2次元LRパーサによる音楽演奏MIDI信号からの自動採譜*

☆高宗典玄，亀岡弘和（東大院・情報理工），嵯峨山茂樹（東大院・情報理工/現：NII）

1　はじめに

自動採譜とは，人間が演奏した音楽音響信号から自動で楽譜を推定することであり，音声信号処理における音声認識の位置に対応する，音楽音響信号処理における重要な課題のひとつである．

自動採譜には大きく分けて2つの段階がある．1つは音響信号から音高や発音時刻，消音時刻を推定する多重音解析であり [1]，もう1つは多重音解析で推定された音高や発音時刻，消音時刻からテンポや音価を推定するリズム解析である [2, 3, 4]．本研究では，後者のリズム解析の問題を取り扱うため，人間が演奏したMIDI信号からの自動採譜を目指す．

リズム解析の問題は，人間の演奏が多くの場合テンポ変動や発音・消音時刻のゆらぎを含んでいるため，非常に困難な問題となっている．これは，観測上の時間においての音の長さは，楽譜上の音の長さとテンポに依存するため，どのような楽譜から演奏されたかとどのようなテンポ変動を行ったかを一意に分解することは不可能であることに由来する．しかし，我々は多くの場合，そのようなテンポ変動や発音・消音時刻のゆらぎを含んだ演奏を聴いても，楽譜やテンポを推定することが出来る．これは，人間は楽譜やテンポに対して先見知識があり，その先見知識に沿うような楽譜とテンポを推定していると考えられる．そこで，本研究では先見知識として楽譜やテンポの確率的生成モデルを構築し，それを確率的逆問題として楽譜やテンポを同時に推定することを考える．

本稿では，2章で生成モデルの説明を行い，その解析アルゴリズムを3章で行う．そして，提案手法の動作を確認するために採譜の実験を4章で行い，本稿のまとめを5章で行う．

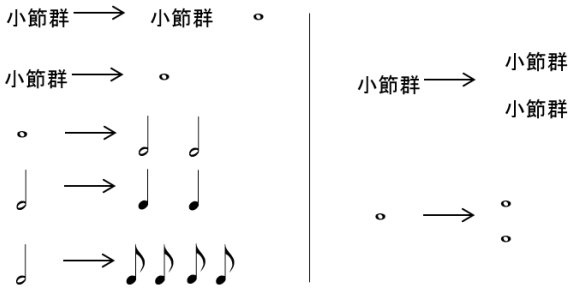


Fig. 1　2次元PCFGの文法例．左側は時間方向の文法，右側は音高方向の文法の例になっている．

2　音楽演奏MIDI信号の生成モデル

2.1　楽譜の生成モデル

音楽を時間方向に見ていくと，モチーフやフレーズなどといった階層構造を持つことが分かる．これは，自然言語が単語や文節，文といった階層構造を持つことと似ているため，そのような階層構造を扱う自然言語処理で用いられているモデルである確率文脈自由文法 (Probabilistic Context-Free Grammar; PCFG) を利用できないかということが考えられる．一方，音楽には声部やパートといった，音高方向の階層構造も有しているため，単純にPCFGを音楽に適用することは出来ない．そこで，このような，時間方向と音高方向の二つの方向の階層構造を表すモデルとして，我々の研究室で提案された2次元PCFG[5] を用いることを考える．2次元PCFGの生成規則の例をFig. 1に示す．これを用いることで，起こりうるすべての楽譜に対し，少ない生成規則で生成確率を計算することができるようになる．ここで実際の楽譜で頻出するリズムが出現する確率を高く，あまり現れないリズムが出現する確率を低く設定することで，楽譜の尤もらしさを生成確率で表現できる．

2.2　テンポ・発音時刻・消音時刻の生成モデル

人間が音楽を演奏する際，テンポは必ずしも一定ではなく，緩やかな変動を伴っている場合が

---

* “2-Dimensional LR Parser for Automatic Transcription from MIDI Signals of Music Performance” by Takamune Norihiro, Kameoka Hirokazu (Univ. of Tokyo), Sagayama Shigeki (Univ. of Tokyo / currently: National Institute of Informatics).

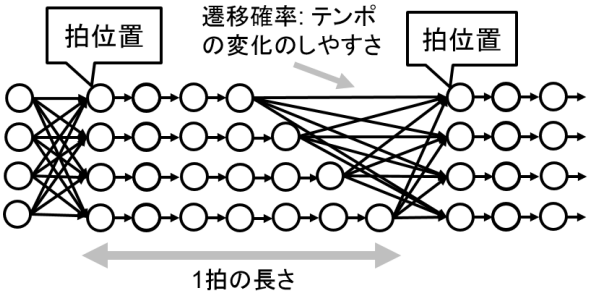


Fig. 2　テンポ・発音時刻・消音時刻を生成する有限状態空間

ほとんどである．また，各音の発音時刻や消音時刻も物理的な制約や，演奏上の表情付けで楽譜上の位置からずれることがある．そこで，Fig. 2 に示すような有限状態空間を用いてテンポ変動や発音時刻・消音時刻のずれの生成をモデル化することを考える．これは，各状態が楽譜上のどの位置にいるのかを表し，演奏の時間がある単位時間進むごとに状態を遷移し，楽譜上の発音時刻，消音時刻に対応する状態の前後の状態から発音や消音の指令を出力するモデルである．ここで，各 left-to-right のパスの中の状態数がそのパスを通るときの 1 拍の時間を表し，パス間の遷移確率は 1 拍の長さがどう変化しやすいか，つまりテンポ変動の起きやすさを表す．そこで，ここではテンポ変動の滑らかさを表現するために，遷移確率を前の拍の長さを平均，前の拍の長さの 2 乗に比例する値を分散とした正規分布に比例する値となるように設計する．また，発音時刻，消音時刻のずれを表現するために，どの状態から発音時刻，消音時刻を出力するかを表す確率を楽譜上の発音時刻，消音時刻を表す状態からその状態を平均，その状態を含む白の長さの 2 乗に比例する値を分散とした正規分布に比例する値となるように設計する．

3　解析アルゴリズム

3.1　2 次元 LR パーサ

PCFG を解析する手法には一般化 LR 法や CYK 法等がある．しかし，これらの手法は時間方向の順序関係が重要であるため，音高方向に拡張した 2 次元 PCFG には単純に適用することが出来ない．例えば，ある 2 拍の時間のうち最初の拍に 4 分音符が二つ (a と b とする)，次の拍に 4 分音符が二つ (c と d とする) あるという単純な場合について考える．この場合においても，

1) a と c，b と d がそれぞれ時間方向の構造を持つ場合
2) a と d，b と c がそれぞれ時間方向の構造を持つ場合
3) a と b，c と d がそれぞれ音高方向の構造を持つ場合

と 3 種類の場合を持ってしまう．これが，音符数が多くなっていったときに，どの音符同士が時間方向の文法適用により分割されたかの並びをすべて数え上げようとすると指数関数的に場合の数が増大する．そこで，様々な並びを考慮に入れつつもビームサーチで確率が低い候補を切り落とすことで，計算量を削減するという方針を考える．このため，時間的に順番に解析していき，解析途中で確率を評価することが出来る PCFG の解析手法である一般化 LR 法 [6] を応用することを考える．

一般化 LR 法は，現在入ってきた入力とこれまでの構文解析の履歴からどのような解析を行うかという規則をあらかじめ計算しておき，入力を逐次的に読み込みながら規則に従い解析を行うので，非常に効率のよい構文解析手法である．一般化 LR 法の解析器 (以下パーサと呼ぶ) は構文解析の履歴に対応する状態をスタックとして持ち，その先頭の状態と入力から次の 4 つの行動を選択する．

1) shift: 現在入ってきた入力を取り込み，次の状態をスタックする．
2) reduce: 文法規則を行い，対応する状態をスタックから削除し，スタックの先頭の状態と文法規則に従い次の状態をスタックする．
3) reject: 文法解析が行えないので，パーサを消滅させる．
4) accept: 文法解析が成功する．

また，どの行動を行うかが複数存在する場合はその分だけパーサを増やしたのち，それぞれ計算する．このため，一般にはパーサが指数関数的に増大し，計算が困難になるが，ビームサーチなどを行うことにより，近似的に計算が可能になる．

この一般化 LR 法を 2 次元 PCFG に応用するために，本研究ではパーサを複数内包する 2 次

元 LR パーサを提案する．これは，入力が入ってきたときに 2 次元 LR パーサとしては次の 2 つの行動を選択する．

1) 内包する各パーサに入力を割り振る．

2) パーサを新規作成し，そのパーサに入力する．

また，内包する各パーサは一般化 LR 法のパーサとほぼ同様の挙動を示すが，新しく次に示す行動を追加する．reduce の文法規則が音高方向の文法規則であった場合，他のパーサが同じ文法規則で reduce するかチェックして，音高方向の文法が正しく行えるならばパーサの統合を行う．ここで，1) の割り振り方や，1) と 2) の選択の仕方は任意性があり，また，各パーサが行う行動にも任意性がある場合があるので，一般化 LR 法と同様に 2 次元 LR パーサを増やしたのち，それぞれ計算し，ビームサーチによる計算量の削減を行う．

また，同じ声部の連続する音は音高が近い場合が多いので，1) の入力の割り当ての時に，そのパーサに直前に入ってきた音の音高からどれだけ離れている音が入力されるかを確率で表し，近い音高が連続しやすいようにする．このときの確率を，平均がすでに入ってきた音高の正規分布に比例する確率とする．

3.2 有限状態空間内を遷移する 2 次元 LR パーサ

3.1 節で示した 2 次元 LR パーサに入力されるシンボルは楽譜上の発音時刻，消音時刻であるべきであるので，2.2 節で示したテンポや発音時刻，消音時刻の生成モデルを考えると，次の解析アルゴリズムが考えられる．2 次元 LR パーサが Fig. 2 で示される状態空間内を単位時間ごとに遷移していき，MIDI 信号上の発音時刻や消音時刻が観測されると，現在いる状態に対応する楽譜上の発音時刻，消音時刻を推定し，それを 2 次元 LR パーサの入力とし解析する．

つまり，全体の挙動として，以下のようになる．

1) 単位時間が進むごとに状態を遷移する．遷移した結果，各状態に存在する 2 次元 LR パーサの数がビーム幅を超えた場合，各 2 次元 LR パーサの確率値の大きいほうからビーム幅の分だけ残し，他を削除する (ビームサーチ)．

2) 発音時刻が観測されると現在の状態から楽譜上の発音時刻を推定して，2 次元 LR パーサに入力する．2 次元 LR パーサは入力を現在保持しているパーサに対し，それぞれに入力した場合ついてとパーサを新規作成した場合について計算する．各パーサは入力に従い解析を行い，reject が起きればパーサを削除し，パーサの統合の指令が起きたら，他のパーサが同じパーサの統合の指令が起きるかどうかをチェックし，起きるならばパーサを統合を行い，解析を進める．すべての 2 次元 LR パーサが解析を終えると，現在の確率値が大きいほうからビーム幅の分だけを残し，他を削除する (ビームサーチ)．

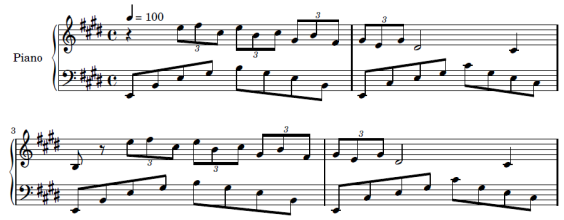
3) 消音時刻が観測されると現在の状態から楽譜上の発音時刻を推定して，2 次元 LR パーサに入力する．2 次元 LR パーサは入力を現在保持しているパーサに対し，対応する発音時刻を解析したパーサに入力する．以降の処理は発音時刻の処理と同様である．ただし，消音時刻と発音時刻の順序が入れ替わることがあるため，2) の処理のとき，入力しようとするパーサの最後に入力された音の消音時刻が処理されていなければ，強制的に 3) の処理を行い，2) の処理を行う．

4) すべての信号を処理した後は各 2 次元 LR パーサが accept するかどうかをチェックして，accept したもののうち確率が最大のものを採譜結果とする．

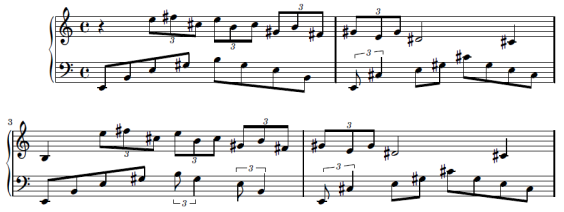
4 採譜実験

提案手法の動作を確認するために，C. Debussy 作曲 “Arabesque No. 1” の 6〜9 小節を人間が演奏した MIDI 信号を解析した．この曲は 2 声部あり，上パートが三連符，下パートが八分音符となっているため，声部を分離せず発音時刻や消音時刻の分布から楽譜を推定する手法には不向きな曲となっており，声部の分離を同時に行う本手法の有効性を確かめるのに適していると考えられる．

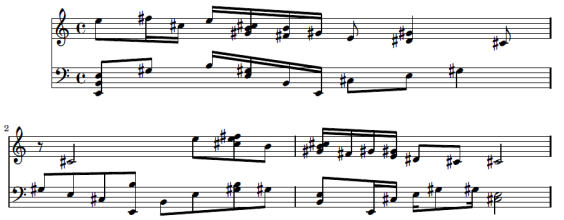
比較対象として，武田らによって提案された手法 [4] を用いた．この手法は声部を分離せず，時間方向の 1 次元に射影した手法であるため，この曲においてはうまく推定されないことが予想



(a) 正解楽譜



(b) 提案手法による採譜結果



(c) 従来手法による採譜結果

Fig. 3　C. Debussy 作曲 “Arabesque No. 1” の 6〜9 小節の正解楽譜 (a)，提案手法による採譜結果 (b)，従来法による採譜結果 (c)

される．以下この手法を従来法と表記する．

提案手法の各種パラメータは，状態遷移する単位時間を 30 ms，1 拍の長さの最小値を 0.3 s，最大値を 1.5 s，状態遷移確率が比例する正規分布の標準偏差を前の拍の長さの 0.03 倍，どの状態が発音時刻を出力するかを表す確率が比例する正規分布の標準偏差を属する拍の長さの 0.02 倍，どの状態が消音時刻を出力するかを表す確率が比例する正規分布の標準偏差を属する拍の長さの 0.5 倍，ピッチに関する標準偏差を 7 半音，拍の最初の状態におけるビーム幅を 5000，それ以外の各状態におけるビーム幅を 3000，パーサが新規作成される確率を 0.0001，声部の上限を 5 とした．さらに，声部が多くなりすぎないように $0.001^{(\text{声部数}-1)}$ をそれぞれの 2 次元 LR パーサに乗算して 2 次元 LR パーサの確率として評価した．また，2 次元 PCFG の各文法適用確率は人手で適当に設定した．

正解となる楽譜とそれぞれの手法の採譜結果を Fig. 3 に示す．採譜結果を見ると，予想されたとおり従来法ではうまく推定することが出来ず，一方，本手法では 2 声部がうまく分離され，それぞれのリズムも多少の間違いはあるものの，非常に正解に近い結果を得られた．このような間違いは，前後のリズムがどのようなものが現れたかを用いることで推定が可能と考えられるので，文法の精緻化を行うことにより改善が見込める．

5　まとめ

本稿では，リズムとテンポの不確定性を含む MIDI 信号からの自動採譜という問題に対し，リズムやテンポ，発音時刻，消音時刻の生成過程を考え，統合的に解くことによりその解決を試みた．そして，リズムの生成モデルとして 2 次元 PCFG を用い，その解析アルゴリズムとして 2 次元 LR パーサを提案した．実験により，多声部でリズムが複雑なものな曲に対し，本手法の採譜結果を示した．今後の課題として，現在は人手で与えられている 2 次元 PCFG の文法適用確率を学習することや，タイなどの複雑な楽譜への対応，文法の精緻化と多重音解析のモデルと合わせることで音響信号からの自動採譜システムの構築が挙げられる．

参考文献

[1] Klapuri, A., et al. *“Signal processing methods for music transcription, ”* Springer, 2006.

[2] Raphael, C. *“Automated Rhythm Transcription, ”* Proc. of ISMIR. 2001.

[3] Cemgil, A. T., et al. *“Monte Carlo methods for tempo tracking and rhythm quantization, ”* JAIR. Vol. 18, No. 1, pp 45 – 81, 2003.

[4] 武田ら, “確率モデルによる多声音楽演奏の MIDI 信号のリズム認識,” 情処論, Vol. 45, No. 3, pp.670 – 679, 2004.

[5] Kameoka, H., et al. *“Context-free 2D tree structure model of musical notes for Bayesian modeling of polyphonic spectrograms,”* Proc. of ISMIR. 2012.

[6] Tomita, M. *“Efficient parsing for natural language: a fast algorithm for practical systems, ”* Vol. 8. Kluwer Academic Pub, 1985.