

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：32682

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25880029

研究課題名(和文)出力合流型隠れマルコフモデルの提案とその音楽情報処理への応用の開拓

研究課題名(英文) Merged-Output Hidden Markov Model and Its Applications in Music Information Processing

研究代表者

中村 栄太 (Nakamura, Eita)

明治大学・研究・知財戦略機構・研究推進員(ポスト・ドクター)

研究者番号：10707574

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：複数の楽器や声部が合わさった音楽の構造「多声部音楽構造」を適切に記述する統計モデル「出力合流HMM」を構築し、複数の音楽情報処理へ応用して声部を捉えた情報処理手法の有効性を確認した。各楽器・声部を一つのHMM(隠れマルコフモデル)で記述し、複数の楽器に対応するHMMからの出力を合流することにより、多声部音楽の統計モデルを構成した。またこのモデルの学習・推論アルゴリズムを導出した。これを自動伴奏・自動採譜・ピアノ運指決定・声部分離・自動ピアノ編曲などの情報処理課題に適用して、従来よりも高精度・高性能な情報処理手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：A statistical model that describes music phenomena with multiple musical instruments and voice parts, named merged-output hidden Markov model (HMM), is constructed and applied to music information processing. The model is constructed by merging the outputs from multiple HMMs, each of which corresponds to one instrument or one voice part. Efficient inference algorithms for the model are derived. The model is applied to music processing tasks including automatic music accompaniment, music transcription, piano fingering optimisation, voice part separation, and automatic piano arrangement, yielding processing techniques with higher performance than conventional methods.

研究分野：音楽情報処理

キーワード：出力合流隠れマルコフモデル 統計的音楽モデル 統計的演奏モデル 自動伴奏 自動採譜 ピアノ運指 自動編曲

### 1. 研究開始当初の背景

音楽における情報処理技術の応用は多岐に渡っており、国内外で盛んに研究されている。認識寄りの話題として、自動採譜やリズム採譜、和音認識、ジャンル認識および作曲家認識、そして楽曲構造解析などがある。また演奏支援寄りの応用として、自動伴奏やピアノやギターの運指決定など、さらに作曲支援寄りの話題として自動作曲や自動和声付け、自動編曲、演奏表情付けなどがある。

研究の手法としては、人工知能的な手法が用いられ、初期には人手による規則を用いた手法などが提案されている。近年では統計モデルや機械学習を取り入れた手法が多数提案されており、これらは世界的な主流となってきた。特に、楽曲や演奏を生成過程として確率モデルにより記述し、その逆問題を解く形で情報処理を行う手法は多く用いられており、その重要性和有効性が広く認識されている。例えば、自動伴奏に必要な楽譜追跡（演奏と楽譜との実時間整合）では、人間の演奏がテンポの揺らぎや演奏誤り等を持っており単純には演奏音符と楽譜音符の対応付けを行えないことが問題である。これを解決するため、これらの演奏の多様性や不確実性を確率的に表現した、演奏生成の統計モデルを構築し、確率的推論による楽譜追跡アルゴリズムを導出する方法が研究されてきた。数理的基盤としては、HMM（隠れマルコフモデル）が広く用いられている。

こうした研究の中で、従来の HMM に基づく演奏モデルでは、ピアノの両手演奏の様に複数の声部からなる音楽の演奏において各声部間の同期が緩くなる現象や時間的に広がった装飾音が重なることによる演奏音符の順序の不確実性を記述することが難しく、応用面でも問題が生じていた。さらに一般には、音楽で一般的である複数の楽器や声部が合わさった構造（多声部音楽構造）を適切に記述する統計モデルが確立しておらず、自動伴奏の他、自動採譜やピアノ運指決定など演奏と作曲の両面の情報処理において大きな課題となっていた。

### 2. 研究の目的

緩く同期し合う複数の時系列を記述する出力合流 HMM を構築・提案し、複数の音楽情報処理へ応用する。これにより音楽の多声部構造を記述する統計モデルを確立し、同時に情報処理における有効性を確認する。具体的には、以下の項目に取り組む。

(1) 多声部構造を記述する統計モデルの構築には、従来の統計モデルを拡張する必要がある。この際、モデル構成と情報処理への応用に関する従来研究の結果を生かせることが好ましい。そこで、従来の HMM との関係が明確であり、かつ声部間の緩い同期性などを含む多声部構造を取り込めるモデルを構成する。この際必要となる、各種の学習アルゴ

リズムや推論アルゴリズムの導出を行う。

(2) 構成したモデルを以下の情報処理に適応する。それに必要な具体的なモデルの細部の構成やパラメータ推定を行う。

① 自動伴奏・楽譜追跡：人間の演奏に対して自動で同期してコンピューターが伴奏・合奏を行う。

② 自動採譜：演奏音から楽譜情報（音高や音長など）を推定する。

③ ピアノ運指決定：任意のピアノ楽譜に対して、適切な運指（指使い）を自動で決定する。

④ 例えば、ピアノ演奏で右手パート（あるいはメロディーパート）だけ分離するといった声部分離手法を確立する。

⑤ 自動編曲：出力合流モデルに基づき、合奏曲をピアノ演奏用に編曲する手法を開発する。

### 3. 研究の方法

(1) 従来多く研究されている HMM により一つの楽器・声部を記述し（声部 HMM と呼ぶ）、複数の楽器・声部に対応する HMM を合わせることで多声部音楽を記述する統計モデルの枠組み「出力合流 HMM」を構築する。まず、各声部モデルが独立の場合を考え、次に声部間の依存性を導入したモデルを構成する。「各音符はどれか一つの声部 HMM からの出力に対応し、その際には他の声部 HMM は状態遷移・出力をしない」との自然な仮定を置くことで、効率的な推論アルゴリズムを導出する。

(2) 上で構成したモデルに基づき従来の HMM に基づく情報処理研究を拡張して、多声部音楽により適した情報処理手法を構成し、アルゴリズムの評価を通して有効性を確認する。

① 自動伴奏への応用に関しては、テンポ変動や演奏誤り、任意の弾き直し・弾き飛ばしなどを記述する従来の演奏モデルを用いて多声部演奏のモデルを構成する。直積 HMM や Temporal HMM などの従来モデルが持つ利点である、高速推定アルゴリズムが本研究での拡張によっても適用可能であることを示す。ポリリズム（声部間でリズムが異なること）を持つ曲や複雑な装飾音がある曲を用いて定量評価を行い、拡張による推定精度の変化を調べる。

② 自動採譜では、電子ピアノの演奏の様に音高情報が与えられた場合に着目し、テンポ変化や時間的な動作ノイズを含む演奏から楽譜の音価を推定する問題に取り組む（リズム採譜と呼ぶ）。従来の HMM に基づく演奏・楽譜モデルを出力合流 HMM により多声部モデルに拡張することにより、ポリリズムを持つピアノ演奏のリズム採譜の精度が向上することを示す。

③ ピアノ運指決定では、両手の運指が同時

に決定可能な手法を確立する。従来提案されていたピアノ運指決定手法は全て、右手あるいは左手のどちらか一方にのみ適用可能である。両手同時の運指決定を行うには、膨大な組み合わせ数を処理できる手法が必要であり、従来の手法の単純な拡張では難しかった。従来提案されていた HMM に基づく片手のピアノ運指モデルを、和音を含む両手演奏のモデルに拡張してこの問題を解決する。

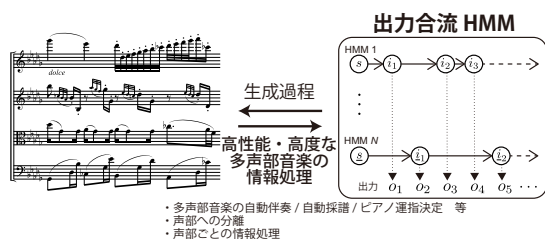
④ 出力合流 HMM では、声部情報は確率変数として表され、入力音符列に対する状態系列の推定の際に声部情報が得られる。例えば、両手の運指モデルを生成モデルとしてピアノ演奏に適用すると、結果的に各音符がどちらの手で弾かれやすいかという推定が行える。声部情報の取得だけであれば、生成モデルの各声部はガウシアン出力確率などより単純なモデルでも記述可能であるため、計算コストの少ない手法の開発を行い、実データで定量的に評価する。

⑤ 合奏曲をピアノ用に編曲するには、音符の省略やオクターブ移動などの編集操作が必要である。まず、上の運指モデルを基にピアノ演奏の生成モデルを考え、次にピアノ曲を合奏曲へこれらの編集操作を含むマッピングにより変換する確率過程を考える。この逆過程を確率推論することにより自動編曲をする定式化を提案し、評価により有効性を確かめる。

#### 4. 研究成果

##### (1)

① 多声部音楽の基本モデル構成に関しては、各声部・楽器を HMM で記述し、複数の声部に対応する HMM からの出力を合流することにより多声部音楽の生成過程を記述する出力合流 HMM の枠組みを構築した。例えば 2 声部の場合、各声部が独立な場合には、各々の状態数を  $I, J$  とすると、出力合流 HMM の状態数は  $2IJ$  であり、Viterbi アルゴリズムの更新に必要な計算量は  $O(2IJ(I+J))$  にまで削減可能なアルゴリズムを導出した。同様のアルゴリズムは Forward 及び Backward アルゴリズムに対しても導出した。また、声部間の依存性を表現する相互作用項を導入しても、計算量のオーダーを変えずに済むことを示した。



② 出力合流 HMM を構成する際の各声部の HMM (声部 HMM) が特殊な場合には、さら

に計算量の削減が可能であることを示し、具体的な高速アルゴリズムを導入した。

特に、声部 HMM がマルコフモデルの場合には、計算量が  $O(2H)$  ( $H$  はモデル依存のパラメータ。ピアノ演奏モデルの場合には  $H=50$  程度) に削減できることを示した。また声部 HMM が直積 HMM である時には、近似的に直積 HMM と同様の計算量オーダーの削減が可能であることを示した。さらに、音程や音符間の発音時間間隔などの記述で使われる自己回帰 HMM を声部 HMM として持つ場合にも、膨大な計算量増大を避けた近似計算が可能であることを示した。

##### (2)

① 自動伴奏に関しては、上に述べた直積 HMM を声部 HMM とする出力合流 HMM を構成し、評価した。この結果、ポリリズムを含む楽曲や、和音やアルペジオと同時に鳴る長いトリルなどを含む楽曲において、楽譜追跡の認識誤りが約 50% 削減できることが確認された。またピアノ演奏の両手間の非同期性により音符の順序入れ換えが起こった演奏でも高精度で楽譜追跡が可能であることを確認した。

一方で、予想通り従来の HMM よりも計算量がかかなり増大することが分かった。これを解決するには、声部処理が必要ない楽譜 (あるいは楽譜の部分) では従来の HMM を代用することが有効である。この選択の自動化または手動選択のための UI の作成は今後の課題である。

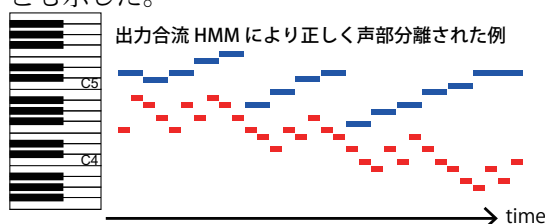
② 自動採譜に関しては、従来の HMM によるリズム採譜では、ポリリズム楽節の演奏の採譜に課題が残り、この解決には言語モデルと演奏モデルの両方において改良が必要であることを指摘した。出力合流 HMM を用いて、多声部の楽譜に基づくピアノの両手演奏を記述するモデルを構成した。これを、ポリリズムを持つ複数の楽曲で評価したところ、従来の HMM よりも高精度でリズム採譜が可能ことが確認された。

リズム採譜の系統的評価のためには、採譜結果の修正に必要な楽譜編集コストに基づく評価手法が必要である。従来の採譜研究では、こうした評価手法は提案されておらず、系統評価も限定的である。考えられる理由として、楽譜の修正編集には、音符単位の編集に加えて、曲のある部分全体で一様に音価を 2 倍や半分にするなどの編集を考える必要がある。こうした評価手法の開発とリズム採譜の系統評価は今後の課題である。

③ ピアノ運指では、HMM による片手のピアノ運指モデルを用いた両手のピアノ運指モデルを構成した。これにより両手同時の運指決定が可能となった。しかし、計算量増大の問題により、このモデルの直接評価は難しい。次の項目で述べる声部分離の手法と合わせ

た両手同時の運指決定手法を開発して評価した。推定精度はおおよそ 55%程度であった。さらに大量のデータでの学習により精度が向上する可能性を確認した。

④ 運指モデルを単純化した、マルコフモデルを声部HMMとする出力合流モデルを構成して、ピアノ曲（あるいは任意の曲）を右手パートと左手パートに分離する手法を構築した。シンプルなHMMによる手法と比較し、より高精度で声部分離が行えることを確認した。また、下図にある様に、両手が狭い音域で演奏する場合にも、単純な鍵盤位置での分離では不可能な声部分離が可能であることも示した。



計算量的には、上記開発した高速アルゴリズムの適用により、一音符当たり 1 ms 未満（市販のノートパソコンで測定）で処理可能な高速なアルゴリズムを構築した。

⑤ 自動編曲に関しては、ピアノ運指モデルに基づく難易度の調整が可能なピアノ用編曲手法を構築した。上記のピアノ運指モデルと、編曲における音符編集のモデルを合体させた編曲モデルによるものであるが、従来の編曲手法では難しい、テンポや音符の密度による難易度調整が可能な編曲アルゴリズムの導出に成功した。



演奏難易度は、ピアノ運指モデルの確率コストの時間変化により定量化を行った。また編曲における音符の削除を表現するために編曲モデル自体も出力合流モデルに基づく定式化を行った。オーケストラ曲に対してアルゴリズムで編曲を行い、評価により難易度の調整が可能であることを確認した。一方で、非和声音の取り扱いなどで不十分な点があ

り、これは編曲モデルに和声法などの作曲知識を組み込むことで解決できると予想されるが、今後の課題である。この研究成果発表（学会発表⑤）は 2014 年度の情報処理学会山下記念研究賞に選ばれた。

5. 主な発表論文等  
（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 5 件）

① Eita Nakamura, Nobutaka Ono, Shigeki Sagayama, “Merged-Output HMM for Piano Fingering of Both Hands,” Proc. 15th International Society for Music Information Retrieval, pp. 531-536, 2014 年 10 月 30 日, 台北 (台湾) .  
[http://www.terasoft.com.tw/conf/ismir2014/proceedings/T096\\_251\\_Paper.pdf](http://www.terasoft.com.tw/conf/ismir2014/proceedings/T096_251_Paper.pdf)

② Eita Nakamura, Yasuyuki Saito, Nobutaka Ono, Shigeki Sagayama, “Merged-Output Hidden Markov Model for Score Following of MIDI Performance with Ornaments, Desynchronized Voices, Repeats and Skips,” Proc. Joint 40th International Computer Music Conference | 11th Sound and Music Computing Conference, pp. 1185-1192, 2014 年 9 月 18 日, アテネ (ギリシャ) .  
<http://hdl.handle.net/2027/spo.bbp2372.2014.182>

③ 中村栄太, 小野順貴, 嵯峨山茂樹, “出力合流隠れマルコフモデルに基づく多声部音楽のリズム採譜,” 第 104 回情報処理学会音楽情報科学研究会報告, Vol. 2014-MUS-104 No. 8, pp. 1-7, 2014 年 8 月 25 日, 京都大学 (京都府京都市) .  
[https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/?action=pages\\_view\\_main&active\\_action=repository\\_view\\_main\\_item\\_detail&item\\_id=102548&item\\_no=1&page\\_id=13&block\\_id=8](https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=102548&item_no=1&page_id=13&block_id=8)

④ Shigeki Sagayama, Tomohiko Nakamura, Eita Nakamura, Yasuyuki Saito, Hirokazu Kameoka, Nobutaka Ono, “Automatic Music Accompaniment Allowing Errors and Arbitrary Repeats and Jumps,” 167th Meeting of ASA, Proc. of Meetings on Acoustics Vol. 21 No. 035003, pp. 1-11, 2014 年 5 月 8 日, プロビデンス (アメリカ) .  
[招待講演]  
<http://scitation.aip.org/content/asa/journal/poma/21/1/10.1121/1.4904932>

⑤ 中村栄太, 小野順貴, 嵯峨山茂樹, “ピアノの両手運指モデルによる合奏曲のピアノ用自動編曲手法,” 第 101 回情報処理学会音楽

情報科学研究会報告, Vol. 2013-MUS-101  
No. 14, pp. 1-12, 2013年12月24日, 九州  
大学(福岡県福岡市).  
[https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/index.php?active\\_action=repository\\_view\\_main\\_item\\_detail&page\\_id=13&block\\_id=8&item\\_id=96804&item\\_no=1](https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/index.php?active_action=repository_view_main_item_detail&page_id=13&block_id=8&item_id=96804&item_no=1)

[その他]

ホームページ等

[http://www.onn.nii.ac.jp/enakamura\\_kenkyu.html](http://www.onn.nii.ac.jp/enakamura_kenkyu.html)

<http://researchmap.jp/eita-nakamura/?lang=japanese>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 栄太 (NAKAMURA, Eita)

明治大学・研究・知財戦略機構・研究推進  
員(ポストドクター)

研究者番号: 10707574

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

嵯峨山 茂樹 (SAGAYAMA, Shigeki)

明治大学・総合数理学部・教授

研究者番号: 00303321

小野 順貴 (ONO, Nobutaka)

国立情報学研究所・情報学プリンシプル研  
究系・准教授

研究者番号: 80334259

渡邊 健二 (WATANABE, Kenji)

東京藝術大学・音楽学部・教授