

研究終了報告書

「型理論に基づく音楽自動生成ツールの開発」

研究期間：2021年10月～2024年3月

研究者：叢 悠悠

1. 研究のねらい

音楽自動生成は、作曲という行為を数理科学的にモデル化するための学問である。これまで、ゲーム音楽の制作コスト削減や、一般市民の作曲支援を目的として、さまざまな音楽生成技術が開発されてきた。

音楽生成において最も重要なのは、「良い」音楽を生成することである。ここでいう「良さ」とは、メロディの進行のスムーズさや、和音の響きの美しさなどを指し、音楽理論の世界に存在する作曲規則に従うことである程度保証される。

良い音楽を生成するためのアプローチとして、音楽情報処理分野では確率ベースの手法が盛んに研究されている。しかし、これらの手法は生成された音楽が良いものであることを保証しない。特に、既存の手法は作曲規則を破った音楽を生成する可能性があるため、音楽理論教育等の場面で利用することが難しい。

本研究の第一の目標は、作曲規則への適合が保証された音楽自動生成を実現することである。これを達成するために、プログラミング言語分野で長年研究されている「カーリー・ハワード同型」を利用する。カーリー・ハワード同型とは、型と命題、プログラムと証明が一対一に対応するという考え方である。この考え方を音楽に当てはめると、作曲規則を型として表現し、その型を持つような音楽を生成することで、生成された音楽が規則に適合することを数学的に保証できる。その結果、音楽理論教育に用いる譜例の作成など、正しい音楽が必要とされる場面で音楽自動生成技術を適用できるようになる。

本研究の第二の目標は、良い音楽の生成に有用な技術をプログラミングで活用できるようにすることである。これを達成するために、音楽情報処理分野で広く使われている「重み」の概念を持つ一般的な型理論を開発する。重みは音楽の良さを表すものであり、作曲規則への適合度などを反映する。この概念を型理論に導入すると、与えられたデータが特定の性質をどの程度満たすかを型レベルで表現できるようになる。その結果、自動運転車など、柔軟な制御が伴うソフトウェアに対して型ベースのプログラム検証技術を適用できるようになる。

2. 研究成果

(1) 概要

研究期間中は、上述した第一の目標にフォーカスしつつ、第二の目標も意識しながら研究を行ってきた。具体的に取り組んだ課題は (a) 従来の型システムによる作曲規則の表現とその問題点の考察、(b) 音楽に特化した型システムの設計と実装、(c) より一般的な型システムの検討と応用例の提案の3つである。

(2) 詳細

(a) 従来の型システムによる作曲規則の表現とその問題点の考察

音楽理論の代表的な作曲技法として、対位法とよばれる技法がある。これは複数のメロディを重ね合わせるための技法であり、西洋音楽の基礎をなしている。対位法は明確な作曲規則を持つため、計算機で扱うのに適しており、音楽情報処理分野でもしばしば題材として取り上げられている。

本研究では、型を用いて対位法の規則に従った和音列を自動生成することを目指した。そのアプローチとして、篩型を用いて規則を表現するという方法をとった。篩型はデータの詳細な性質を記述できる型であり、データの種類を表すベース型とその性質を表す述語からなる。これを用いると、対位法に従った和音列はピッチとインターバルのペアのリストをベース型とし、「すべての和音は協和音である」「並達 5 度・並達 8 度を含まない」といった規則を述語とするような篩型として表現できる。

型を用いた生成手法の性能を評価するために、短いメロディに対して対旋律（はもりのメロディ）を自動生成する実験を行った。実験には型主導プログラム合成器 Synquid を使用し、対位法の規則を Synquid の文法で記述したうえで、「かえるの歌」の最初のフレーズに対して対旋律を自動生成させた（図 1 左）。

実験の結果、実装した対位法の規則に適合するものの、音楽的にはあまり良くない和音列が得られた（図 1 右）。具体的には、生成された対旋律にハ長調の音階上にはない音 G# が連続して現れており、それが原因で人間にとって不自然な音楽となってしまっている。一方で、音階上にはない音や同じ音の連続は完全に禁止されているわけではなく、適切な文脈で使用することは許されている。そのため、これらの規則を必須の規則と同様に、述語として篩型に持たせるのは不適切である。

以上より、従来の篩型システムは作曲規則を表現するのに不十分であることが分かった。そして、良い音楽を作るためには、型システムに必須でない規則を表現するための機構を持たせる必要があるという結論が得られた。

```
type CP = {Pis | intervalOK _v && motionOK _v}
```

```
frog :: CP
frog =
  Cons (Pair C Oct)
    (Cons (Pair D Maj6)
      (Cons (Pair E ??)
        (Cons (Pair F ??)
          (Cons (Pair E ??)
            (Cons (Pair D Maj6)
              (Cons (Pair C Oct) Nil)))))))
```



図 1. Synquid による和音列の表現(左)と実験で得られた和音列(右)

(b) 音楽に特化した型システムの設計と実装

(a) の結果を踏まえ、必須でない規則を表現可能な型システムとして、重み付き篩型システムを設計した。この型システムでは篩型の各述語に重みを付与することができ、それを用いて規則の重要度を詳細に指定することができる。たとえば、「すべての和音は協和音である」という必須の規則は (dissonant, $-\infty$) というマイナス無限大の重みを持つ述語で表現し、「同じ音を連続して使わない」という必須でない規則は (repeated, -30) という小さな負の重みを持つ述

語で表現する。

本研究では、上述のアイデアに基づく型システムを数学的に形式化した。まず、型の構文に重みというカテゴリを設け、述語列の各要素を述語と重みのペアとして定義した。次に、重みを注釈として持つ型判断を用いて、式全体の重みを部分式の重みから構成的に求めるような型規則を定義した(図 2 左)。

設計した型システムの妥当性を確認するために、構文と型規則を依存型付き言語 Agda で実装した(図 2 右)。そのうえで、(i) 必須・必須でない規則に適合する和音列、(ii) 必須の規則に適合しない和音列、(iii) 必須でない規則に適合しない和音列に対して型付けを行った。その結果、規則への適合度が高い和音列ほど大きな重みを持つ式として型付けされた。

$$\begin{array}{c}
 l : \text{list } T < \overline{\psi_1}, \overline{\psi_2} >, w \\
 \frac{e : T \quad \text{weights}(\overline{\psi_1} \ e) = w_1 \quad \text{weights}(\overline{\psi_2} \ (\text{last } l) \ e) = w_2}{l :: e : \text{list } T < \overline{\psi_1}, \overline{\psi_2} >, w + w_1 + w_2}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 \text{FS} = \text{list pi } < \overline{\psi_1}, \overline{\psi_2} > \\
 \overline{\psi_1} = \text{dissonant}_{-\infty}; \text{imperfectc}_{40}; \text{chromatic}_{-40} \\
 \overline{\psi_2} = \text{direct}_{58-\infty}; \text{contrary}_{50}; \text{repeated}_{-30}
 \end{array}$$

図 2. 和音列の型規則(左)と Agda における対位法の規則の表現(右)

(c) より一般的な型システムの検討と応用例の提案

(b) の成果を音楽以外のドメインに応用するため、一般の曖昧な命題を表現できる型システムを検討した。大まかなアイデアとしては、型に真偽の度合いを表す注釈を付与することで曖昧性を表現する。これにより、カーリー・ハワード同型を曖昧な命題と注釈付きの対応関係へと拡張することができる。

このような型システムの応用例として、近似計算、自然言語推論、自動作曲などを提案した。これらの応用例において、真偽の注釈はそれぞれ値の正確さ、命題の確実性、作曲規則への適合度を表す。このように、異なるドメインの事象を統一的な枠組みで扱うことができるようになると、それぞれの分野で独立して発展してきた技術を他の分野に応用することが可能になると期待される。たとえば、自然言語分野で型を使って発話を逐次的に解釈する技術が開発されているが、これを音楽に応用すると、正しいメロディを一音ずつ生成することができると考えられる(図 3)。

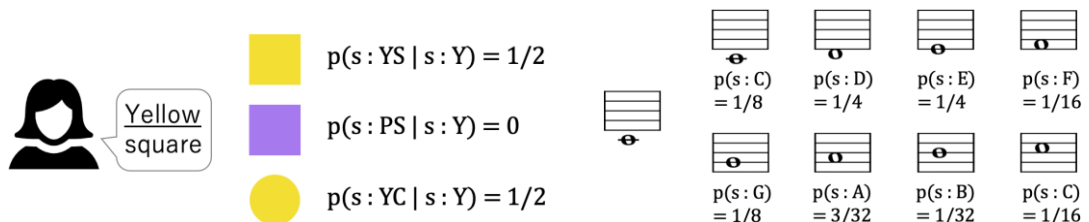


図 3. 型を用いた逐次的な推論(左)と作曲(右)

3. 今後の展開

今後の研究の方向性として、本研究で提案した型理論ベースの技術と、実世界で広く用いられている確率モデルベースの技術の融合が挙げられる。これらのアプローチは音楽自動生成において相補的な利点を持っている。具体的にいうと、型は理論的に正しい音楽を生成できるのに対し、確率モデルは芸術的に質の高い音楽を生成することができる。関連する研究として、自然言語処理分野において型を利用した推論とニューラルネットワークによる予測を組み合わせる取り組みがなされており、これをヒントに2つのアプローチの融合を図る予定である。

もう一つの方向性として、さまざまな分野の型理論研究者のネットワークの構築を考えている。本研究では型理論を音楽に応用し、そこで得た発想をプログラミングに活用することを検討した。国内外の研究に目を向けると、型理論はキルティングや自然言語意味論など、音楽以外のドメインにも広く適用されており、それらのアイデアがプログラミングで有用となる可能性は十分に考えられる。分野を跨いだ型理論コミュニティを形成し、研究者間で知識を共有・相互利用することで、革新的な技術を生み出せるのではないかと期待している。

4. 自己評価

(a) 研究目的の達成状況

提案時は良い音楽を生成することを目指していたが、アドバイザーの先生方からの助言を踏まえ、プログラミング言語的な面白さを追求することも意識して研究を行った。結果として、型に重みを持たせるという音楽から得た発想を、プログラミングで活用するというアイデアを提案することができた。これは、当初の目標であった音楽自動生成ツールと比較して、より汎用性・将来性のある成果であると考ええる。

(b) 研究の進め方

研究期間中は、国内外の学術会議に積極的に参加した。特に、複数の視点からフィードバックを得るために、プログラミング言語、音楽情報処理、自然言語意味論など、幅広い分野の会議で発表を行った。聴衆と交わした議論や査読者からのコメントは研究の方向性を考える際のヒントとなった。

(c) 研究成果の波及効果

プログラミング以外の目的で設計された型理論をプログラミングで活用するという考え方は、将来的に分野横断的な研究プロジェクトに発展する可能性がある。また、さまざまな分野で型理論の研究に従事する研究者のインタラクション促進にもつながると考えている。

上記は今後期待される波及効果であるが、すでに観察された波及効果もある。2023年に開催された国内ワークショップで、プログラミング言語の理論を音楽に応用するポスター発表があり、著者に動機を伺ったところ、自分が一年前のワークショップで行ったポスター発表に触発されたとのことだった。このような事例が増えるように、今後も研究成果の発信と関連分野の研究者との交流を行っていきたいと思っている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 1件

1. Youyou Cong. “Weighted Refinement Types for Counterpoint Composition” Proceedings of the 11th ACM SIGPLAN International Workshop on Functional Art, Music, Modelling, and Design (FARM ’23), pp. 2–7, 2023.

重み付き篩型システムを形式化した。具体的には、対位法の規則を各小節に対するものと隣り合う2小節に対するものに分類し、それらを重み付きの述語として表現したうえで、和音列の型を2つの述語列によって特徴付けされた篩型として定義した。この型システムをAgda言語で実装し、正しさの度合いが異なる複数の和音列について型付けを行ったところ、人間の直感と合致する型付け結果が得られた。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 0件(特許公開前のものは件数にのみ含む)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. Youyou Cong. “Towards Type-Based Music Composition”
11th International Workshop on Trends in Functional Programming in Education (TFPIE ’22), online, January 2022. (口頭発表)
2. 叢悠悠「型を利用した和音列の自動生成に向けて」
第133回音楽情報科学研究発表会(MUS 133), オンライン, 2022年1月. (デモ・萌芽・議論概要発表)
3. 叢悠悠「型を利用した音楽自動生成に向けて」
第24回プログラミングおよびプログラミング言語ワークショップ(PPL 2022), オンライン, 2022年3月. (ポスター発表・ポスター賞受賞)
4. Youyou Cong. “Type-Guided Music Composition”
YOW! Lambda Jam 2022, online, May 2022. (招待講演)
5. Youyou Cong. “Composing Music from Types”
The 28th International Conference on Types for Proofs and Programs, Nantes, France, June 2022. (招待講演)
6. Youyou Cong. “In Search of a Type Theory for Fuzzy Properties”
The 19th International Conference on Logic and Engineering of Natural Language Semantics (LENLS 19), Tokyo, Japan, November 2022. (口頭発表)
7. The 10th ACM SIGPLAN International Workshop on Functional Art, Music, Modelling and Design (FARM ’22), Ljubljana, Slovenia, September 2022. (プログラム委員長)