

楽譜と表情を関連付けた統計モデルに基づく 楽器演奏の比較分析の検討

奥村 健太^{1,a)} 酒向 慎司^{1,b)} 北村 正^{1,c)}

概要：本稿では、楽器演奏に付与される表情について、特定の演奏者と楽曲の組合せにおける比較分析を行う問題を考える。表情付けに寄与する要因を説明可能な枠組みとして、表情の特徴量を近似した生成モデルに楽譜の指示を関連付け、各特徴量の生成過程を楽譜の指示に基づく規則を用いて体系化する手法が提案されている。本稿ではその体系の構築過程に着目し、表情付けに寄与した規則について、その寄与の度合いや関係性を楽譜の指示に基づき分析する手法を提案する。また、複数の楽曲と演奏者による演奏の組合せを用い、その有用性を検討する。

A study of comparative analysis of music performances based on the statistical model that associates expression and notation

KENTA OKUMURA^{1,a)} SHINJI SAKO^{1,b)} TADASHI KITMAURA^{1,c)}

1. はじめに

楽器演奏の演奏者は楽譜の指示から楽曲の意図を解釈し、楽器の操作に表情の付与を行う。その過程で指示をどのように解釈して操作に反映するかは演奏者に依存するため、同一の楽曲の演奏でも、付与される表情には相違が生じる [1]。しかし特定の表情付けにどのような解釈が寄与するのかを齟齬のない表現で説明することは、演奏者本人にも容易ではない [2]。本稿では、演奏における表情付けに寄与する何らかの理由を一般的な指標に基づいて分析する問題を考える。その解決に必要なのは、演奏者による表情付けの理由を説明する規則に類するものと、それらの表情付けへの寄与の度合いを示す定量的な指標である。

演奏者の解釈を一般的な指標に基づいて明確に説明することを目的に、筆者らは表情の特徴量を近似した生成モデルに楽譜の指示を関連付け、各特徴量の生成過程を楽譜の指示に基づいて体系化する手法を提案してきた [3]。先行研究では、演奏に関する経験的な知見の客観的な証明が可

能であることなどが示されている [4]。また、この手法は特定の演奏者が持つ表情付けの特徴を備えた演奏の自動生成にも応用されており [5]、これに基づく枠組みは大規模合同評価実験において競合する枠組みを上回る良好な性能を示している [6]。本稿では、この手法から得られる体系の構築過程に着目し、任意の演奏において楽譜の指示が持つ表情付けへの寄与の度合いを定める。これにより、任意の楽譜の指示と他の指示との関係を明示し、複数の演奏間におけるその傾向の相違についての比較分析を可能にする。

任意の演奏における表情付けの傾向を分析可能な枠組みとしては、テンポと強弱に関して観測された特徴量の変動の軌跡を描画する手法 [7,8] や、音響信号から観測可能な特徴量の傾向を階層的な図形として描画する手法 [9-12] が提案されており、表情の変動傾向が直感的に示される。しかしこれらの手法では表情の特徴量と楽譜の指示の関連付けがなされていないため、その変動要因の分析が困難である。提案手法では、表情を構成する特徴量と楽譜の指示とを一意に関連付ける。この点で類似する枠組みとして、任意の傾向の表情付けに寄与した規則を演奏から抽出する手法 [13,14] も提案されている。しかしこれらの手法では分析対象とする演奏の楽曲構造を入力としている。提案手

¹ 名古屋工業大学 (Nagoya Institute of Technology)

^{a)} k09@mmsp.nitech.ac.jp

^{b)} sako@mmsp.nitech.ac.jp

^{c)} kitamura@nitech.ac.jp

法ではそのような情報は演奏者のみに依存するべきものと考え、本人以外の意図が混入する可能性を排除する。また、実際の演奏では単一の楽曲の中でも複数の表情の使い分けが生じる [15]。そこでの表情付けに寄与する各規則が、その使い分けにどのように関係するのかについても説明される必要がある。提案手法では任意の表情付けに寄与する規則の組合せだけでなく、それらの関係性も説明できる。

以降、第2章では先行研究 [4,5] から、提案手法が用いる基礎的な技術を概説する。第3章では表情付けに寄与する規則を楽譜の指示に基づいて体系化するための手続きを示し、それらの寄与の傾向を楽譜の指示に基づいて分析する手法を提案する。第4章では提案手法の有効性を評価する。第5章では以上の成果をまとめ、今後の課題を述べる。

2. 楽譜と表情を関連付けた統計モデル

本稿では先行研究 [5] に倣い、楽譜の内容を MusicXML で記述可能な指示の系列、それに基づく演奏の内容を MIDI イベントで記述可能なシンボリックな事例の系列と考える。実際の演奏における任意の事例を y_n 、その生成に際して演奏者が従った指示に表情を付けず正確に演奏した場合の MIDI イベントを x_n とすると、表情として観測可能な任意の要素 f についての特徴量 $o_{n,f}$ は次式から得られる：

$$o_{n,f} = \begin{cases} y_{n,f} - x_{n,f} & (f \in F = \{\text{AT}\}), \\ y_{n,f}/x_{n,f} & (f \in F = \{\text{GR}, \text{DR}, \text{BR}\}). \end{cases} \quad (1a)$$

任意の事例は一音符または一拍を観測単位とし、その表情の特徴を構成する要素群を F とする。その構成要素は、鍵盤楽器の操作に関するものから以下のように定義する：

- AT (Attack Timing) 拍長を基準とする、打鍵時刻の差。
- GR (Gatetime Ratio) 音符楽譜上の音価に対する演奏から計測された、打鍵から離鍵までの継続長の比率。
- DR (Dynamics Ratio) 記譜された dynamics の値と演奏された MIDI velocity の値との比率。
- BR (Local BPM Ratio) 指示に対して拍単位で変動を算出した局所的な BPM の比率。

これらは音符または拍に依存し、 $F_{\text{note}}, F_{\text{beat}}$ に分類される：

$$f \in \begin{cases} F_{\text{note}} = \{\text{AT}, \text{GR}, \text{BR}\}, & |F_{\text{note}}| = 3, \\ F_{\text{beat}} = \{\text{BR}\}, & |F_{\text{beat}}| = 1. \end{cases} \quad (2a)$$

任意の演奏として生成された事例群の特徴量について、ここではその傾向が正規分布に従うと考える。それにより、 F_{note} または F_{beat} に関する各特徴量の確率密度関数は、次式に示す多変量正規分布として表せる：

$$P(o_n | \mu, \sigma^2) = \prod_{f \in F} \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_f^2}} \exp \left(-\frac{(o_{n,f} - \mu_f)^2}{2\sigma_f^2} \right) \right). \quad (3)$$

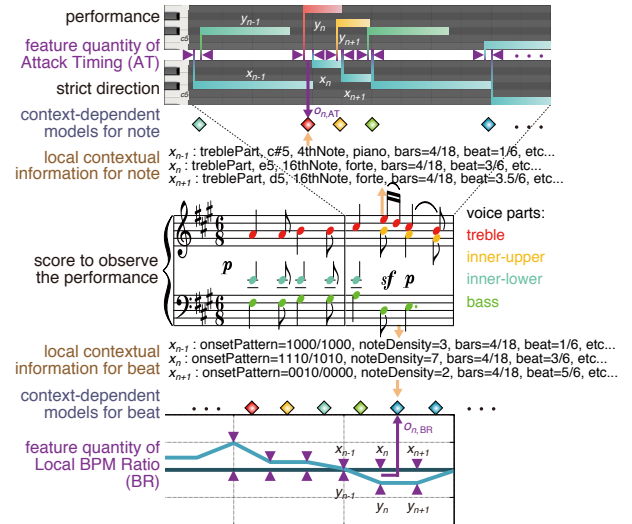


図1: 音符と拍の各事例における文脈依存モデルの定義

ここで μ_f, σ_f^2 は、 f に関するモデルのパラメタ（平均、分散）である。また、左辺の o_n は F_{note} の場合 $o_n = [o_{n,\text{AT}}, o_{n,\text{GR}}, o_{n,\text{DR}}]$ 、 F_{beat} の場合 $o_n = [o_{n,\text{BR}}]$ のベクトルであり、右辺の $o_{n,f}$ は各場合のベクトルに含まれる任意の要素についてのスカラーを示す。

楽譜の局所的な指示の系列を文脈に見立てると、それに従って演奏された事例の表情付けには、その周囲も含む局所的な指示の寄与が考えられる。ここでは y_n のモデルに (x_{n-1}, x_n, x_{n+1}) の指示に関する情報の組合せ（文脈情報）を関連付け、これを文脈依存モデルと呼称する（図1）。任意の事例とその指示を一意に関連付けるには、各事例の文脈依存モデルに関連付ける文脈情報に他の全事例との区別が可能な程度の精緻さを要する。その文脈要素には、鍵盤楽器の楽譜から得られる情報として一般性が高いものが望ましい。本稿では先行研究 [5] に倣い、音符の場合は主に和声関連、拍の場合は主にリズム関連、両者で共通して小節・楽曲内での時間的位置などの要素を用いる。これらの内訳を表1に示す。各場合の文脈要素の数はそれぞれ $|T_{\text{note}}| = 12, |T_{\text{beat}}| = 4$ となる。

任意の事例における表情付けには、それに対応する楽譜の指示から得られる情報の寄与が考えられる。文脈依存モデルを特徴量の傾向に従って分類する手法 [16] を導入し、その分類基準として任意の文脈要素に関する質問を用いることで、任意の表情付けに寄与した規則の組合せに類するものを獲得できる [4]。その分類結果は、リーフノード群 $S = \{s_1, \dots, s_M\}$ を持つ二分木として表現される（図2）。この木構造でリーフノードを除く全てのノード群 $B = \{b_1, \dots, b_K\}$ には、分類基準として選択された質問がそれぞれ保持されている。任意のリーフノードに至るまでの各ノードに含まれる質問群をルートノードから辿ることで、特定の事例における表情付けに寄与した規則に類するものが一意に記述される。

表 1: 文脈依存モデルに関連付ける楽譜の指示

| 文脈要素 t | 概要 | 関連付け |
|------------|---|------------------------------------|
| syllable | 音名 | T_{note} |
| step | 音高 | T_{note} |
| accidental | 臨時記号 | T_{note} |
| octave | 音域 | T_{note} |
| chord | 和音構成音または単音 | T_{note} |
| type | 音価 | T_{note} |
| staff | 大譜表の段 (upper, lower) | T_{note} |
| beam | 付尾の形状と向き | T_{note} |
| local | 小節内での時間的位置 | $T_{\text{note}}, T_{\text{beat}}$ |
| global | 楽曲内での時間的位置 | $T_{\text{note}}, T_{\text{beat}}$ |
| voice | 声部 (treble, inner-upper, inner-lower, bass) | T_{note} |
| notations | 特殊記号 | T_{note} |
| density | 拍内発音数 | T_{beat} |
| pattern | 拍内声部別発音パターン | T_{beat} |

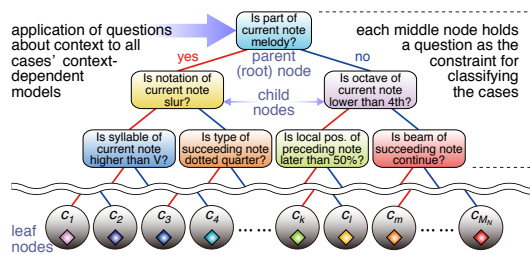


図 2: 文脈依存モデルの分類による木構造の構築

3. 楽譜の指示に基づく表情の比較分析

先述の手法に基づく木構造は、文脈依存モデルの学習データに依存して構築される。その構築過程に着目すると、文脈依存モデルの分類基準となる質問は、無数に定義されたあらゆる候補の中から分類対象となるデータの傾向を二分する上で最も適当なものがその都度選択されている。そこで本稿では、ルートノードに比較的近い段階のノード分割で選択され、あるいはより大きな対数尤度の向上量をもたらす質問は、演奏においても表情付けの傾向をより明確に分岐させたものと仮定する。また、木構造の中で選択された質問群において僅かな基準の相違は、演奏を単位とした比較分析に際し、ある程度類似したものとして見なせることが望ましいと考えられる。そこで本稿では、任意の文脈要素に関する質問群をそれぞれある程度類似した楽譜の指示として扱う。以上から、各文脈要素に関する質問群を持つ表情付けへの貢献度に類するものを対数尤度の向上量に基づいて定義し、それらの値から各文脈要素について表情付けへの寄与の度合いを分析する手法を提案する。

木構造の構築に際し、まず $O = (o_{1,F}, \dots, o_{n,F}, \dots, o_{N,F})$ を学習データとした文脈依存モデル群が与えられた場合を考える。このとき全ての文脈依存モデル群の共有を仮定したノードを s_m とし、その学習データの総量を $\sum_{n \in N} \gamma_{s_m}(o_{n,F})$,

平均、分散を μ_m, σ_m を s_m とすると、 s_m の対数尤度 $L(s_m)$ は次式で定義される：

$$L(s_m) = -\frac{1}{2} \left(\log \left((2\pi)^{|F|} \sigma(s_m) \right) + |F| \right) \sum_{n \in N} \gamma_{s_m}(o_{n,F}). \quad (4)$$

次に、 s_m に含まれる文脈依存モデル群を $s_{m,\text{no}}$ と $s_{m,\text{yes}}$ に分割する場合を考える。これは、あらゆる文脈要素 T に関して定義された $\sum_{t \in T} U_t$ 個の質問群から任意の文脈要素 t に関する質問 $q_{t,u}$ を用いて s_m を分割し、ノード b_m を生成する手続きとなる。 $q_{t,u}$ を選択する有効性は、次式に示す分割前後の対数尤度の向上量 $\Delta L_{q_{t,u}}(s_m)$ で評価される：

$$\Delta L_{q_{t,u}}(b_m) = L(s_{m,\text{no}}(q_{t,u})) + L(s_{m,\text{yes}}(q_{t,u})) - L(s_m). \quad (5)$$

ここで $\Delta L_{q_{t,u}} \rightarrow \max$ となる $q_{t,u}$ を選択する。対数尤度の向上が認められる $q_{t,u}$ が存在する限り、 $s_{m,\text{yes}}$ および $s_{m,\text{no}}$ においても更にノードの分割を繰り返す。

O の表情付けにおける任意の t の貢献度を c_t とする。その木構造に含まれる B の中で t のみに関する質問を持つ K_t 個のノード群を $B_t = \{b_{t,1}, \dots, b_{t,K_t}\}$ とし、 B_t に含まれるあらゆるノードに対して式 (5) を適用した結果を $\Delta L_t = \{\Delta L_{t,1}, \dots, \Delta L_{t,K_t}\}$ とすると、 c_t は次式で得られる：

$$c_t = \sum_{k=1}^{K_t} \Delta L_{t,k}. \quad (6)$$

以上から得られた各文脈要素の貢献度 $[c_1, \dots, c_T]$ の値により、その木構造における各文脈要素の表情付けへの寄与の度合いを評価できる。任意の演奏を単位として木構造を構築し、これらの貢献度を求めることで、複数の演奏間における各文脈要素の貢献度にそれぞれどのような相違があるかを比較分析することが可能となる。その比較分析に際し、一般的な多変量解析手法を適用できる。また、その際に演奏間の関係性を低次元の空間に写像が可能な手法を用いることで、分析結果は演奏間の表情付けの類似性についての直感的な距離尺度としても有用となると考えられる。

4. 評価実験

木構造は学習データの量に依存し、 c_t の値も木構造によって変動する。そこで、木構造における各文脈要素についての貢献度の合計値 $\sum_{t \in T} c_t$ を正規化の上で評価を行う。また、各評価には表 2 に示す演奏の組合せを用いた。各データセットは統一された作曲者による楽曲の組合せとしており、作曲された年代順に従って M(1), B(1), C(1) の順で扱う。尚、各多変量解析手法の適用には R 言語を用いた。また、文脈依存モデルの学習に用いた表情の特徴量は、全て同一のデータベース *1 から取得している。

*1 CrestMusePEDB Version 2, <http://www.crestmuse.jp/pedb/>

表 2: 演奏データセット

| Dataset | Compositions (abbreviation) | Performers (abbreviation) | Composer |
|---------|---|--|--------------|
| M(1) | Sonata K. 279 Mv. 1, 2, 3 (S279-1, 2, 3). | G. Gould (GG), M. Pires (MP). | W. Mozart |
| B(1) | Sonata No. 8 Mv. 2, 3 (S008-2, 3). | C. Arrau (CA), V. Ashkenazy (VA), W. Backhaus (WB) | L. Beethoven |
| C(1) | Nocturne No. 2, 10 (N002, N010), | V. Ashkenazy (VA), M. Pires (MP). | F. Chopin |

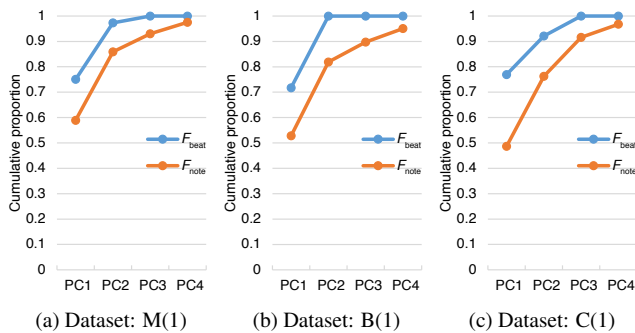


図 3: 主成分の累積寄与率

4.1 文脈要素の貢献度の低次元空間への縮約

木構造における文脈要素ごとの関係をそれらの貢献度から分析する手法の一つとして、主成分分析 (PCA) による少数次元の空間への写像が考えられる。そこで、ここでは PCA による平面への写像の有効性を検証する。データセット M(1), B(1), C(1) の各演奏を単位として構築した木構造群から各文脈要素の貢献度を算出し、各データセットについて PCA を適用した。そこで得られた累積寄与率について、低次の第一主成分から第四主成分までを図 3 に示す。

M(1) および B(1) では、 F_{note} で 0.8 以上、 F_{beat} で 0.9 以上の累積寄与率を第二主成分 (PC2) までで得られている。よって、これらのデータセットでは、平面への写像でも各演奏の関係を概ね良好に説明できるといえる。一方、C(1) の累積寄与率は特に F_{note} において他のデータセットを下回っている。ここから、C(1) における F_{note} の表情付けには、他のデータセットに比較してより複雑な解釈の相違が生じていると考えられる。そのような相違を生じる主な要因が演奏者と楽曲のどちらにあるかを考察するには、各演奏を単位とした表情の分析を要する。

4.2 文脈要素の寄与度合いと関係性の分析

M(1), B(1), C(1) の各演奏を単位として木構造を構築し、データセットごとに PCA を適用した。PC1, PC2 における各文脈要素の貢献度と関係性、それらに基づく各演奏の比較分析の結果を平面に写像し、 F_{beat} について図 4 に、 F_{note} について図 5 に示す。ここでは PC1 を横軸、PC2 を縦軸とし、両軸において主要な文脈要素の因子負荷量のベクトルを赤色の矢印で表す。各演奏は曲名と演奏者名の組合せ^{*2}で記し、同一の演奏者による演奏を同一色で結線している。

^{*2} 図中での各演奏は、表 2 に従い、S279-1GG などの略称で記す。

4.2.1 文脈要素に依存した傾向の比較分析

F_{note} , F_{beat} の双方において、文脈要素 global が横軸 (PC1) 方向に比較的高い因子負荷量を有する 경우가多い。ここから、表情付けの傾向の変動には楽曲内の時間的位置への比較的強い依存が示唆される。本稿では楽曲の演奏を単位として木構造の構築を行ったが、楽曲の時間的位置に合わせて分割した事例群に基づく木構造を比較することで、その演奏者が着目した楽譜の情報や、その時間的変化を詳細に説明できる可能性がある。一方、縦軸 (PC2) 方向に比較的高い因子負荷量を有する文脈要素は、 F_{beat} の場合には pattern, density となる傾向が各データセットで共通しており、 F_{note} の場合では主に staff, voice, type などが挙げられる。これらの文脈要素に関する指示は単一の音符や拍を対象として完結し、同一の指示が楽曲中で複数回出現しうるため、global と比較して高い局所性を有する文脈要素といえる。以上から、図 4, 図 5 の各平面を構成する二軸には、主に楽譜の大域的指示と局所的指示に関する文脈要素がそれぞれ寄与していると考えられる。

4.2.2 楽曲の組合せに依存した傾向の比較分析

図 4(a), 図 5(a) に示す M(1) に注目すると、各演奏への寄与の度合いの大きな文脈要素の傾向が演奏者に依存しており、各平面上では演奏者ごとの傾向が明確に分離している。これらにおいて、演奏者 GG では global, type など、演奏者 MP では staff, syllable などの寄与が認められる。同一の楽曲の演奏は各演奏者がとりうる範囲内で比較的類似した位置に分布しているものの、それらの距離は必ずしも近くない。よって M(1) に含まれる楽曲には、演奏者の比較的自由的な解釈を許容する余地があると考えられる。一方、図 4(a), 図 5(a) に示す C(1) に注目すると、各楽曲が演奏者を問わず比較的近い距離に分布しており、各平面上では演奏者別の相違が比較的少ない。よって C(1) の各演奏における楽曲の解釈では、演奏者自身の意図が比較的強く楽譜の指示に制約されていると考えられる。残る B(1) に注目すると、 F_{beat} (図 4(b)) については、各文脈要素の因子負荷量に M(1) (図 4(a)) と比較的近い値と関係性がみられる。一方、 F_{note} (図 5(b)) については、比較的多数の文脈要素の寄与がみられる。また、ここで寄与がみられる文脈要素の内訳は、C(1) (図 5(c)) の傾向に近い。以上から、B(1) に含まれる楽曲の解釈が M(1) と C(1) の双方の特徴を備え、時代的な隔たりのある両者の中間に位置することが示唆される。

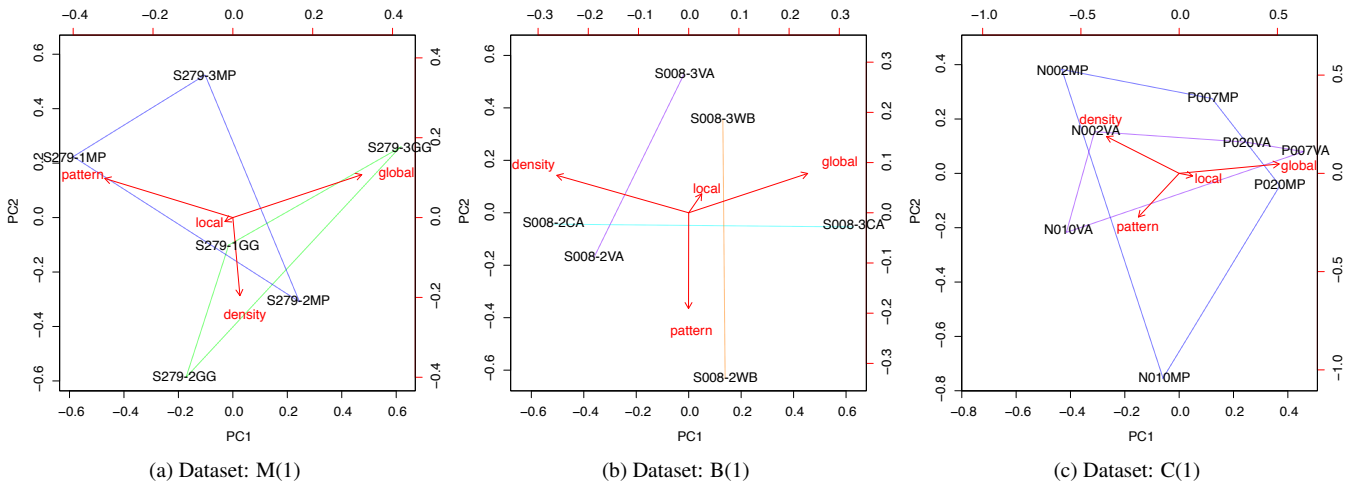


図 4: 演奏の分布と各文脈要素の表情付けへの寄与傾向 (F_{beat})

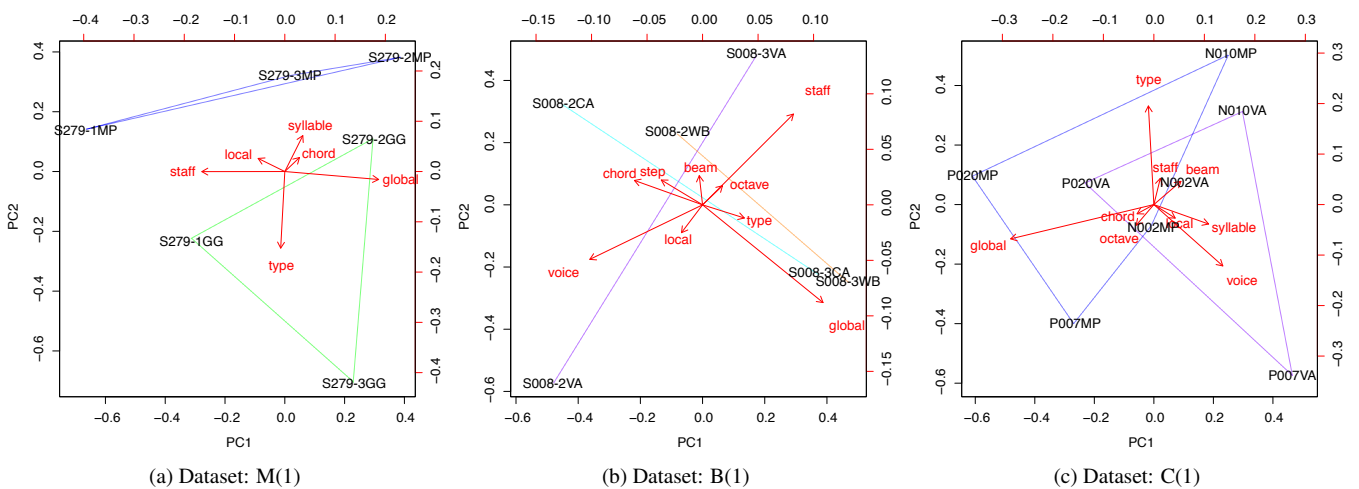


図 5: 演奏の分布と各文脈要素の表情付けへの寄与傾向 (F_{note})

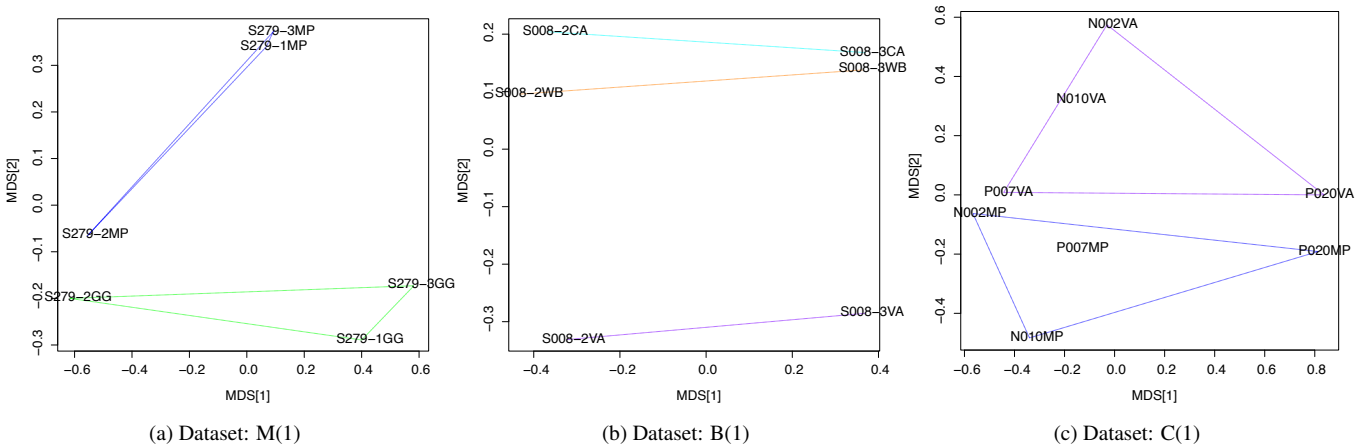


図 6: 主観評価と MDS に基づく演奏間の表情の類似度

4.3 演奏間における表情の類似性の比較

提案手法の分析結果が示す任意の演奏の間での距離は、各演奏の類似性を表すものと考えられる。そこで、演奏間の類似度を主観評価によって測定する被験者実験を行い、その結果との比較から、提案手法による演奏間の関係性の

写像が人間の直感的な類似性の判断に準じるものであるかを検証する。ここでは M(1), B(1), C(1) のそれぞれに含まれる演奏間の表情について、類似度を一対比較で問う主観評価を実施した。類似：0, 非類似：1 とする 5 段階の評価軸を設定し、任意の演奏対における表情付けの類似ある

いは相違についての直感的な距離の判定を被験者に依頼した。その被験者として、鍵盤楽器に関する高度な演奏技術やそれを専門とした活動経験を持たない、20名の協力を得た。以上により得られた演奏間の距離の評価値を集計し、データセットごとに多次元尺度構成法(MDS)を適用した結果を図6に示す^{*3}。提案手法による分析結果と人間の直感との比較として、ここでは図5に示す提案手法の分析結果(F_{note})において写像された任意の演奏間の距離に着目し、図6の各例との比較を行う。

図6(a)に示すデータセットM(1)では、楽曲S279-2における類似性と、各演奏者における楽曲間の関係性が再現されている。また、図6(b)に示すB(1)では各楽曲の配置が平面を二分する配置が認められ、演奏者CAとWBの類似性、そしてこの2名とWAの非類似性が再現されている。よって、提案手法はこれらのデータセットにおいて人間の直感的な判断に準じた演奏間の関係性を評価できていると考えられる。一方、図6(c)に示すC(1)では、他のデータセットにあるような類似点を見出すのが比較的困難となっている。作曲者別の傾向として、C(1)の楽曲にはより複雑な演奏指示が多数含まれ、M(1)、B(1)とは異なる傾向にある。今回被験者に要求した判断には、ある程度以上の楽器演奏に関する経験に基づく着目点を要するといえる。直感に基づく評価に際し、C(1)の楽曲における表情の類似性はM(1)、B(1)に比べて判定が困難であった可能性が考えられる。その要因については対象を個々の演奏内での特定部分に絞るなど、より詳細な分析からの考察を要する。

5. おわりに

本稿では、表情付けに寄与する規則とその関係について、特定の演奏間での比較分析を行う手法を提案した。本稿の評価で用いた演奏の組合せは限定的であるが、それらの結果から特定の演奏者や楽曲の表情付けに寄与する楽譜の指示がどのようなものであるかが明示された。今後単一の演奏者による多数の楽曲の演奏や、その逆の組合せなどの多様な条件での分析を進めることで、提案手法は楽譜の指示に基づく高い一般性を備えた表現を用いて演奏者や楽曲の特性の解明に貢献できると考える。

尚、本稿では木構造中で選択された質問の特徴を文脈要素単位で扱っている。特定の条件についての詳細な分析は困難となっているほか、質問群の類別手法には最適化の余地がある。また、提案手法は木構造の構築に際して一定以上の学習データ量を要するため、単一演奏内の特定の部分などについての分析ではその制約を受けるほか、既存手法[7,8]で可能な観測単位を基準とした分析も困難である。この点に関する技術的課題の解決も、今後の課題となる。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金(課題番号:

26730182)および科学技術振興機構(JST)研究成果最適展開支援プログラムA-STEP(課題番号:AS262Z00622H)の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] Seashore, C. E.: *Psychology of Music*, Courier Dover Publications (1938).
- [2] Gabrielsson, A.: Music performance research at the millennium, *Psychology of music*, Vol. 31, No. 3, pp. 221–272 (2003).
- [3] Okumura, K., Sako, S. and Kitamura, T.: Stochastic Modeling of a Musical Performance with Expressive Representations from the Musical Score, *Proc. the 12th International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR)*, pp. 531–536 (2011).
- [4] 奥村健太, 酒向慎司, 北村 正: 楽譜に基づく鍵盤楽器演奏の統計的モデル化手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 54, No. 4, pp. 1288–1301 (2013).
- [5] Okumura, K., Sako, S. and Kitamura, T.: Laminae: a stochastic modeling-based autonomous performance rendering system that elucidates performer characteristics, *Proc. ICMC—SMC—2014*, pp. 1271–1276 (2014).
- [6] Okumura, K., Sako, S. and Kitamura, T.: A stochastic model of artistic deviation and its musical score for the elucidation of performance expression, Rencon Working Group (online), available from (<http://smac2013.renconmusic.org/participants>) (accessed 2015-04-22).
- [7] Dixon, S., Goebel, W. and Widmer, G.: The performance worm: Real time visualisation of expression based on Langer's tempo-loudness animation, *Proc. International Computer Music Conference (ICMC)*, pp. 361–364 (2002).
- [8] Dixon, S., Goebel, W. and Widmer, G.: The "Air Worm": An Interface for Real-Time Manipulation of Expressive Music Performance, *Proc. International Computer Music Conference (ICMC)*, pp. 614–617 (2005).
- [9] Sapp, C. S.: Harmonic Visualizations of Tonal Music, *Proc. International Computer Music Conference (ICMC)*, Havana, Cuba, pp. 423–430 (2001).
- [10] Sapp, C. S.: Comparative analysis of multiple musical performances, *Proc. the 8th International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR)*, pp. 497–500 (2007).
- [11] Sapp, C. S.: Hybrid numeric/rank similarity metrics for musical performance analysis, *Proc. the 9th International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR)*, pp. 497–500 (2008).
- [12] CHARM Department of Music Royal Holloway: Mazurka Project, AHRC Research Centre for the History and Analysis of Recorded Music (online), available from (<http://www.mazurka.org.uk>) (accessed 2015-04-22).
- [13] Widmer, G.: Machine Discoveries: A Few Simple, Robust Local Expression Principles, *Journal of New Music Research*, Vol. 31, pp. 37–50 (2002).
- [14] Tobudic, A. and Widmer, G.: Relational IBL in Music with a New Structural Similarity Measure, *Proc. the 13th International Conference on Inductive Logic Programming*, pp. 365–382 (2003).
- [15] Repp, B. H.: A microcosm of musical expression: I. Quantitative analysis of pianists' timing in the initial measures of Chopin's Etude in E major, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 104, No. 2, pp. 1085–1100 (1998).
- [16] Odell, J. J.: The Use of Context in Large Vocabulary Speech Recognition, PhD Thesis, Cambridge University (1995).

^{*3} 図4, 図5と同様に、図中での各演奏は曲名と演奏者名の組合せで記し、同一の演奏者による演奏を同一色で結線している。