

創作ノート

リアルタイム奏法自動判別を用いたフルートと
ライブ・エレクトロニクスのための作品《Traversée II》の制作
Creating *Traversée II* for Flute and Live Electronics
Using Real-Time Playing Technique Recognition

プロジェクト・ニコラ

Nicolas BROCHEC

東京藝術大学音楽環境創造科

Department of Musical Creativity and the Environment,
Tokyo University of the Arts

概要

楽器の奏法は音楽演奏における基本的な要素であり、世界中の音楽文化に共通して見られる。20世紀における音色の探求を背景に、新たな奏法が作曲家と演奏者によって開発され、現代音楽において重要な特徴の一つとなった。同時に、音楽実践におけるテクノロジーの活用が進展し、楽器音と電子音を組み合わせたリアルタイム・ミクスト音楽が登場した。このような作品では、楽器と電子音との精密な同期が求められる。これに対応する手段として、演奏にスコアを同期させる自動楽譜追跡システム「Antescofo」が開発されたが、その追跡関数は音高と音のアタック情報のみに依存しており、特殊奏法（エオリアン・トーンなど）への対応が困難である。この問題を踏まえ、近年では深層学習を用いたリアルタイム奏法自動判別に関する研究が進められ、自動楽譜追跡システムを超え、リアルタイム・ミクスト音楽における創作の可能性が広がった。本稿では、2024年8月に東京藝術大学で開催されたImprotech Paris-Tokyo フェスティバルにて初演された自作品のフルートとライブ・エレクトロニクス（電子音）のための《Traversée II》における奏法自動判別システムの応用例を示し、その創造的可能性について考察する。

Instrumental playing techniques are fundamental to musical performance and are present in any musical tradition worldwide. Since the advent of timbral exploration during the twentieth century, composers and performers have developed new playing techniques that have become prominent in contemporary music. At the same time, with the increasing use of technology in music practices, genres

such as real-time mixed music, which combines instrumental and electronic sound materials, have emerged with the need for precise synchronization between instrumental and electronic parts. This led to Antescofo, an anticipatory score-following system that aligns the input score data with the instrumental performance. However, this system cannot follow contemporary playing techniques (e.g., aeolian tone), as its listening machine relies only on pitch and attack information. To overcome this limitation, recent research has proposed a system for the real-time recognition of instrumental playing techniques, which opens new creative possibilities for real-time mixed music beyond score-following applications. This paper presents the use of a newly developed real-time playing technique recognition system in the framework of a new music piece for flute and live electronics, *Traversée II*, premiered during the Improtech Paris-Tokyo festival held at Tokyo University of the Arts in August 2024, and showcases the creative potential of this tool.

1. はじめに

楽器奏法は、音楽表現における重要な要素であり (Bohlman 2013)、特に現代音楽においては、その拡張的な使用が著しく発展してきた。20世紀以降、作曲家たちは楽器の音色の可能性を拡張するために、特殊奏法を積極的に取り入れ、新しい音楽言語を切り開いてきた (Solomos 2019)。

音楽実践におけるテクノロジーの活用が進展の中で「ミクスト音楽」と呼ばれるジャンルが登場し、生演奏と電子音響素材を組み合わせた音楽が広く作られるよ

うになった。ミクスト音楽では、楽器と電子音のインタラクションが中心的な役割を果たし、その同期の方法はこれまで主にプリセットされたキューや手動操作に依存していた。そのため「Antescofo」(Cont 2008)という自動楽譜追跡システムが開発されたが、音高と音のアタックだけに依存されているので、エオリアン・トーンや重音などの特殊奏法を追跡できない。これは、ミクスト音楽制作の文脈において制限が生じている。

近年、人工知能技術の進展により、リアルタイムで楽器奏法を自動判別システムが開発されて実用化されつつある (Brochec and Tanaka 2023; Brochec, Tanaka, and Howie 2024)。こうしたシステムは、Antescofoの実用性を超え、演奏中の奏法に応じて電子音響処理を動的に変化させることを可能にし、または既存のインタラクティブ・システムとの統合や、より精密なインタラクションを実現する (Fiorini and Brochec 2024; Brochec, Fiorini, Malt, and Assayag 2025)。

本稿では、2024年8月に東京藝術大学で開催された *Improtech Paris-Tokyo* フェスティバルにて初演された、フルートとライブエレクトロニクス(電子音)のための作品《*Traversée II*》を取り上げる。この作品では、リアルタイムで特殊奏法を自動判別するシステムを用い、フルートの奏法に基づいて音響変調を切り替えることで、ミクスト音楽における新たなインタラクションの可能性を探求している。本稿は、著者自身がこれまで取り組んできた楽器奏法の自動判別に関する研究の続きに位置づけられるものである。

第2節ではフルートの奏法を紹介し、第3節ではリアルタイム奏法自動判別の手法を述べる。第4節では、判別システムをMaxに統合する方法について述べ、第5節では作品の中でこの奏法判別がどのように活用されているかを示す。第6節では、今後の作品への統合に向けた改善点について議論し、最後に結論を述べる。

2. フルートの奏法

フルートの音は、頭部の穴に息が吹き込まれた際に生じる空気の摩擦によって生成される (Fletcher and Rossing 2012)。奏法は、息の圧力、角度、歌口の唇の覆い方の変化によって多様になる (Meyer 2009)。普通に吹くと(通常奏法)、音高範囲はB2(約247ヘルツ)からG6(約3136ヘルツ)までだが、トング・ラムを用いることでC2(約130ヘルツ)まで拡張可能である。スタッカート、ピッツィカート、フラッターなどのアーティキュレーションは、舌の動きの調整を伴う。ビブラート、トリル、グリッサンドなど、息の流れ、指の動き、または歌口の唇の覆い方の変化によって生み出される。重音や微分音は、通常とは異なる運指法によって実現可能である (Levine and Mitropoulos-Bott 2019; Artaud and Geay 1980)。

3. 奏法自動判別手法

本章では、フルートの特殊奏法をリアルタイムで自動判別するためのシステムを紹介する。本研究で利用したシステムは、既存の研究 (Fiorini and Brochec 2024) に基づいて構築されたものである。このシステムは、大量のデータと深層学習を用いて、異なる演奏者や音響環境に対しても良好な性能を示している。実際の演奏環境では演奏者や音響環境が異なるため、このような一般化は、実用的な応用において重要な要件となる。このシステムの構造を述べるため、まずデータセットと前処理を述べる。次に、判別アルゴリズムを紹介する。最後には、結果を述べる。

3.1. データセット

一般的に、深層学習に基づくアプローチは、多量なデータを用いて学習されている。本研究の奏法自動判別システムを学習するため、既存の楽器奏法音源であるGFD (Brochec and Howie 2025) および FullSOL (Cella, Ghisi, LOSTANLEN, Lévy, Fineberg, and Maresz 2020) を使用した。FullSOL音源にはフルートにおける27種類の奏法が含まれており、GFD音源には11種類が含まれている。種類数の違いに対するため、GFDにある奏法種類によって、FullSOLの奏法種類を減らした。用いた奏法種類は次に書かれている：エオリアン・トーン、フラッター、キー・パーカッション、重音、通常奏法、ピッツカト、発声奏法、スタッカート、トング・ラム、トリル、ホイッスルトーン。GFD音源は2時間45分という長さで、FullSOL音源に比べてデータ量が多く、様々な音響環境が含まれているため、奏法自動判別システムの学習にはこちらを使用する。一方で、FullSOL音源はテスト用としてデータセットを使用する。

3.2. 音響前処理

既存研究 (Fiorini and Brochec 2024) に従い、サンプリングレートは24kHz、FFTの窓長は2048、ホップサイズは512とした。その後、128メルバンドの対数スケールを適用したメルフィルタバンクが使用された。各オーディオファイルから、最大15フレーム(約325ミリ秒)のログメルスペクトログラムをデータサンプルとして切り出した。さらに、学習データの不足を補うためにピッチシフト、ノイズ付加、タイムストレッチの3種類のデータ拡張(data augmentation)を適用し、データセット全体を4倍(合計11時間)に増加させた。

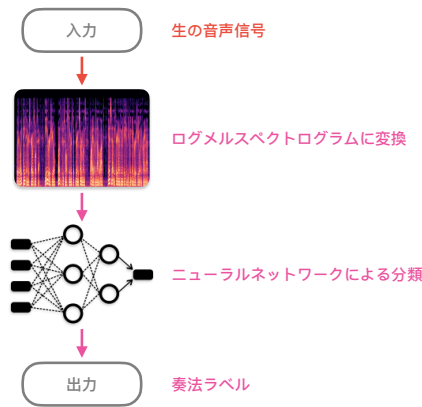


図 1: 奏法判別処理のフローチャート

3.3. 判別アルゴリズム

判別アルゴリズムには、楽器奏法判別において有効性が示されている深層畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を採用した (Ducher and Esling 2019; Martelloni, McPherson, and Barthet 2023; Brochec, Tanaka, and Howie 2024)。本研究で用いた CNN のアーキテクチャは、(Fiorini and Brochec 2024) にて提案された実装に準拠している。フローチャートは図 1 に示されており、入力として生の音声信号を使用し、それがログメルスペクトログラムに変換された後、ニューラルネットワークを通じて奏法ラベルが得られる。

3.4. 結果

この手法を用いた実験では、11 クラスにおける精度が 91.32 % を示した。

4. MAX に統合する手法

既存研究 (Fiorini and Brochec 2024) で提案されたシステムでは、Python コードがバックグラウンドで実行される構成が採用されている。音響信号は、BlackHole¹ という仮想オーディオデバイスを通じて Python に送られ、pyaudio を用いて処理される。このコードは、音響信号の分析を行い、判別モデルを用いて得られた結果を Python-OSC を使用して Max に送信する。しかし、この構成にはいくつかの欠点がある。まず、Python はインタプリタ型の言語であるため、処理が遅く、リアルタイム処理には適していない。また、OSC (Open Sound Control) は判別結果の送信に遅延が生じることがある (Wright 2005)。これらの課題を解決するために、Max

¹ BlackHole のウェブサイト: <https://existential.audio/blackhole/>

部分	奏法のセット	音響変調
第一	エオリアン・トーン	グラニューラル・シンセシス
	通常奏法	リバーブ
第二	通常奏法	リバーブ
	トリル	フリザーとリバーブ
第四	エオリアン・トーン	グラニューラル・シンセシス
	通常奏法	ディレイとピッチシフト
	トリル	ハーモナイザー
第五	エオリアン・トーン	グラニューラル・シンセシス
	通常奏法	ハーモナイザー
	フラッター	ハーモナイザー
	トリル	ハーモナイザー
第六	重音	リング・モジュレーション

表 1: 各部分の奏法のセットとの音響変調の対応関係

用のエクスターナルオブジェクトを開発した (実装の詳細は (Fiorini, Brochec, Borg, and Pasini 2025) を参照)。開発した「ipt~」というオブジェクトは、音響信号を直接受け取り、判別モデルを実行し、その結果に対して平滑化処理を行う機能を備えている²。このオブジェクトには主に 3 つのパラメータがあり、平滑化にかかる時間、平滑化の強度、そしてモデルに無音が入力されないようにするための閾値を設定できる。ipt~ を使用することで、Max における判別処理の遅延を 10 ミリ秒未満に抑えることができた。

5. 《TRAVERSÉE II》の奏法判別への応用

《Traversée II》は、フルートとライブ・エレクトロニクス (電子音) のための作品であり、IRCAM (フランス国立音響音楽研究所) と東京藝術大学が主催する「Improtech Paris-Tokyo フェスティバル」の一環として作曲・初演された。本節では、作品の構想、機材の設定、そして Max での実装について詳述する。

5.1. 《Traversée II》の構想

《Traversée II》の主なアイディアは、フルートの複数の奏法を探索に基づいており、それらをいくつかの部分に分けて提示している。各部分には、複数の奏法のセットが定められており、それぞれにリアルタイム音響変調が適応される。表 1 は、各部分における奏法と音響変調の対応関係を示している。開発された奏法自動判別システムは最大 11 種類の奏法を判別可能であるが、《Traversée II》は 5 種類の奏法のみを用いて作曲されている。各対応関係の選定は、作曲家 (著者) の芸術的判断に基づいて行われた。

² GitHub のレポジトリ https://github.com/nbrochec/ipt_tilde

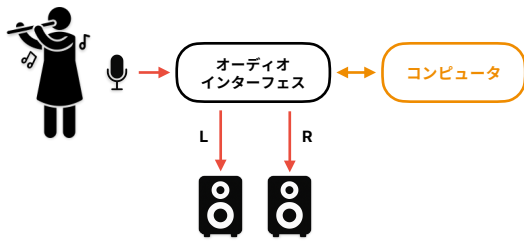


図 2: コンサートの音響設定構成図

5.2. 機材の設定

《Traversée II》を演奏するための設定には、マイク、オーディオインターフェース、Max を動作させるコンピュータ、そしてスピーカーが含まれる。音響信号の流れは、フルートの音がマイクで收音され、オーディオインターフェースを通じてコンピュータに送られる。Max はフルートの音をリアルタイムで変換し、その結果の音がオーディオインターフェースを通じてスピーカーから再生される。本作品はマルチチャンネルで演奏することも可能だが、Improtech コンサートではステレオによる固定再生で構成されていた。図 2 は設定の構成である。

5.3. Max で実装

Max における実装では、開発した ipt~オブジェクトの出力ラベルを取得し、それに応じた音響変調に接続する構成となっている。ここではスイッチを用い、ipt~からのラベルを判別し、それに対応する変調をフルートの音響信号に送信する。図 3 は、赤で示された音がどのように処理されるかを示している。

5.4. 演奏

本手法の効果は、コンサートのビデオを通して評価することができる³。

6. 議論

リアルタイム奏法判別システムにおいては、技術的および美的な二つの側面を考慮する必要がある。第一に、技術的な側面として、演奏中に操作者が手で操作しなくても音響変調が自動で切り替わることで、負担が軽減される。第二に、美的側面に関わる課題である。奏法と電子音を結びつけるために、事前に録音さ

³ コンサートのビデオ : <https://youtu.be/pjZ5GIgrUEY?t=4398>

れた電子音サンプルを用い、それを時間的に正確に切り替える手法が一般的である。しかしこの手法では、実際の演奏に応じた応答が行われなため、楽器と電子音との間に実質的なインタラクションが失われるという美的な限界がある。それに対して、奏法自動判別システムを用いることで、演奏中の奏法に応じて電子音がリアルタイムに応答し、楽器と電子音の間により豊かで動的なインタラクションが生まれる。

《Traversée II》では、奏法自動判別システムが判別可能な 11 種類の奏法のうち、5 種類のみが使用された。今後の演奏では、使用される 5 種類の奏法だけでシステムを学習させることで、作品内で使われない奏法による誤分類を避けることができる。

本作品においては、奏法自動判別の使用は、奏法と音響変調との対応関係に限定されていた。今後の作品では、各奏法に対応するクラスの確率分布を活用するなど、新たなアプローチを探ることも考えられる。例えば、この確率分布を用いて、複数の音響変調のゲインを制御することができる。また、フルートの音がより通常の奏法に近いほど、より強い変調（例えばハーモナイザー）を適用するような応用も考えられる。

さらに、奏法判別は自動楽譜追跡システムの補助としても有効である。例えば、Antescofo のようなソフトウェアにおいて、未知の奏法が原因で楽譜の追跡が困難になる場合、奏法判別による情報提供によって追跡精度の向上が期待できる。

7. 結論

本研究では、リアルタイム奏法判別システムをミクスト音楽の文脈に応用することで、その技術的および芸術的な可能性を示した。《Traversée II》においては、このシステムを活用することで、事前に設定された切り替えに依存せず、演奏と電子音響変調との間に動的かつ柔軟なインタラクションを実現することができた。また、Max への直接統合により、コンサートにおける実用性が高まり、演奏者および操作者の負担も軽減された。本作品では、奏法と音響変調との対応関係に限定した活用にとどまったが、今後は、各奏法に対応する確率分布を活用したより繊細な制御や、Antescofo のような自動楽譜追跡システムへの支援的な応用も視野に入れている。本研究は、演奏文脈に応じた反動的かつ知的な電子音響の創出に向けて、新たな創作的展開の可能性を示すものである。

謝辞

本研究は、欧州研究会議 (ERC) の REACH プロジェクト (助成番号: GA #883313) の支援を受けて実施された。本研究には、著者に対する文部科学省 (MEXT) 奨学

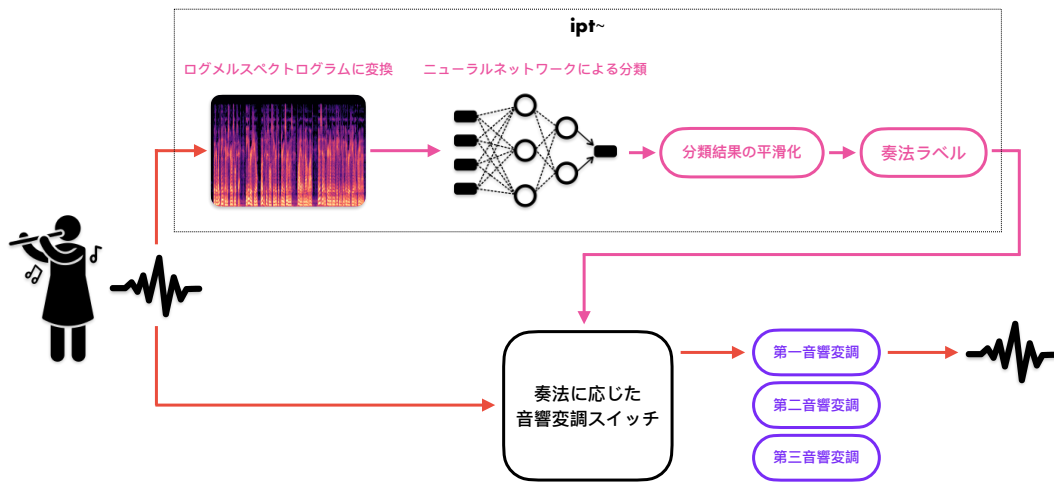


図 3: Max における奏法判別処理のワークフロー

金による資金援助も含まれています。また、《Traversée II》を初演して下さった古賀奏美さんに感謝いたします。

This research is supported by the European Research Council (ERC) as part of the REACH Project (GA #883313). Funding support for this work was provided by a Japanese Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) scholarship to the author. The author would like to thank Kanami Koga for her dedication in premiering *Traversée II*.

8. 参考文献

Artaud, P.-Y. and G. Geay (1980). *Flûtes au présent: traité des techniques contemporaines sur les flûtes traversières à l'usage des compositeurs et des flûtistes*. Editions Jobert & Editions musicales transatlantiques.

Bohlman, P. V. (2013). *The Cambridge history of world music*. Cambridge University Press.

Broche, N., M. Fiorini, M. Malt, and G. Assayag (2025, June). Interactive Music Co-Creation with an Instrumental Technique-Aware System: A Case Study with Flute and Somax2. In *International Computer Music Conference (ICMC 2025)*, Boston (MA), United States.

Broche, N. and W. Howie (2025, January). Gf-database: A database of flute playing techniques.

Broche, N. and T. Tanaka (2023). Toward real-time recognition of instrumental playing techniques for

mixed music: A preliminary analysis. In *International Computer Music Conference (ICMC)*.

Broche, N., T. Tanaka, and W. Howie (2024, July). Microphone-based Data Augmentation for Automatic Recognition of Instrumental Playing Techniques. In *International Computer Music Conference (ICMC)*, Seoul, South Korea.

Cella, C. E., D. Ghisi, V. Lostanlen, F. Lévy, J. Fineberg, and Y. Maresz (2020). Orchidea-sol: a dataset of extended instrumental techniques for computer-aided orchestration. *arXiv preprint arXiv:2007.00763*.

Cont, A. (2008). Antescofo: Anticipatory synchronization and control of interactive parameters in computer music. In *International Computer Music Conference (ICMC)*, pp. 33–40.

Ducher, J.-F. and P. Esling (2019). Folded cqt rcnn for real-time recognition of instrument playing techniques. In *International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR)*.

Fiorini, M. and N. Broche (2024, July). Guiding Co-Creative Musical Agents through Real-Time Flute Instrumental Playing Technique Recognition. In *Sound and Music Computing Conference (SMC)*, Porto, Portugal.

Fiorini, M., N. Broche, J. Borg, and R. Pasini (2025, June). Introducing EG-IPT and ipt : a novel electric guitar dataset and a new Max/MSP object for real-time classification of instrumental playing techniques. In *New Interfaces for Musical Expression*

(NIME 2025), Canberra, Australia.

Fletcher, N. H. and T. D. Rossing (2012). *The physics of musical instruments*. Springer Science & Business Media.

Levine, C. and C. Mitropoulos-Bott (2019). *The Techniques of Flute Playing I/Die Spieltechnik der Flöte I*. Bärenreiter-Verlag.

Martelloni, A., A. P. McPherson, and M. Barthet (2023). Real-time percussive technique recognition and embedding learning for the acoustic guitar. In *International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR)*.

Meyer, J. (2009). *Acoustics and the performance of music: Manual for acousticians, audio engineers, musicians, architects and musical instrument makers*. Springer Science & Business Media.

Solomos, M. (2019). *From music to sound: The emergence of sound in 20th-and 21st-century music*. Routledge.

Wright, M. (2005). Open sound control: an enabling technology for musical networking. *Organised Sound* 10(3), 193–200.

9. 著者プロフィール

ブロシェック・ニコラ

Brochec Nicolas はフランス出身の作曲家・研究者である。パリ第八大学修士課程（音楽学専攻）、ストラスブール大学大学院および音楽院修士課程（作曲専攻）を修了。現在、東京藝術大学音楽環境創造科博士課程に在籍し、丸井淳史研究室に所属している。また、文部科学省の国費外国人留学生奨学金（MEXT 奨学金）を受給している。これまでに、ICMC や SMC や NIME などの国際学会で研究発表を行ってきた。2023 年からは、欧州研究会議（ERC）の REACH プロジェクトの一環として、IRCAM の Représentations Musicales チームと共同研究を進めている。作品は、フランス、スペイン、オーストリア、ルクセンブルクなどヨーロッパ各地で上演されている。現在の研究テーマは、楽器の特殊奏法の自動判別とミクスト音楽への応用である。



この作品は、クリエイティブ・コモンズの表示 - 非営利 - 改変禁止 4.0 国際 ライセンスで提供されています。ライセンスの写しをご覧になるには、<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> をご覧頂くか、Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA までお手紙をお送りください。