く、スコアリーディングのスキルが重要となる。ところが、スコアにはすべてのパートの譜面が記載されているため、ほとんどが10段を超える形式であり、判読性に欠けるという問題点がある。そのため、熟達した者でないと、一見しただけでは、曲の和声や拍節構造、どのパートとどのパートが同類の音型を担当しているか、といった必要な情報を読み取ることが難しい。実際、楽譜（パート譜）を読むことができてもスコアを読むことができない演奏者は多く存在する。したがってオーケストラや吹奏楽の現場では演奏者がスコアリーディングに慣れないうちはスコアに色付けをするなどして目印を付けることでスコアの可読性を高め理解を深めることも少なくない。図1(b)はその一例で、自分が担当するパートやメロディを担当するパー

^{†1} 慶應義塾大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Technology, Keio University

^{†2} 東京都大学知識工学部情報科学科

Department of Computer Science, Faculty of Knowledge Engineering, Tokyo City University

*1 総譜またはフルスコアともいう。

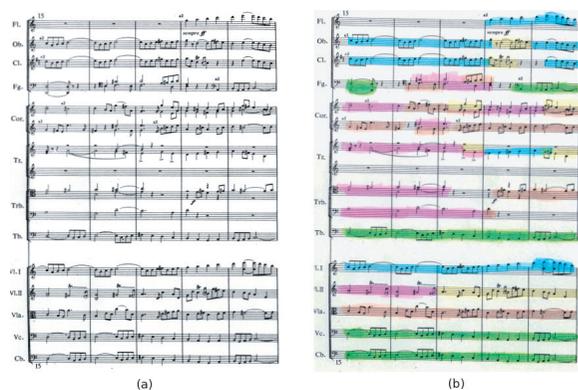


図 1 オーケストラスコアとスコア色付けの例

Fig.1 Example of an orchestral score and a colored score by player.

トを中心に関連性の高い音型を担当するパートに色を付けている。しかし、この色付けも合奏経験や音楽的知識を要するため容易ではない。

このような問題を解決するため、本稿では、異なるパートの似た役割を持つフレーズをクラスタリングし、各クラスタに異なる色を割り当てて楽譜上着色する手法と、音楽を再生しながら色付け楽譜を見ることで異なるパート間の関連性を把握しやすくするインタフェースを提案する。また色の付け方をユーザとのインタラクションによって変化させることで、ユーザが望むように様々な切り口で楽譜を見ることができるようになり、異なるパート間の関連性を意識しながら楽曲を聴くようになっていく。本システムは合奏経験がない人や楽譜が読めない人に対しても効果があるだけでなく、多少の合奏経験や音楽的知識がある演奏者にとっては同類の音型を担当する楽器の認識、メロディラインの受け渡しの理解、楽曲構造の把握など、様々なユーザを対象にスコアリーディングの支援が可能になる。

2. 関連研究

音楽の可視化に関しては大量の楽曲群の分布表現、ブラウジング、楽曲推薦などを目的として、これまで多くの手法が提案されてきた。大別すると楽曲群に対する可視化^{1)–6)}、楽曲に対する可視化^{7),8)}、iTunes や Windows Media Player に代表されるような Visual Effect など楽曲のある瞬間に対する可視化の 3 つに分けることができる。いずれの手法も対象範囲の大きさの違いを除けば、高次元の音楽情報を二次元か三次元空間内に、類似した音楽内

容を持つ要素が互いに近くなるように配置するものである。本手法も似た役割を持つフレーズをクラスタリングしている点で共通しているといえる。

一方で音符に色を付ける可視化によって楽譜の理解を促進させる手法や表現が提案されている^{9)–13)}。またスコアの判読性に欠ける問題を解決するために可読性の向上や理解支援の研究がなされている。遠山らはパート間のリズム構造を特徴量に用い、スコアを要約し、コンデンススコアの生成を行っている¹⁴⁾。また渡邊らによって提案された BRASS¹⁵⁾ はスコア全体の効果的な表示方法を可能にしている。BRASS が横軸（時間軸）のスコア圧縮を目的とするのに対し、本手法は遠山らの研究と同様に縦軸（パート軸）方向のスコア圧縮や表示方法の変換によるページごとの可読性を向上させるものである。

本稿では楽曲の可視化手法として楽譜を用いる。本来楽譜という表現は、関連研究のような二次元や三次元空間に写像されている色や大きさ、形といった可視化手法よりも、音符が時系列（左側から右側）に並びそれぞれの音符どうしが構造を持っていることからより高度な情報を含んでいるが、1章で述べたようにスコアの場合は判読性の低さからその情報が伝わりにくい。そこで楽譜中の似た役割を持つパートに同じ色付けを行うことで、音符どうしの構造が把握しやすくなり判読性が高まるメリットがある。また音符が読めない人間にとっても楽譜が持つ表面上（見た目）の情報、すなわち色付けによって構造化された音符の動きを時系列（左側から右側）に視覚的に理解することができ、音楽を聴いたときに視覚と聴覚の結び付きが生まれやすいといえる（例：ある 2 つのパートに同じ色付けがなされているとき、それぞれのパートを見ると黒玉の音符が並んでいて動きが激しいことが分かる。また時間軸（右）方向に見ると途中で別のパートが合流することが色付けにより分かる）。またスコア全体は読めないがパート譜は読める人間にとっても、音符を見ることで色付けによる構造化の理由を分析でき、スコアリーディングの熟達が可能である。つまり音楽プレーヤの Visual Effect のような情報量を極端に落とす可視化手法に比べて、楽譜に色付けすることは音楽的情報を維持する効率の良い可視化手法といえる。

また本手法では音楽を一意に可視化してしまうのではなくユーザとのインタラクションにより可視化結果が変わっていくことがメリットであることも強調しておく。これは最善の解が分かっている場合は正解を一意に可視化する方法¹⁶⁾で支援できることが知られているが、音楽の解釈のように正解が一意に定まらない場合や、正解が分かっている場合、正解が正しく推定できない場合は可視化結果をユーザが修正できるようにする方法^{17),18)}により支援できることが知られている。

3. 提案手法

本章では、提案手法の理論的背景およびアルゴリズムについて述べる。

3.1 理論的背景

本稿の研究課題は、スコアの可読性を向上させる色付け楽譜をどのように生成するかである。一般に、人間がオーケストラスコアを色付けする状況は (1) メロディを担当しているパートと伴奏を担当しているパートなどの役割を区別する場合 (2) 同じ役割を持つパートを認識する場合などが考えられる。似た役割を持つフレーズをクラスタリングすることでパート間の役割を区別することができ、各クラスタに異なる色を割り当てることでスコアの色付けが実現可能である。したがってスコアの色付けはパート間のクラスタリングを行うタスクに帰着することができる。パート間の距離、すなわちフレーズの類似度や非類似度に関する研究として Earth Mover's Distance を用いる手法¹⁹⁾ や Inner Metric Analysis を用いる手法²⁰⁾、既存の音楽理論²¹⁾ を用いる手法²²⁾ があるが、本提案手法では人間による手作業での色付け方法に着目することで、パート間の非類似度を提案する。人間が似ているパートどうしに色を割り当てる場合は、スコアに記述されている音符から、主に発音のタイミング、音の響き方、主題や動機などの音型、和声を考慮して考えることが多い。そのため本稿でも楽譜情報を用いるが、主題や動機のフレーズを見つけることや和声解析を行うことは複雑な問題であるため、和声解析やフレーズの検出に関しては近似して比較的単純な方法でパート間の距離を定義する。

3.2 色付け手法アルゴリズム

3.1 節で述べたとおり、スコアの色付けはパート間のクラスタリングを行うタスクと見換えることができ、色付け手法のアルゴリズムを下記のように定義する。

- (1) クラスタ数 K 、フレーズの長さ L 、小節番号の開始 S と終わり E を入力とする。 $N \leftarrow S$ とする。
- (2) N 小節から $N + L$ 小節までの各パートの音符データを取り出す。
- (3) 取り出した各パートの音符データに対し 3.3 節で定義するパート間の距離を用いて k-means アルゴリズムによってクラスタ数 K のパート間クラスタリングを行い、その結果を記憶する。
- (4) 出力されたクラスタリング結果と 1 つ前に行ったクラスタリング結果を比較し、共通する要素が多いものを同じクラスタとしてラベル付けを行う。
- (5) $N \leftarrow N + L$ とする。 $N \leq E$ であればステップ (2) に戻る。

(6) 得られたラベルをもとに楽譜の色付けを行う。

なお、k-means アルゴリズムにおける初期値は 1 つ前のクラスタ結果を用い、初回のみランダム種を用いる。またこのアルゴリズムを実行する前に MIDI や MusicXML などの楽譜情報から、拍子、パートの数、音符の音高・音長・タイミングを抽出しておく。

3.3 距離の定義

k-means クラスタリングに必要なパート間の距離として、2 つのパート i と j の距離 $D(i, j)$ を式 (1) で定義する。

$$D(i, j) = w_1 D_{RA}(i, j) + w_2 D_{SR}(i, j) + w_3 D_{MA}(i, j) + w_4 D_{CA}(i, j) \quad (1)$$

距離が 0 に近ければ近いほどパートどうしは一致している。ここで w_k ($k=1, 2, 3, 4$) は各特徴量の重み係数である。4 つの特徴量は Rhythmic Activity, Sonic Richness, Melodic Activity, Consonance Activity である。この 4 つの特徴量は 3.1 節で述べたように、オーケストラにおけるフレーズどうしを比較するうえで重要なリズム・響き (楽器の種類)・メロディ・和声の要素をそれぞれ表現したものである。

3.3.1 拍節構造行列

4 つの特徴量はフレーズ内の音符 1 つ 1 つに対する数値への変換であるため拍節構造を考慮していないが、通常フレーズどうしを比較するときには強拍の音符における類似度を重視することが多い^{21), 23)–25)}。そこで、4 つの特徴量の定義に先立って拍節構造を考慮するために Maidín の手法²³⁾ を用い拍節構造行列 M を定義する。表 1 に 2/2, 3/4, 4/4 拍子における重み付けの例を示す。

特徴量のベクトルと演算可能にするため、対角成分が重みになるような $n \times n$ の正方行列 M を作成する。 n は 1 小節分の長さを一番短い音符の長さで割った比であり、楽譜情報

表 1 拍節構造の重み付け (2/2 拍子, 3/4 拍子, 4/4 拍子)
Table 1 Stress weights in 2/2, 3/4 and 4/4 metre.

(a)		(b)		(c)	
頭拍からの距離	重み	頭拍からの距離	重み	頭拍からの距離	重み
0	3	0	3	0	4
1/2	2	1/4	2	1/4	2
その他	1	2/4	2	2/4	3
		その他	1	3/4	2
				その他	1

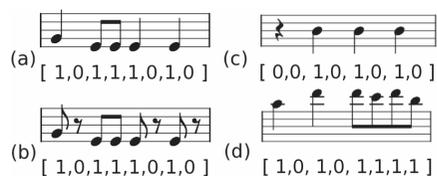


図2 Rhythmic Activity の特徴ベクトル
Fig. 2 Rhythmic Activity feature vectors.

から自動的に抽出される．たとえば，4/4 拍子の楽曲で一番短い音符が 8 分音符のときの正
方形行列 M は $n = 1/4 \times 4 \div 1/8 = 8$ の 8 次の対角行列となる (式 (2))．

$$M = \text{diag}(4, 1, 2, 1, 3, 1, 2, 1) = \begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

3.3.2 Rhythmic Activity

Rhythmic Activity はフレーズにおけるリズムの特徴量である．図 2 (a), (b) に示すよ
うにリズムが似ていて休符が混じったフレーズを同じフレーズとして認識することができ
る．図 2 (c), (d) のような使用している音符は似ていてもリズムが違う音形を区別するこ
とができる．一番短い音符の長さを基本単位として，単位時間ごとに音符が発音されたタイミ
ングである場合を 1，それ以外を 0 とした n 次元ベクトル RA を作成する (式 (3))．

$$RA = [ra_1, ra_2, \dots, ra_n] \quad (3)$$

$$ra_i = \begin{cases} 1 & \text{if attacked at } i\text{-th unit time} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

この特徴量を用いたパート i と j の距離 $D_{RA}(i, j)$ を式 (4) で定義する．

$$D_{RA}(i, j) = 1 - \cos(RA_i \cdot M, RA_j \cdot M) \quad (4)$$

ここで $\cos(v_1, v_2)$ はコサイン類似度である (式 (5))．

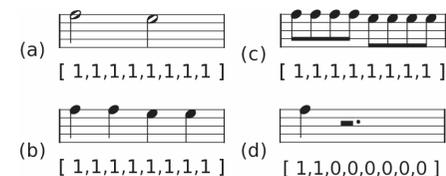


図3 Sonic Richness の特徴ベクトル
Fig. 3 Sonic Richness feature vectors.

$$\cos(v_1, v_2) = \frac{v_1 \cdot v_2}{|v_1| |v_2|} \quad (5)$$

3.3.3 Sonic Richness

Sonic Richness はフレーズにおける響きの豊かさの特徴量である．響きの豊かさを考慮
することによって，楽器の種類の違いを認識できるようになる．図 3 (a), (b), (c) で示す
ように長い音符を持つフレーズに対して分割した細かい音符を持つフレーズとの対応や，管
楽器の延ばしを含むフレーズと弦楽器・打楽器の刻みを含むフレーズの対応などが同じフ
レーズとして認識することができる．図 3 (d) のように休符を含む音形を区別するこ
とができる．単位時間ごとに音が鳴っている場合を 1，鳴っていない場合を 0 とした n 次元ベ
クトル SR を作成する (式 (6))．

$$SR = [sr_1, sr_2, \dots, sr_n] \quad (6)$$

$$sr_i = \begin{cases} 1 & \text{if sounded on } i\text{-th unit time} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

この特徴量を用いたパート i と j の距離 $D_{SR}(i, j)$ を式 (7) で定義する．

$$D_{SR}(i, j) = 1 - \cos(SR_i \cdot M, SR_j \cdot M) \quad (7)$$

3.3.4 Melodic Activity

Melodic Activity はフレーズにおけるメロディの特徴量である．旋律の多くは音高の上
下があることが多いため，動きの少ない伴奏パートと旋律パートを別のフレーズとして扱う
ことが多く，また図 4 (a), (b) で示すように，旋律と似た動きをした和声付けのための旋律
を同じフレーズとして扱うことが多い．そこで図 4 に示すように単位時間ごとに音符と音
符の間に遷移について前の音符の高さよりも高い場合を 1，同じ場合を 0，下がった場合を
-1 とした $n-1$ 次元ベクトル MA を作成する (式 (8))．なお図 4 (c), (d) で示すように，

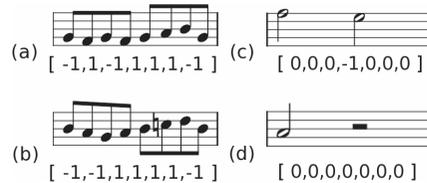


図 4 Melodic Activity の特徴ベクトル
Fig. 4 Melodic Activity feature vectors.

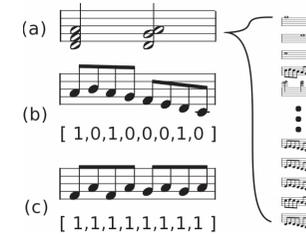


図 5 Consonance Activity の特徴ベクトル
Fig. 5 Consonance Activity feature vectors.

音符をのばしている間や休符は音符の高さが変わっていないとして扱う。

$$MA = [ma_1, ma_2, \dots, ma_{n-1}] \quad (8)$$

$$ma_i = \begin{cases} 1 & \text{if pitch on } i\text{-th unit time is higher than the previous} \\ 0 & \text{equivalent} \\ -1 & \text{lower} \end{cases}$$

この特徴量を用いたパート i と j の距離 $D_{MA}(i, j)$ を式 (9)^{*1} で定義する。

$$D_{MA}(i, j) = 1 - |\cos(MA_i, MA_j)| \quad (9)$$

3.3.5 Consonance Activity

Consonance Activity はフレーズにおける和声の特徴量である。図 5 (b), (c) のように音高の動きがあっても旋律パートのように非和音を多く含むパートと伴奏パートのように和音を多く含むパートを別のフレーズとして認識することが多い。そこで図 5 (a) に示すように単位時間ごとに全パートが鳴らしている上位 3 つの音を求め、近似的な和声音とする。そして、単位時間ごとに和声音を含む場合を 1、含まない場合を 0 とした n 次元ベクトル CA を作成する (式 (10))。

$$CA = [ca_1, ca_2, \dots, ca_n] \quad (10)$$

$$ca_i = \begin{cases} 1 & \text{if note on } i\text{-th unit time is consonant} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

この特徴量を用いたパート i と j の距離 $D_{CA}(i, j)$ を式 (11) で定義する。

$$D_{CA}(i, j) = 1 - \cos(CA_i \cdot M, CA_j \cdot M) \quad (11)$$

4. インタフェース

3 章の色付け楽譜生成手法を用いてスコアリーディング支援 Web インタフェース ScoreIlluminator を実装した。図 6 に表示画面例を示す。ScoreIlluminator のユーザはシステムによって生成された色付き楽譜を見ながら音楽を聴くことができる。またユーザは GUI によるインタラクション操作によって様々な条件で楽譜を生成し表示させることができる。表示画面例は大きく 4 つの部分からなる。以下に説明を示す。

色付け楽譜の生成 システムが生成した色付き楽譜 (図 6 : (A)) を表示する。ユーザは左上の空欄にページ数を入力することで任意のページの楽譜を見ることができる。また楽曲は右側中央 (図 6 : (F)) のプルダウンメニューで楽譜情報を抽出してある楽曲リストから選ぶことができる。色付け楽譜の生成は後述の色の指定やパラメータの調整を行った後、`generate` ボタンで生成する (図 6 : (E))。生成はユーザとのインタラクションが継続的に行われるよう待ち時間がなく、即時的に行われる。

色の数と色の指定 `+` `-` ボタンを押すことにより色付けをする数 K を 2 色から 5 色まで変化させることができる。また色の部分をクリックするとカラーピッカーがポップアップで表示されるのでそこから好きな色を選択することができる (図 6 : (D))。

楽曲の再生と譜めくり ユーザは GUI の再生ボタン `▶` を押すことにより、表示箇所からの音楽 (MIDI) を聴くことができる。また停止ボタン `■` により再生音楽を停止することができる (図 6 : (C))。また `prev` や `next` ボタンを押すことにより楽譜の譜めくりを行うことができる (図 6 : (B))。

*1 コサイン類似度のとりうる値が $-1 \sim 1$ なので絶対値を付ける。

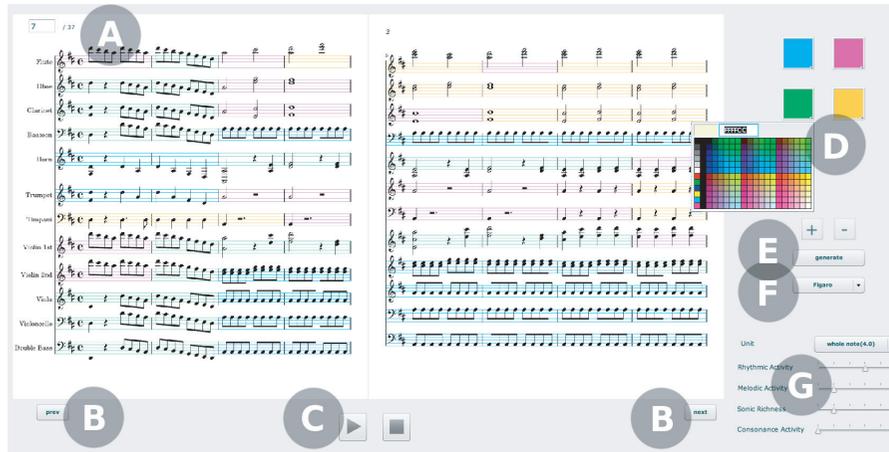


図 6 ScoreIlluminator の表示画面例
Fig. 6 An interface of ScoreIlluminator.

色付けパラメータ調整 楽譜の色付けを行うためのクラスタリングの距離尺度に用いている 4 つのパラメータ (Rhythmic Activity, Sonic Richness, Melodic Activity, Consonance Activity) を、ユーザは GUI のスライダを直接操作することで、それぞれのパラメータの重み付け w_k ($k = 1, 2, 3, 4$) を変化させることができる。また色付けを行うフレーズの長さ L を Unit のリストから 0.5, 1, 2, 4, 8 拍分まで選択することができる (図 6 : ©)。

本インタフェースを用いた繰り返し操作によるメリットは、たとえばメロディとそれ以外の動きに着目して音楽を聴こうとした場合、Melodic Activity の重み付けを増やして 2 色に色付けをすることでメロディとそれ以外に分かれた色付き楽譜が生成され、ユーザは音楽の概形が分かりメロディとそれ以外を聴き分けることができる。そして、より詳しく聴きたいと思った場合はクラスタの数を増やし、色付き楽譜を見ながら聴くことでより多くの音が聴こえてくるようになりスコアリーディングができるようになる。このようなスライダなどを用いたインタラクションの繰り返しは初学者のメタ認知を促すことが知られている^{26),27)}。すなわち、この場合、システムを繰り返し使い続けていくうちにユーザ自身がスコアリーディングや音楽の聴き方について考えるようになり、より様々な操作を試すようになることで好循環が生まれる。一方的に受け身で音楽を聴くのではなく、聴衆者自らが音楽に対して

操作をして聴いていくという流れは近年数多く提唱されている能動的音楽鑑賞インタフェース²⁸⁾と同様であるといえる。

またこのツールの注目すべきところとしてシステムが出力した楽譜を一意的正解としてユーザに与えるのではなく、ユーザとのインタラクションによって色付け楽譜を生成する点にある。そのためなぜこのような色付けがなされたのかということやその色自体にメロディや伴奏であるといった意味付けはシステム側から提示することはない。ユーザが本システムを繰り返し使用し考えていくことで音楽を聴く際の新たな変数に気づくことができ、音を聴き分ける能力や一部のスコアリーディング能力の熟達が可能であると考えられる。この考え方は他の分野における支援ツール^{17),18)}ですでに有効性が示されている。

5. 実験結果

本章では、ScoreIlluminator の有効性を評価するための色付け楽譜生成実験と被験者を用いた主観評価による実験について報告する。

5.1 実験条件

入力となる実験データとして拍子、パート、音高、長さ、タイミングが記述された楽譜データを用意する。表 2 は実験に使用した楽曲を示す。使用楽曲は一般によく演奏されるオーケストラの楽曲から拍子やパート数を考慮して決定した。管楽器などは 2 パートで 1 段の表記になっているが、今回はまとめて 1 パートとして数えた。実験曲に対し、4 章で述べたインタフェースをもとにパラメータを変えながらクラスタリングを行い、得られたクラスタのラベルをもとに GNU Lilypond^{*1}を用いて色付けをし楽譜出力を行った。

5.2 楽譜生成実験

重み係数は経験則的に選び、「フィガロの結婚」序曲 (以降、フィガロ) は重み係数 w を $w_k = \{0.4, 0.2, 0.2, 0.2\}$ とし、「プラハ」第 3 楽章 (以降、プラハ) に関しては重み係数 w を $w_k = \{0.5, 0.1, 0.1, 0.3\}$ とした。またフィガロのパート構成は上段から順番にフルート、オーボエ、クラリネット、ファゴット、ホルン、トランペット、ティンパニ、第 1 ヴァイオリン、第 2 ヴァイオリン、ヴィオラ、チェロ、コントラバスの計 12 パートである。いずれも $L = 1$ すなわち、1 小節を 1 フレーズとして 1 小節目から順番に最後の小節までクラスタリングを行った場合の結果を示す。

図 7 ~ 図 10 に示すように提案手法によって色付けされた楽譜が生成された。図 7 では上

*1 <http://lilypond.org/>

表 2 実験に用いた楽曲
Table 2 Music pieces for experiment.

作曲者	曲名	拍子	小節数	パート数
モーツァルト	歌劇「フィガロの結婚」序曲 K.492	4/4	298	12
モーツァルト	交響曲第 38 番二長調 K.504「プラハ」第 3 楽章	2/4	350	11



図 7 生成した色付け楽譜 (フィガロ, 8~12 小節, $K = 4, L = 1$)
Fig. 7 An illuminated score (Figaro, bar 8-12, $K = 4, L = 1$).

段部でフルートとクラリネットおよびオーボエとホルンのメロディ受け渡しが行われているのが分かる。さらに色付けにより、オーボエとホルンのメロディに合わせて、ファゴット、ヴィオラ、コントラバスが小節の頭打ちをしていることが示されている。本来ならば自分がその楽器を担当していなければ見落としがちな点である。

また図 8 の 2 つは同じ小節を違うクラスタ数で生成した色付け楽譜である。 $K = 3$ のときにメロディとリズムとハーモニの役割に分かれ、色の数を増やして $K = 4$ としたときに第 1 ヴァイオリン (水色) のパートが動きのある旋律として分かれていることが分かる。また図 9 は $K = 2$ と少ないクラスタの数で色付けした結果を示している。これらの結果を見ると分かる通り、メロディを受け持つパートとそれ以外で綺麗に色付けがなされている。ここではほとんどのパートのリズムが同じであるが、上昇や下降音型のパート (1~3 小節



図 8 生成した色付け楽譜 (フィガロ, 12~17 小節, $K = 3, 4, L = 1$)
Fig. 8 Illuminated scores (Figaro, bar 12-17, $K = 3, 4, L = 1$).

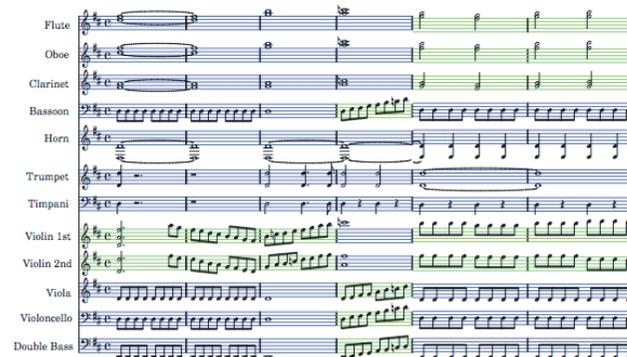


図 9 生成した色付け楽譜 (フィガロ, 39~44 小節, $K = 2, L = 1$)
Fig. 9 An illuminated score (Figaro, bar 39-44, $K = 2, L = 1$).

目はヴァイオリン, 4 小節目はヴィオラ, チェロ, コントラバス, ファゴット) (緑色) が旋律の役割を担っていることが色分けされ, Melodic Activity の特徴量が有効に利用されていることを示している。最後に, 図 10 は $K = 3$ でプラハを用いた実験結果を示しているが, 曲が変わっても旋律 (緑色) と伴奏 (黄色) とその和声 (青色) というように役割ごとに色分けされていることが分かる。

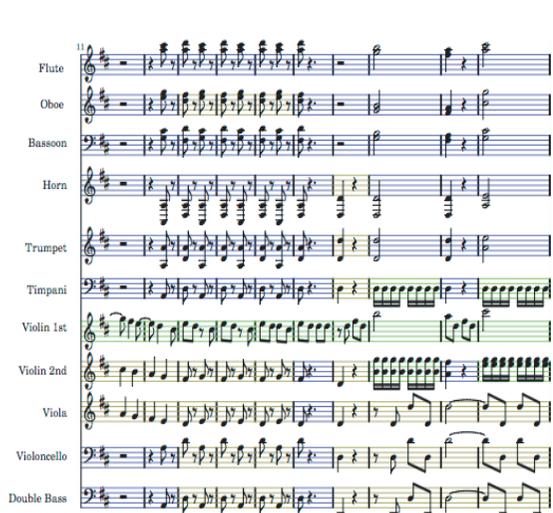


図 10 生成した色付け楽譜 (プラハ, 11~20 小節, $K = 3, L = 1$)
Fig. 10 An illuminated score (Prague, bar 11-20, $K = 3, L = 1$).

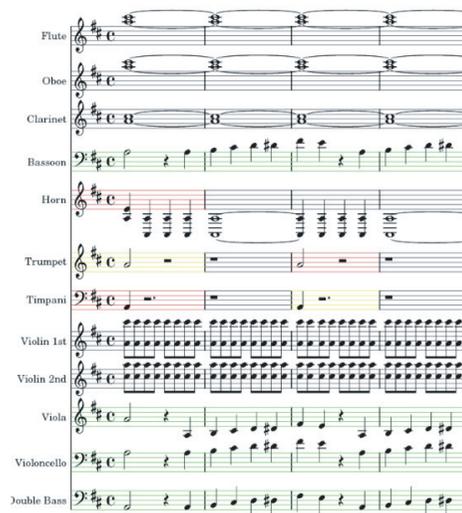


図 11 生成した色付け楽譜 (フィガロ, 86~89 小節, $K = 4, L = 1$)
Fig. 11 An illuminated score (Figaro, bar 86-89, $K = 4, L = 1$).



図 12 生成した色付け楽譜 (フィガロ, 90~93 小節, $K = 4, L = 1$)
Fig. 12 An illuminated score (Figaro, bar 90-93, $K = 4, L = 1$).

以上の実験結果をふまえると, 比較的単純な特徴量を用いたにもかかわらず, 提案手法は妥当な色付け結果を示すことができ, スコアリーディングの支援が可能であるといえる.

5.3 被験者による評価実験

スコアリーディングが熟達したかどうかを本稿では被験者の気づきをもとに評価した. 被験者にはあらかじめシステムの操作方法を説明し, 4 つの特徴量についてはそれぞれリズム, 楽器, メロディ, 音響, 和声の特徴量であるだけ伝え, システムがどのように色付け楽譜を生成しているかは説明しなかった. 気づきの抽出にはプロトコル分析法を用いた. すなわち, 被験者には感じたことの発言を積極的にしながら操作することを促し, 操作の様子をビデオカメラで録画し, 操作終了後, 撮影した映像を見ながら時系列に沿ってどのようなことを考えたかを聞き取った.

被験者 A

被験者 A は音楽演奏経験のない聴取者である. これまで一番高い音しか知覚できなかった被験者は 2 回目の使用時に変化が見られるようになった. 最初は図 9 のように Melodic Activity だけを重視して $K = 2$ の場合の楽譜を見てメロディがどこにあるのかを着目して聴くようになり, 低音のメロディを聴き分けられるようになった. そして, しばらく K の値

を変化させながら曲を聴いており, 3 色以上の場合でも低音の動きを認識できるようになった. たとえば図 11 のような色付け楽譜を生成し, 低音の動き (緑色) を意識して聴いていたが, 図 12 のような楽譜を生成した際に最後の小節の緑色について役割について考察していた. いくつかのパラメータを変えて同じ小節の部分の色付け楽譜を生成していたが, 結局その日のうちには色付けに関する疑問は解決しなかった. 実験はここまでとなっているが, 考えてスコアを見るようになり, 考えて聴くようになったので, 今後とも継続していくことでスコアリーディング能力が熟達していくに違いない.

被験者 B

被験者 B は 18 年ヴァイオリンを演奏してきたことのある経験者である. ただしオーケストラ演奏の経験は浅くスコアを読むことに慣れていない. 普段からメロディばかりを演奏しているためスコアは読む際, メロディを追って音楽を聴くことが多い. この被験者が 3 カ月の間にシステムを 4 回使ったときの様子を示す. 最初は図 13 のように Melodic Activity を重視して見るスコアの色付けが自然に感じていた. それは横軸方向の色の変化があまりない楽譜である. この被験者にとってはメロディを奏しているフレーズが重要でスコアの色付けが途中で変わることに違和感を覚えたようである. しかし, しばらくして他の特徴量のみ

Flute
Oboe
Clarinet
Bassoon
Horn
Trumpet
Timpani
Violin 1st
Violin 2nd
Viola
Violoncello
Double Bass

図 13 生成した色付け楽譜 (フィガロ, 13~16 小節, $K = 5, L = 1$)
Fig. 13 An illuminated score (Figaro, bar 13-16, $K = 5, L = 1$).

Flute
Oboe
Clarinet
Bassoon
Horn
Trumpet
Timpani
Violin 1st
Violin 2nd
Viola
Violoncello
Double Bass

図 14 生成した色付け楽譜 (フィガロ, 49~52 小節, $K = 5, L = 1$)
Fig. 14 An illuminated score (Figaro, bar 49-52, $K = 5, L = 1$).

Flute
Oboe
Clarinet
Bassoon
Horn
Trumpet
Timpani
Violin 1st
Violin 2nd
Viola
Violoncello
Double Bass

図 15 生成した色付け楽譜 (フィガロ, 37~40 小節, $K = 5, L = 1$)
Fig. 15 An illuminated score (Figaro, bar 37-40, $K = 5, L = 1$).

を使った色付けを試すようになり、スコアにはリズムで見える方法もあるということを理解した。すなわち、図 14 のように単位時間あたりにおける各パートの役割について考えるようになった。この場合は 1 小節ごとにおいて同じ色どうし(たとえば赤なら赤どうし)のパートには関連性があることが認識できる。従来のフレーズを重視した方法では時間軸方向に進むにつれ同じパートにおいて色が頻繁に変化するところがあるため不自然と感じていたのだが、4 回目の実験のときに気づくことができ、被験者自身もその変化に驚いていた。

被験者 C

被験者 C は 15 年チェロを演奏してきたことのあるオーケストラ奏者である。スコアに関しては自分のパートを中心に読むことができる。通常メロディを演奏することが多い経験からもメロディを中心にスコアを読むことが多いが、同時に伴奏を演奏する機会も多いので、リズム中心にスコアを読むこともできる。この被験者には 1 カ月の間にシステムを 2 回使ってもらった。最初から 4 つの特徴量のパラメータを変化させながらスコアを見て、その色付けの理由を考えながら音楽を聴いていた。そして、リズムやメロディ中心に色付けする方法が自然であると感じたのに対し、Consonance Activity を重視した色付け楽譜を生成したところで変化が見られた。たとえば図 15 のように一見フレーズを中心に色付けた楽譜に見え

るが、上から 3 段目のクラリネットの色だけが、上 2 段のフルート・オーボエと違う。本来であれば、リズムから同じ役割と見なすことが多いが、構成音が違うということをはっきりと見て分かるようになった。これにより、他のパートが和音のうちどの音を演奏しているかを意識して見るようになり、細かい差を聴き分けることができるようになった。

6. 考 察

実験結果と被験者実験により提案手法の有用性が示された。それは提案手法が定義した 4 つの特徴量が音楽の 3 要素であるリズム、旋律、和声を考慮していたことや、楽器の違いによる響きの特徴量、拍の重要さを考慮した拍節構造行列が合奏における役割を表現するのに適したものであったからだと考えられる。

曲にはフレーズと呼ばれる音のつながりの単位が存在するが、今回の実験のうち $L = 1$ 、すなわち 1 小節を 1 フレーズとした実験では異なるフレーズ(たとえば、メロディと伴奏)があるタイミングで同じ長さの同じ音を演奏している場合、これらの音をまとめてしまうと、フレーズが分断され、スコアの可読性が低下してしまうといった点がいくつか見受けられた。したがってパート間のマッチングは、ある程度の時間単位をもって行う必要がある

図 16 生成した色付け楽譜 (プラハ, 11~20 小節, $K = 3$, $L = 2$)
 Fig. 16 An illuminated score (Prague, bar 11-20, $K = 3$, $L = 2$).

といえる。しかし、単純にフレーズの長さを長くすれば良いというわけではなく、長くするとそれだけフレーズの境界を超える可能性が高くなり、その結果クラスタ数が増え逆に可読性が低下してしまうことになりかねない。フレーズの長さとはクラスタ数はトレードオフの関係にあるので、フレーズの境界を正しく推定することは難しい。そこで図 10 の部分を図 16 のように $L = 2$ とすることで、可読性を下げずに色分けが実現できた (赤丸で囲った部分)。これはユーザのインタラクション操作が可能であることの利点である。

また被験者実験により本提案インタフェースの有効性が示された。インタラクション操作を繰り返し使用していくことで、本インタフェースが被験者のメタ認知を促進させ、今までと違った音楽の聴き方やスコアリーディングの能力を引き出したことが分かった。

本研究における今後の展望として、まず色付け手法については本稿では 4 つの特徴量を定義したが、3 章で述べたように Earth Mover's Distance を用いたメロディの類似度¹⁹⁾ などその他のフレーズの類似度について検討することが考えられる。また楽譜データから得ることのできる強弱記号あるいは音の強さについてもあらたな特徴量として取り入れるべきだろう。特徴量の数を増やし、機械学習によって重みのパラメータを学習していき、重要度

が高い特徴量を見つけ出し、色付けをするという手法も考えられる。今後は比較実験を行い特徴量の有効性を検証して色付けの妥当性を向上させる予定である。

インタフェースについては楽譜と楽曲の音源を同期させる方法^{13),29)} を利用することで、MIDI ではなく実際の演奏録音源を元に再生でき、色付け楽譜と同期した自動譜めくりを実現することもできる。

また本稿が提案する色付け手法を応用することで、クラスタリング結果から同じ色が同じ役割ということを利用して、楽譜ではなく実際のオーケストラに対して色付きのスポットライトをそれぞれのパートに照らすことで、同じ役割をしているパートを視覚的に表現するインスタレーションが適用可能である。ただし照らし方を動的に変化させるためには実音楽との同期がとれるようにする必要がある。また他の応用例としては、同色のパートを簡約化することでピアノリダクション自動編曲³⁰⁾ やコンデンススコア自動生成¹⁴⁾ なども実現可能である。

7. おわりに

本稿ではスコアリーディングを支援する Web インタフェース ScoreIlluminator およびオーケストラスコアの色付け手法について述べた。色付けは異なるパートの似た役割を持つフレーズをクラスタリングし、各クラスタに異なる色を割り当てて楽譜上に着色することで実現した。クラスタリングのための距離は合奏において重視すべき、リズム、音の響き、メロディ、和声をもとに 4 つの特徴量を定義し、その有効性を示した。また、色付けによるパート間の関連性の可視化手法と、インタラクティブな操作性を持ったインタフェースを提案することで、ユーザが楽曲の構造について考えて聴くことができるようになり、スコアリーディングを熟達させることができることを示した。本研究の知見から、音楽の傾聴時における人間の認識や多声部楽曲におけるフレーズの類似度、本システムを用いた教育方法といった、認知科学や音楽学、音楽教育の分野へ研究が広がることを期待する。

参考文献

- 1) Pampalk, E., Dixon, S. and Widmer, G.: Exploring Music Collections by Browsing Different Views, *4th International Conference on Music Information Retrieval*, pp.49-62 (2003).
- 2) Torrens, M., Hertzog, P. and Arcos, J.: Visualizing and Exploring Personal Music Libraries, *5th International Conference on Music Information Retrieval*, pp.421-424 (2004).

- 3) Neumayer, R., Dittenbach, M. and Rauber, A.: PlaySOM and PocketSOMPlayer: Alternative Interfaces to Large Music Collections, *6th International Conference on Music Information Retrieval*, pp.618–623 (2005).
- 4) Mayer, R., Lidy, T. and Rauber, A.: The Map of Mozart, *7th International Conference on Music Information Retrieval*, pp.351–352 (2006).
- 5) Leitich, S. and Topf, M.: Globe of Music: Music Library Visualization Using GEO-SOM, *8th International Conference on Music Information Retrieval*, pp.167–170 (2007).
- 6) Lamere, P. and Eck, D.: Using 3D Visualizations to Explore and Discover Music, *8th International Conference on Music Information Retrieval*, pp.173–174 (2007).
- 7) Goto, M. and Goto, T.: Musiccream: New Music Playback Interface for Streaming, Sticking, Sorting, and Recalling Musical Pieces, *6th International Conference on Music Information Retrieval*, pp.404–411 (2005).
- 8) Yoshii, K. and Goto, M.: Music Thumbnailer: Visualizing Musical Pieces in Thumbnail Images Based on Acoustic Features, *9th International Conference on Music Information Retrieval*, pp.210–216 (2008).
- 9) Kamada, M.: *Musical Scores with Colored Notes: Bach's Three Part Inventions*, ACORDO Coporation (2007).
- 10) Lubar, K.: Color Intervals: Applying Concepts of Musical Consonance and Dissonance to Color, *Leonardo*, Vol.37, No.2, pp.127–132 (2004).
- 11) Poast, M.: Color Music: Visual Color Notation for Musical Expression, *Leonardo*, Vol.33, No.3, pp.215–221 (2000).
- 12) Rogers, G.L.: Effect of Colored Rhythmic Notation on Music-Reading Skills of Elementary Students, *Journal of Research in Music Education*, Vol.44, No.1, p.17 (1996).
- 13) Kurth, F., Müller, M., Fremerey, C., Chang, Y. and Clausen, M.: Automated Synchronization of Scanned Sheet Music with Audio Recordings, *8th International Conference on Music Information Retrieval*, pp.261–266 (2007).
- 14) 遠山紀子, 松原正樹, 斎藤博昭: リズム特性を用いたコンデンススコア自動生成手法の提案, 情報処理学会音楽情報科学研究会研究報告 2007-MUS-69-10, Vol.2007, No.15, pp.41–44 (2007).
- 15) 渡邊ふみ子, 藤代一成, 平賀瑠美: デジタルスコアによる楽曲学習支援インタフェース, 情報処理学会論文誌, Vol.45, No.3, pp.710–718 (2004).
- 16) 平井重行, 片寄晴弘, 井口征士: 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-II, 情報システム, II-パターン処理, Vol.84, No.9, pp.1933–1941 (2001).
- 17) Nakano, T., Goto, M. and Hiraga, Y.: MiruSinger: A Singing Skill Visualization Interface Using Real-Time Feedback and Music CD Recordings as Referential Data, *Proc. 9th IEEE International Symposium on Multimedia (ISM2007) Workshops*, pp.75–76 (2007).
- 18) 西山武繁, 諏訪正樹: 身体運動時の姿勢変化の分節化によるスキル熟達支援, 人工知能学会身体知研究会研究報告 2008-SKL-1-3, Vol.1, No.3, pp.13–16 (2008).
- 19) Typke, R., Giannopoulos, R., Veltamp, C.R., Wiering, F. and Oostrum, R.: Using Transportation Distances for Measuring Melodic Similarity, *4th International Conference on Music Information Retrieval*, pp.107–114 (2003).
- 20) Volk, A., Garbers, J., Kranenburg, P., Wiering, F., Veltamp, C.R. and Grijp, P.L.: Applying Rhythmic Similarity Based on Inner Metric Analysis to Folksong Research, *8th International Conference on Music Information Retrieval*, pp.293–296 (2007).
- 21) Lerdahl, F. and Jackendoff, R.: *A Generative Theory of Tonal Music*, MIT Press (1983).
- 22) Hamanaka, M., Hirata, K. and Tojo, S.: Melody Morphing method based on GTTM, *Proc. 2008 International Computer Music Conference*, pp.155–158 (2008).
- 23) Maidín, D.O.: *A Geometrical Algorithm for Melodic Difference*, Melodic Similarity, Computing in Musicology, Vol.II, pp.65–72, MIT Press (1998).
- 24) Cadwallader, A. and Gagné, D.: *Analysis of Tonal Music: A Schenkerian Approach, 2nd Edition*, Oxford University Press (2007).
- 25) Volk, A., Kranenburg, P., Garbers, J., Wiering, F., Veltamp, C.R. and Grijp, P.L.: A Manual Annotation Method for Melodic Similarity and The Study of Melody Feature Sets, *9th International Conference on Music Information Retrieval*, pp.101–106 (2008).
- 26) 諏訪正樹: 身体知獲得のツールとしてのメタ認知的言語化, 人工知能学会論文誌, Vol.20, No.5, pp.525–532 (2005).
- 27) 古川康一 (編著), 植野 研, 諏訪正樹ほか (著): スキルサイエンス入門—身体知の解明へのアプローチ (7章), オーム社 (2009).
- 28) 後藤真孝: 音楽音響信号理解に基づく能動的音楽鑑賞インタフェース, 情報処理学会音楽情報科学研究会研究報告 2007-MUS-70-9, Vol.2007, No.37, pp.59–66 (2007).
- 29) Fremerey, C., Müller, M., Kurth, F. and Clausen, M.: Automatic Mapping of Scanned Sheet Music to Audio Recordings, *9th International Conference on Music Information Retrieval*, pp.413–418 (2008).
- 30) 藤田顕次, 大野博之, 稲積宏誠: 習熟度を考慮した複数楽譜からのピアノ譜生成手法の提案, 情報処理学会音楽情報科学研究会研究報告 2008-MUS-77-10, Vol.2008, No.89, pp.47–52 (2008).

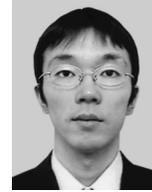
(平成 21 年 3 月 18 日受付)

(平成 21 年 9 月 11 日採録)



松原 正樹 (学生会員)

2006年慶應義塾大学大学院開放環境科学専攻前期博士課程修了。現在、同大学院理工学研究科後期博士課程在学中。音楽情報処理、認知科学に関する研究に従事。日本音響学会、日本認知科学会各会員。



鈴木 宏哉 (学生会員)

2005年慶應義塾大学大学院開放環境科学専攻前期博士課程修了。現在、同大学院理工学研究科後期博士課程在学中。自然言語処理に関する研究に従事。言語処理学会会員。



岡本 紘幸 (正会員)

2003年慶應義塾大学大学院開放環境科学専攻前期博士課程修了。自然言語処理に関する研究に従事。言語処理学会会員。



延澤 志保 (正会員)

2002年慶應義塾大学大学院計算機科学専攻後期博士課程修了。同年東京理科大学理工学部助手。現在、東京都市大学(旧武蔵工業大学)知識工学部講師。博士(工学)。自然言語処理に関する研究に従事。電子情報通信学会、言語処理学会、計量国語学会各会員。



佐野 智久

1997年慶應義塾大学大学院計算機科学専攻前期博士課程修了。現在、同大学院理工学研究科後期博士課程在学中。自然言語処理に関する研究に従事。



斎藤 博昭 (正会員)

慶應義塾大学工学部数理工学科卒業。現在、同大学理工学部情報工学科准教授。博士(工学)。自然言語処理、音楽情報処理等に興味を持つ。言語処理学会、日本音響学会、電子情報通信学会各会員。