

旋律の音価，遷移，拍節構造に関するルールに基づく IR 分析器実現方式の検討

能登 楓^{1,a)} 竹川 佳成^{1,b)} 平田 圭二^{1,c)}

概要：本研究では，Implication - Realization モデル（IR モデル）に基づき，IR シンボル列を獲得する方法について述べる．IR モデルとは 1992 年に E.Narmour が提唱した音楽理論であり，3 音以上からなる音列の参照関係を 8 つのシンボルへ分類することによって旋律を分析する．これまで，ルールの曖昧さや分析事例の少なさといった理由から，IR 分析器は部分的には実装されているものの，総合的に実装された事例はない．本研究では，旋律における音価，遷移パターン，拍節構造に関する 3 つのルールを提案し，Narmour 自身による分析例から抜粋した 61 例に対する IR 分析，および評価を行ったところ，再現率が 0.836，適合率が 0.844，F 値が 0.84 となった．また，提案ルールの有用性に関する議論を行なった．

1. はじめに

暗意実現（IR）モデルは，E.Narmour によって提唱された認知的音楽理論である [3, 4]．IR モデルでは，人は音楽を受動的に聴くのではなく，次に聴こえる音を予測しながら，能動的に聴いているという仮説のもと，音高の参照関係を 8 つのシンボルに分類する．例えば，P（Process）というシンボルがある．このシンボルは，同程度の音程，同方向の音が聴取されることが期待されるような音列に付与される．具体的には「ドレミファ」という音列の聴取に伴い，「ソラシド」という音列が聴取されるような場合である．この場合，「ソラシド」は「ドレミファ」の聴取によって生じた，同程度かつ同方向の音程が続くであろうという暗意を実現するような音列であると解釈できる．もちろん，暗意が否定される場合もあり，例えば後続する音列が「ミレド」のように，逆方向へ進行する音列である場合には IP（Intervallic Process）というシンボルを音列に付与する．

IR 分析は大きく分けて，シンボル開始音の推定，シンボル付与の 2 つの手順からなる．シンボル付与の方法に関しては，Narmour 自身によって提案されており，一部ルールには曖昧さが残るものの計算機上への実装が可能となっている．一方，シンボル開始音の推定に関しては感覚的な定義に止まっており，これまでいくつか実装の試みはあるものの，定量的に評価を行った例は存在しない [5, 7, 11]．そのため，IR 分析による結果を特徴量として用いる従来

研究 [8] においては，音列の先頭から順に tri-gram を作成し，シンボル付与を行うなどの方法が取られていた．

Narmour によると，シンボル開始音を推定するための手がかりはクロージャにあるという．クロージャとは，これまで聴取した音列から暗意が生じない点，あるいは暗意が鈍化，抑制，弱化した点，いわゆる，グルーピングの境界を設定する構造 [1, 4] を指し，具体的には，音程や音列の向き，音価などが変化する場合や強拍が発生する箇所のことである．

Narmour による IR 分析の例，図 1，および図 2 をもとに，クロージャとシンボル開始音の関係について説明する．図 1 の分析例においてクロージャと考えられる音は，強拍かつ音価が変化している 3 小節目第 1 音の「ラ」である．この時，クロージャである「ラ」は第 1 小節から始まるシンボル R の終了音であり，なおかつ，3 小節目に現れるシンボル P の開始音である．一方，図 2 の分析例におけるクロージャは 1 小節目第 1 音，第 4 音，2 小節目第 3 音，3 小節目第 1 音と考えられる．この時，1 小節目第 1 音，第 4 音，3 小節目第 1 音はシンボル P の終了音，2 小節目第 3 音については，シンボルの開始音かつ終了音となる．つまり，クロージャとはシンボル開始音を集合 A ，シンボル終了音を集合 B で表した際の和集合 $A \cup B$ として表すことができる（図 3）．

本研究の目的は IR 分析器の実現である．前述のとおり，シンボル付与方法についてはすでに検討されているため [4, 11]，本研究における主たる課題は適切なシンボル開始音の推定である．シンボル開始音の推定にあたって，音価の変化，音高の遷移，拍節構造に着目した推定ルールの

¹ 公立はこだて未来大学 大学院

a) g3120002@fun.ac.jp

b) yoshi@fun.ac.jp

c) hirata@fun.ac.jp



図 1 IR 分析例 1 (W. A. Mozart: Piano Concerto No. 19 in F Major, Kv.459 (3rd mov.) より 第 287-290 小節)



図 2 IR 分析例 2 (L. v. Beethoven: Piano Sonata op.14-2 (3rd mov.) より 第 1-2 小節)

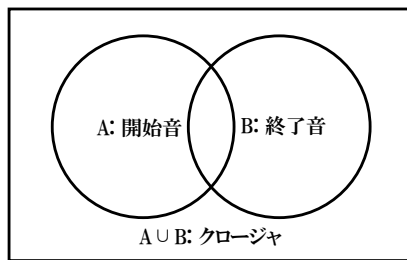


図 3 クロージャの定義

提案を行う。また、提案手法の評価のために、IR 分析器による推定結果と Narmour による IR 分析との比較を行い、提案手法の有効性、推定結果に寄与した要因に関する議論を行う。

2. シンボル開始音推定に関する提案手法

本論文では、音価の変化、音高の遷移、拍節構造に関する特徴量の設計やルールの提案によってシンボル開始音の推定を行う。本システムの概要を図 2 に示す。本システムは単旋律を入力とし、IR 分析結果を出力する。システムは大きく分けてクロージャ推定部分、シンボル開始音推定部分の 2 つに分けられる。以下、各過程について述べる。

音価の変化に着目したクロージャ推定方法を提案する。これまでに提案されているクロージャ検出方法の多くは時間に関連したものである。中でも、音価の変化に基づくルールが提案されており、村尾らは音価が増加する音 [7]、加えて、矢澤らは音価の変化や休符が発生する箇所をクロージャとみなすルールの提案を行っている [11]。これらのルールの問題点は図 5 のように、音符と休符が交互に出現するような旋律を対象とした場合、過剰にクロージャを推定してしまうことである。そのため、クロージャ推定が可能な楽曲に制約があった。そこで、本研究では音価、休符ではなく音符の発音時刻の間隔である IOI (Inter Onset Interval) の変化に着目することによって、上記のルールの統合を行う。IOI は各音符の発生する時刻の差分であるため、発音タイミングさえズレなければ、音価の変化や休符の挿入による影響を受けることがない。本研究では IOI が直前の IOI と比較し、2 倍以上に増加する音を音価の変

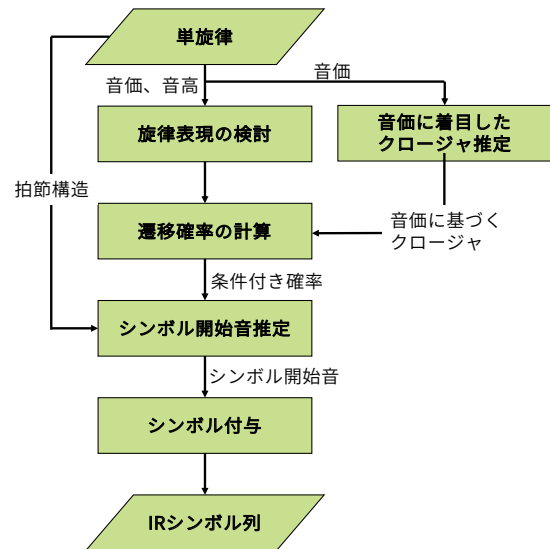


図 4 提案手法の概要



図 5 Clara Wieck-Schumann, Scherzo No.1 in D minor, op. 10 (1838) より 第 15-16 小節

化に着目したクロージャとみなす。

2.1 音価に着目したクロージャ推定

音価の変化に基づくクロージャの推定によって得られる効果は、シンボル付与対象の制限である。前述の通り、クロージャはシンボルの開始音と終了音の和集合であると定義しているため、図 6 のようにクロージャを跨ぐシンボルの付与を行うことはない。ただし、クロージャ前後のシンボルが同一の場合には、例外的にクロージャを跨ぐシンボルとみなす場合もある。詳しくは後述する。

2.2 音高の遷移に着目したシンボル開始音推定

クロージャ推定では、暗意が鈍化する音を推定していたが、シンボル開始音推定では、暗意が実現する音列の推定を目指す。ここでは、楽曲中に頻出する音高の遷移パターンは暗意-実現関係にある音列であると仮定し、この音列の生起確率を音高の遷移パターンに基づく特徴量とする。生起確率を求める音列の長さは、3 音とする。これは、IR モデルにおけるシンボル付与は 3 音 1 まとまりを基本に行うためである。音列の生起確率を求める際には、学習データとして使用する旋律の先頭から順に tri-gram を作成し、 i 音目、 $i+1$ 音目が起きたのちに $i+2$ 音目が起こる確率として条件付き確



図 6 クロージャを考慮したシンボル付与

率 $P(2\text{音目} = i+1, 3\text{音目} = i+2 | 1\text{音目} = i, 2\text{音目} = i+1)$ を計算する。

2.3 旋律の表現方法の検討

条件付き確率 $P(2\text{音目} = i+1, 3\text{音目} = i+2 | 1\text{音目} = i, 2\text{音目} = i+1)$ の分布は、確率変数の影響を受ける。例えば、旋律の遷移確率を求める場合、一般的には確率変数として音高が用いられることが多い。しかし、音高を確率変数とみなした場合には学習後の確率分布がスパースになる可能性が高い。これを避けるために、本研究では確率変数として音程、および場合分けされた音程の2つを検討する。IR モデルにおける音程の扱いは S (Small), L (Large) の2値に分けられるということ参考に、場合分けされた音程は n 半音未満, n 半音以上の2値で表現したものとする。

2.4 拍節構造に着目したシンボル開始音推定

シンボル付与のための特徴量として拍節構造を導入する。拍節構造は旋律聴取時のグループ形成に影響することが知られている。Fraissee の報告によると、同一の時間感覚で生じる一連の音列が提示されたとき、人はこれらの音列を2つか3つの反復的なグループに分ける [9]。反復的なグループとはいわゆる拍をさす。本研究では、IR シンボルもある種のグループであるとみなし、拍を起点としたシンボル付与が行われるという仮説を立てる。

拍節構造の導入における各拍の強さは、Python のライブラリである music21 [2] に実装されている Music21Object.beatStrength で定義されている値を特徴量として用いる。beatStrength オブジェクトでは、小節頭の1拍目を1.0, それ以外の強拍を0.5, 弱拍を0.25 というように、拍の強さは相対的な値として表現されている。

2.5 シンボル開始音推定

音価に基づくクロージャ、音高の遷移パターン、拍節構造からシンボル開始音の推定を行う。シンボル開始音の推定における、探索範囲はクロージャから次のクロージャまでの区間である。各音符に割り振られた音高の遷移パターンに基づく特徴量、拍節構造に基づく特徴量を標準化したのちに和を計算し、シンボル開始音を推定するための特徴量として用いる。区間内では、この特徴量が高いものから順にシンボル開始音とみなし、シンボルの付与を行う。

2.6 シンボルの付与方法

暗意実現構造を形成する最短の音列である3音へのシンボルの付与方法は Narmour の提案した原理から読み取ることができる。音程原理、音高原理、シンボル付与の対象となる3音の音程の大きさ、向きに関する4つのルールによって、付与するシンボルを決定する。この際、付与されるシンボルは基本シンボルである8つとその他のシンボル

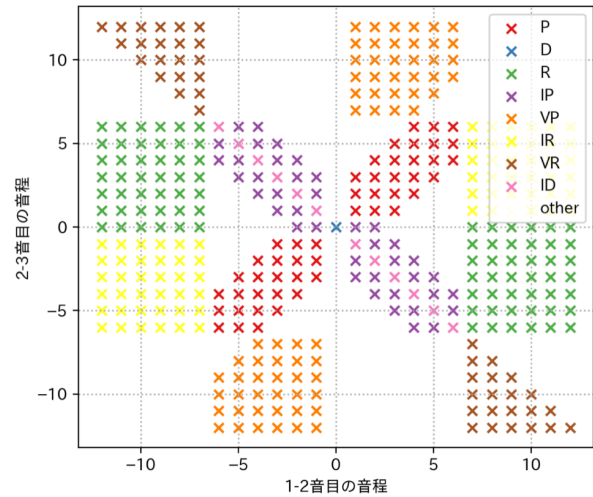


図7 各IRシンボルが付与される領域

other の計9種類に分けられる。また、実際にシンボルを付与するためには、任意の音程の大きさを S, L の2値に分ける必要がある。S を6半音未満, L を6半音以上の音程とした場合に、上記のルールによって付与されるシンボルと、1-2音目の半音数, 2-3音目の半音数の関係を図7に示す。図7からわかるように、各点に対して2つ以上のシンボルが割り振られることはない。そのため、シンボル開始音を推定してしまえば、付与するシンボルを一意に決定することができる。

各音符へ付与するシンボル数について検討する。基本的に IR 分析は隣接する3音に対して1つのシンボルを付与するため、あらゆる音符に3つのシンボルを付与した場合、クロージャ区間内の全ての tri-gram に対してシンボルを付与することと同等の操作になる。本稿では、実験的に最大付与数を2と3とした時の IR 分析結果の違いを比較する。

また、基本的に3音に対して1つのシンボルを付与するが、例外的にシンボル P, D に対しては4音以上に対して1つのシンボルを付与する場合がある。シンボル P, D は類似する音程かつ音方向が繰り返されるシンボルであるという特徴から、連続して出現するシンボル P, D は類似音程の反復により暗意が増幅されると考えられる [4]。このことから、類似する音程かつ音方向が繰り返されるシンボル P, D が重畳する場合には、連続するシンボルを統合し一つのシンボルを割り当てる。

一方、4音以上からなるシンボル P, D 内に暗意の減衰が見られる場合にはその限りではない。図2において既に示したように、シンボル P が連続する場合においても統合しない場合がある。これは、クロージャの影響を受けていることが考えられる。しかし、どのようなクロージャが暗意を減衰させるのかは不明であるため、本稿では、直感的にわかりやすい拍節構造の影響を調査する。



図 8 IR 分析対象が 4 音以下

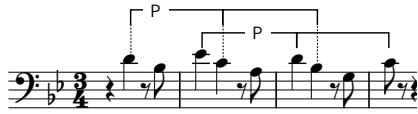


図 9 任意の 3 音を対象に IR 分析を行う例

3. 評価実験

提案システムによるシンボル開始音の推定精度、および結果に寄与した要因を調査するために評価実験を行う。評価項目は特徴量、旋律表現、シンボル付与数、シンボルの統合の 4 つである。表 1 に各評価項目における条件を示す。

3.1 評価値と正解データ

本実験では正解データとして、Narmour による分析結果を使用した。IR 分析のルールは曖昧な部分が多く、分析結果は分析者の主観に委ねられることから、IR 分析結果の大規模なデータセットは存在しない。そのため、本実験では [4] で紹介されている分析例より抜粋した 61 例を正解データとみなし、音高、音価、発音タイミング、シンボル、シンボル開始音の情報を付与した MusicXML ファイルを作成した。正解データとみなす楽曲の条件は、旋律長が 5 音以上かつシンボル付与対象が隣接する場合である。図 8, 9 に正解データに含まれない IR 分析事例を示す。図 8 では、旋律長が 4 音である例である。このような場合、シンボル開始音の推定を行うことなく正しい IR 分析が可能であることから正解データに含めない。また、図 9 のように、隣接しない 3 音を対象とした IR 分析例ではシンボル開始音の推定のみではなく、シンボル付与対象音の推定をしなければ IR 分析不可能であることから正解データには含めていない。

シンボル開始音が定まれば、付与されるシンボルは一意

表 1 評価項目

評価項目	
特徴量	1-1. 音価に基づくクローージャ
	1-2. 音高の遷移確率
	1-3. 拍節構造
旋律表現	2-1. 音高
	2-2. 音程
	2-3. 場合分けされた音程
シンボル付与数	3-1. 最大 2 つ
	3-2. 最大 3 つ
シンボルの統合	4-1. 有り (拍頭, 強拍, 拍)
	4-2. 無し

に決定されるため、本システムの評価にはシンボル開始音の再現率、適合率、F 値を用いた。提案システムへの入力音高、音価、発音タイミングであり、出力としてはシンボル開始音か否かを 0, 1 の 2 値で出力する。正解データも同様にシンボル開始音を 1, それ以外を 0 として表現している。この時、基本シンボルである 8 シンボルの開始音には 1 をシンボル other の開始音には 0 を割り当てた。

3.2 学習データ

特徴量 1-2. 音高の遷移確率を計算するにあたって、GTTM DataBase [6] から 300 曲を学習データとして使用した。前述した通り、求める分布は旋律における隣接する 3 音の条件付き確率なので、それぞれの楽曲の先頭から tri-gram を作成し、条件付き確率を計算した。また、実験の対象楽曲に含まれる音高の遷移パターンが学習データ上に存在しない可能性を考慮し、学習データへ対象楽曲も加えたものから音高の遷移確率を計算した。

3.3 実験結果

表 2 に特徴量に関する実験結果を示す。特徴量を除く評価項目に関しては、各評価項目において最も評価値が高くなったものを使用しており、旋律表現に関しては 2-3., 付与するシンボル数に関しては 3-1, シンボルの統合に関しては 4-1. という条件下のもと実験を行なった。表 2 において特徴量に関する列では、使用した特徴量を ✓ として表記している。つまり、条件 1 では全ての特徴量を使用し、条件 8 ではどの特徴量も使用せずに IR 分析を行うということを表している。どの特徴量も使用しない場合はその他の評価項目による制約下のもと、得られる tri-gram を対象に IR 分析を行った場合の評価値である。

最も評価値が高くなった特徴量の組み合わせは、条件 1 となっており、再現率が 0.83, 適合率が 0.84, F 値が 0.84 となっている。これはいずれの特徴量も使用しなかった場合の再現率、適合率、F 値と比較して、総じて約 2 ポイントの向上となっている。

評価値は特徴量の組み合わせに影響を受けることが確認された。全体を通して、使用した特徴量が多ければ評価値

表 2 特徴量に関する実験結果

	特徴量			評価項目		
	1-1.	1-2.	1-3.	再現率	適合率	F 値
条件 1	✓	✓	✓	0.836	0.844	0.840
条件 2		✓	✓	0.832	0.805	0.819
条件 3	✓		✓	0.799	0.746	0.772
条件 4	✓	✓		0.695	0.748	0.720
条件 5	✓			0.695	0.748	0.720
条件 6			✓	0.759	0.671	0.712
条件 7		✓		0.655	0.662	0.658
条件 8				0.652	0.658	0.655

は高くなる傾向にあるが、使用した特徴量が2つである条件4と使用した特徴量が1つである条件5では、評価値に差が見られなかった。しかし、同様に特徴量1-2.の有無のみが異なる条件2と条件6では評価値に差が見られることから、評価値の値は特徴量の数ではなく、組み合わせの影響を受けることがわかる。

表3に条件1, 3-1., 4-1. という条件下のもと実験を行なった旋律表現に関する実験結果を示す。表3におけるnは場合分けを行う際の半音数を表している。n = 1の場合には旋律に現れる音程を半音数1未満か1以上のいずれかで2値で表現する。半音数を度数で表現した場合にn = 1の時の音程は、完全1度に相当し、場合分けのルールは完全1度の音程とそれ意外の音程に分けるというルールになる。表中の要素が多いため、値の変化をグラデーションを使って値の大小を表現しており、値の高い要素は濃い緑、値の低い要素は黄色と対応している。

最も評価値が高くなったものは、2-3. 場合分けした音程 (n = 6, 7, 8) とした場合で、再現率は0.836, 適合率0.844, F値が0.84となった。一方、最も評価値が低くなったのは2-1. 音高を使用した時であり、再現率は0.789, 適合率0.773, F値が0.781となった。2-3. については、nの値に応じて評価値が変化しており、値によっては2-1. (音程) を使用した場合の方が評価値は高くなっている。特にn = 6, 7, 8の場合に評価値は最大となり、その他、nの値が大きくなる、もしくは小さくなるにつれて評価値は減少する傾向にあった。

表4に条件1, 2-3. (n = 7), 4-1. という条件下のもと実験を行なったシンボル付与数に関する実験結果を示す。シンボル付与数が3つの場合には付与数が2つの時に比べ、再現率が上昇していることから、シンボル2つという条件の元では全てのシンボル開始音を推定できないことが示唆される、

表5に条件1, 2-3. (n = 7), 3-1. という条件下のもと実

表3 旋律表現に関する実験結果

	再現率	適合率	F 値
n = 1	0.799	0.788	0.794
n = 2	0.822	0.814	0.818
n = 3	0.826	0.831	0.828
n = 4	0.822	0.828	0.825
n = 5	0.826	0.828	0.827
n = 6	0.836	0.844	0.84
n = 7	0.836	0.844	0.84
n = 8	0.836	0.844	0.84
n = 9	0.832	0.838	0.835
n = 10	0.832	0.838	0.835
音高	0.789	0.773	0.781
音程	0.826	0.834	0.83

表4 シンボル付与数に関する実験結果

シンボル数	再現率	適合率	F 値
2つ	0.836	0.844	0.840
3つ	0.869	0.76	0.811

表5 シンボルの統合に関する実験結果

分割位置	再現率	適合率	F 値
分割なし	0.789	0.87	0.828
拍頭 (beat strength = 1.0)	0.836	0.844	0.840
強拍 (beat strength = 0.5)	0.836	0.809	0.822
拍 (beat strength = 0.25)	0.836	0.809	0.822

験を行なったシンボルの統合に関する実験結果を示す。表5における1列目分割なしという項目では、シンボルP, Dそれぞれ隣接するシンボルを統合していることを表し、その他の項目では拍頭、強拍、拍において4音以上からなるシンボルP, Dを分割していることを指す。最も評価値が高くなったのは拍頭で分割する場合であり再現率は0.836, 適合率0.844, F値が0.84となった。これより、拍頭でシンボルを分割することの効果があると考えられる。一方、拍頭、強拍、拍における再現率が変化しなかったことから、拍頭よりも弱い拍におけるシンボル分割の効果はないと考えられる。

4. 考察

4.1 旋律表現

旋律表現の中でも場合分けされた音程に関して、楽典と関連する結果が得られた。前述した通り、場合分けを行う基準となる半音数nが6, 7, 8の場合に評価値は最大となり、nの値が大きくなる、もしくは小さくなる場合には評価値が減少していく。ここで注目したいのが転回音程である。転回音程とは、完全1度に対する完全8度のように、ある音程の上下関係を逆にした結果できる音程のことをさす。転回音程という観点から表3を解釈すると、n = 6のときは完全4度、n = 7のときは増4度、n = 8のときは完全5度となり、転回音程の関係にあるnの評価値はある程度対応付いていることがうかがえる。

4.2 対象楽曲の拍子と評価値

IR分析の評価値と拍子の関係を図10に示す。横軸は再現率を縦軸は適合率を表しており、輪の大きさはデータの数に対応している。再現率の平均値は2拍子から順に0.86 (標本数23), 0.85 (標本数11), 0.82 (標本数26), 0.96 (標本数3), 1.0 (標本数1)、適合率の平均値は0.85, 0.84, 0.89, 0.96, 1.0であった。得られた再現率、適合率に対し、それぞれ分散分析 ($\alpha = 0.1$) を行ったところ、いずれの拍子においても有意差はなかった。このことから、提案手法によるIR分析は拍子の影響を受けないと考えられる。

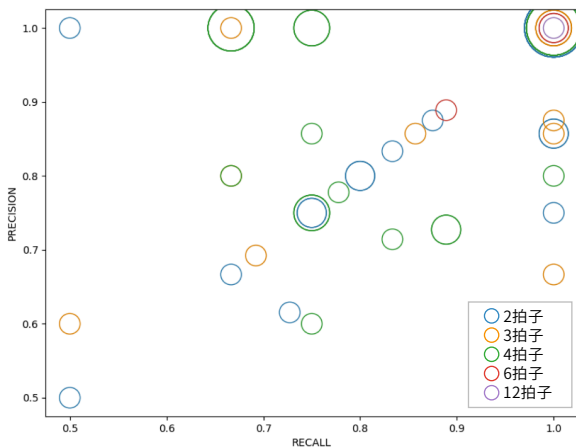


図 10 拍子ごとの再現率および適合率

図 11 誤った推定結果 (再現率 0.5, 適合率 0.6, F 値 0.54)

4.3 誤った推定例

評価値の低い例として図 11 のような場合がある。図 11 の推定結果において正しく推定できたシンボルは D のみであった。これは、シンボル D の開始音は全て音価に基づくクロージャであったこと、拍頭であったことが推測される。一方、誤った推定をしてしまったシンボルは P, IP である。この理由としては、旋律表現にあると推測される。旋律表現を場合分けされた音程 ($n = 7$) とする場合、第一小節 2 音目から始まる「ファファレ」と 3 音目から始まる「ファレシ」の区別がなくなってしまうため、先に出現する「ファファレ」にシンボルが付与されてしまった。

これを解消するためには、シンボル付与の優先順位を定義する必要があると考える。IR モデルにおいては、シンボル P, D, R は暗意実現、それ以外は暗意否定のシンボルと定義されていることから、シンボル間には何らかの順序が存在すると思われる。こうした理由から、Narmour は「ファファレ」にシンボル IP を付与するのではなく、「ファレシ」にシンボル P を付与されたのだと推測する。

また、IR シンボル付与方法に関して検討すべき事項もある。第一小節 3 拍目から始まる「レシシ」に関しては、図 7 に示したように Narmour の定義では、other というシンボルが振られるはずだが、分析例ではシンボル VR となっている。このような場合には正しくシンボル開始音が推定されたとしても、正解データと推定結果が異なってしまう。そのため、Narmour の定義に沿った IR 分析を行うのであれば、シンボル付与方法について再度検討する必要がある。

5. おわりに

本研究では、IR 分析を行うためのシンボル開始音推定方法について述べた。本研究のまとめは以下の 2 点である。

● シンボル開始音推定方法の提案および評価

音価、音高の遷移、拍節構造に基づくシンボル開始音推定のためのルールを提案した。それに付随して、旋律表現方法、シンボル付与数、シンボルの統合に関する検討も行った。作成した正解データを元に推定結果の性能を調査したところ、再現率は 0.836、適合率は 0.844、F 値は 0.84 となった。

● 提案システムの改善点

誤ったシンボル開始音推定の要因として旋律の遷移に関する特徴量および、シンボル付与方法が考えられる。本研究では、頻出する音高の遷移パターンは暗意-実現関係にある音列であるという仮定のもと旋律の遷移に関する特徴量を提案したため、IR 分析における暗黙知であろうシンボル間の順序を考慮できなかった。

今後、シンボル間の順序の決定方法を含むシンボル付与方法について考えていくとともに、応用システムのための IR 分析結果に基づく特徴量の設計を目指す。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 (16H01744, 19H04157) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Bob Snyder, 須藤 貢明, 杵鞭 広美 (訳) : 音楽と記憶 認知心理学と情報理論からのアプローチ, 音楽之友社, p.46 (2003).
- [2] Cuthbert, Michael Scott, and Christopher Ariza : music21: A toolkit for computer-aided musicology and symbolic music data (2010).
- [3] Eugene Narmour : The Analysis and Cognition of Basic Melodic Structures”, The University of Chicago Press, (1990).
- [4] Eugene Narmour: The Analysis and Cognition of Melodic Complexity, The University of Chicago Press, (1992).
- [5] Grachten, Maarten, Josep Lluís Arcos Rosell, and Ramón López de Mántaras : Melody retrieval using the implication/realization model. MIREX (2005).
- [6] ”GTTM Database”, <http://gttm.jp/gttm/ja/database/> (参照 2021 年 2 月 15 日)
- [7] 波多野 誼余夫 : 音楽と認知, 東京大学出版会, pp.1-40 (1989).
- [8] 能登楓, 竹川住成, 平田圭二. 暗意実現モデルに基づき作曲家識別を行う HMM について : 情報処理学会研究報告, Vol.2018-MUS-118, No.18, pp.1-6, 2018.
- [9] Paul Fraisse : Rhythm and tempo. Academic Press, pp.149-180, (1982).
- [10] 東条敏, 平田圭二, 音楽・数学・言語 : 情報科学が拓く音楽の地平, 近代科学社, p.113 (2017).
- [11] 矢澤櫻子. 音楽理論暗意実現モデルに基づく楽曲解析に関する研究 : 筑波大学, 博士論文, (2016).