

研究報告

フルートと電子音響のための « Anamnèse » における 幾何学曲線を用いた音響移動の制御 Controlling Sound movement using geometric curves in “Anamnèse” for flute and electroacoustics

渡邊 裕美

Hiromi WATANABE

名古屋市立大学大学院芸術工学研究科

Graduate School of Design and Architecture, Nagoya City University

概要

本稿は、ミクスト音楽における電子音響パートの軌跡制御に焦点を当て、幾何学曲線を活用した空間表現の可能性を検証する。具体的には、幾何学曲線に基づいた音の軌跡を聴取者の聴覚空間にどのように設計・実装するかについて検討し、この手法がミクスト音楽の表現に与える影響をフルートと電子音響のための « Anamnèse » という事例を通じて明らかにする。本稿を通じて、ミクスト音楽における空間的な音響表現の新たな指針と可能性を提案する。

This paper focuses on trajectory control in the electronic part of mixed music, exploring the potential of spatial expression through the application of geometric curves. Specifically, it examines how sound trajectories based on geometric curves can be designed and implemented within the listener's auditory space. The impact of this approach on the expressive potential of mixed music is elucidated through the case study of Anamnèse for flute and electronics. By presenting this research, the paper aims to propose new directions and possibilities for spatial sound representation in mixed music.

1. はじめに

ミクスト音楽とは、伝統的な生演奏と電子音響パートが融合し、聴覚的に新しい体験を提供する音楽形式である。その中で、電子音響パートが聴覚空間内をどのように移動するか、すなわち音の軌跡をいかに設計するかは、ミクスト音楽の空間的な表現に係る重要な要素となる。特に、幾何学的な曲線を軌跡として活用することにより、聴取者の周囲に意図的な音の動きとリズムを生み出し、視覚的にも聴覚的にも効果的な表

現が可能となる。従来の電子音響の軌跡制御は、直線あるいは固定的な移動が多く採用されてきたが、幾何学曲線を活用することで、円、螺旋、楕円といった複雑な軌道に沿って音を移動させることができる。本研究ではこのような軌跡制御に着目し、音響空間により柔軟で計算された動きをもたらし、音響表現の可能性の拡張を試みた。またそれにとどまらず、幾何学曲線の応用により、電子音響パートは音の配置だけでなく、その動きによっても聴覚的な没入感を深め、音楽の物語性の構築にも挑んだ。

2. マルチチャンネルにおける電子音響のパンニング

マルチチャンネルの音響システムにおける電子音響のパンニングとは、スピーカーに囲まれた空間内で音像を自在に移動させ、3次元的な音場を構築する手法である。電子音響では、人工的なサウンドや自然音、合成音などを多チャンネルスピーカーシステムを用いて定位し、動きや深さのある音場を生成する。この際、音響学的な理論と技術を応用して、聴取者に空間定位と音像の移動を感覚として与えることができる。

2.1. パンニングの原理

パンニングは、スピーカー間で音圧（音量）や位相を調整し、聴取者が感知する音の位置を変える手法である。音像を移動させる際に軌跡を制御する代表的な方法には以下のものがある (Gandemer 2018)。

VBAP (Vector Base Amplitude Panning) : VBAP は、複数スピーカー間での音圧を、聴取位置からスピーカーに向かうベクトルの合成によって調整し、リスナーに音の定位感を与える手法である。2つのスピーカー間、もしくは3つのスピーカーのベクトル方向に音像が配

置され、音源の位置に応じてゲインが調整される。これにより、円形配置や球状配置のスピーカー間で音像の移動が滑らかに実現される。

アンビソニックス：アンビソニックスは、音場の球面調和関数（spherical harmonics）を用いて3次元的な定位を行う方法である。原音を球面の中心に配置し、球面上の方向に向けて音をパンニングすることで、あらゆる方向からの音響的な定位をシミュレーションすることができる。アンビソニックスは高度なパンニングと音像移動が可能で、特にVRや360度サウンド空間の再現に適している。

2.2. パンニングにおける音響学的要素

パンニングは、主に音圧レベル（ゲイン）の調整を通じて行われる。聴取者にとって、音の強度（音圧）が高いスピーカー方向に音像が定位しているように感じられる。これにより、スピーカー間で音圧のバランスを取ることで、音が移動しているように感じさせることができる。また、左右の耳に到達する音波の位相差を利用することで、さらに音像の位置を明確にすることが可能である。特に低周波数帯域では、音波の位相差が定位に影響を与えるため、位相の管理が重要になる。さらに、特定の周波数帯域によって定位感が変化するため、低周波・中高周波の音のパンニングは異なる扱いが必要である。高周波数帯域では指向性が強く、パンニングの効果が明確に感じられるため、電子音響におけるパンニングで重要な役割を果たす。

2.3. マルチチャンネルシステムとパンニング

マルチチャンネルのパンニングでは、3つ以上のスピーカーが空間内に配置される。これらのスピーカーを通じて、任意の位置に音像を固定することが可能で、音の動きや広がりを表現できる。特に電子音響では、次に述べるようなパンニング効果が用いられる。まずは移動する音像である。音像をスピーカー間で徐々に移動させることで、聴取者に音が特定の軌道を描いて移動している感覚を与える。これには、幾何学的な曲線やスクリプトで制御された位置データを使うことで、滑らかな移動感を実現する。次に拡散と集束の効果である。音像を複数のスピーカーに拡散させることで、音が広がったり、逆に特定のスピーカーに集束させることで、フォーカスされた音を表現することができる。これにより、電子音響においても音の集中度を動的に調整できる。

2.4. 電子音響における音楽表現の利点

電子音響でのマルチチャンネルパンニングは、音楽表現において空間的な没入感を与える。マルチチャンネルで音を移動させることで、聴取者を包み込むような空間感覚が生まれ、現実味のある没入体験が可能である。また、動的な音場の変化を生じさせることが可能である。リアルタイムで音像を動かすことで、音場に動きやリズムを加え、音響的なダイナミクスを表現できる。さらに、創造的なサウンド表現も実現できる。人工的なサウンドやエフェクトとしてパンニングを活用し、物理的な制約のない創造的な音場を構築することができる。マルチチャンネルでの電子音響パンニングは、音圧、位相、周波数特性を利用して音像を制御する音響学的手法である。空間的な定位を意識したパンニングは、聴取者に対して高度な没入感と動的な音場体験を提供し、電子音響の表現をさらに豊かにする。

3. 幾何学曲線を用いた定位変化の制御

幾何学曲線を用いて少ないパラメーターで8チャンネルのスピーカー上に音像を移動させる手法は、音響定位とアンビソニックス技術に関連して説明できる。このようなパンニング方法は、特に円形や楕円形の幾何学曲線を使うことで、スムーズかつ直感的に音像を動かすことが可能である。

3.1. 幾何学曲線の役割

幾何学曲線 *geomectric curve* とは、幾何学によって表現される曲線のことである。幾何学曲線を用いることで、音像の位置を直感的に制御しやすくなる。たとえば、円形や楕円形の曲線を定義し、その曲線上を移動させるといった方法が考えられる。こうした曲線を通じて、音像の移動をX軸およびY軸で制御できるため、少ないパラメーター（例えば、極座標における角度や半径）での制御が可能になる。

3.2. パラメーター制御による音像移動

複数のスピーカーによって音像を移動させるためには、極座標において音像の角度と距離（半径）を設定するだけで、移動の軌跡が定義されるまず、角度 θ については、幾何学曲線に沿って音像の位置が指定される。例えば、 0° から 360° の角度を変えることで、円周上を回るように音像が移動する。次に、半径 r は、音像を円の中心から離す距離で、音像が中心に近いか外周に近いかを指定できる。

3.3. スピーカー間での音圧分布とパンニング

スピーカーごとの音圧（ゲイン）を調整することで、音像がスピーカー間でどのように定位するかをコントロールする。たとえば、VBAPやアンビソニックスといった手法を使うと、複数スピーカーにまたがって音像の定位をスムーズに制御できる。8チャンネルの配置では、音像の角度と距離に応じてスピーカー間の音量バランスを調整し、音像が曲線に沿って移動するように聴こえる効果を作り出す。

3.4. 音響学的な利点

幾何学曲線と少数のパラメーターを用いることで、以下のような音響学的な利点が見受けられた。まずは精度である。少ないパラメーターでもスムーズな音像移動が可能になり、聴取者に自然な音響体験を提供できる。また、処理負荷の低減が見込められる。複雑な座標計算を行わずに音像移動が実現できるため、DSP（デジタル信号処理）の負荷が軽減される。さらに、幾何学曲線を通じて円形や楕円形といった特定の形状の音場を作り出すことで、臨場感や音場の広がりを実感的に表現できる。幾何学曲線を用いる音像移動は、少数のパラメーターで効率的に音像を制御でき、精密な音場の再現が可能となる。

4. 極座標を用いた音空間制御

4.1. 音響移動の制御手法

パンニングの制御では、主に直交座標（X, Y）を使用した定位の移動が簡易である。例えば音響空間上での座標指定があり、音源の位置をX軸、Y軸で指定し、任意の位置に音源を配置する。音響の移動には、XとYの座標値をリアルタイムで更新し、時間的に変化させることで音像の移動をシミュレーションする。この制御には、例えばline~オブジェクトやphasor~オブジェクトを用いることで、時間的な変化に合わせてX軸やY軸の位置を変化させることができる。また、パッチベースでの制御も可能である。音源の位置を定義するパッチを作成し、座標に基づいて音量や定位を制御することが可能である。例えば、音量は聴取者からの距離に基づき、定位はXとYの座標比率に基づいて調整する。さらに、3D音響空間のシミュレーションでは、X, Y, Z軸で音源の位置を設定することで、3次元の音響空間をシミュレートすることも可能である。この場合、聴取者の位置や頭部位置などを基準として、音源をリアルタイムに変更し、定位感を作り出す。代表的なものとして、spat (IRCAM)、ICST Ambisonics Tools, HOA Library (CICM) などが挙げられる (Gandemer 2018)。

4.2. 直交座標での問題点と限界

直交座標を用いた音響の制御には、いくつかの問題点と限界が存在する。まずは、軌跡が自然になりにくい点である。聴衆者の周囲で音源を回転させたり、円を描くように音源を動かしたい場合、直交座標を使うと計算が複雑になり、滑らかな軌跡を実現するためには三角関数などの追加計算が必要となる。特に、非線形の円運動や放射状の移動を行う場合、位置計算が煩雑になり、リアルタイム制御が難しくなる。また、定位の不自然さも挙げられる。直交座標は直線的な移動が得意である一方、聴取者の周囲で音が自然に回転するような動きを表現するには向いていない。特に、定位感を高めるためには、音源の距離や方向がリアルタイムで正確に反映される必要があるが、直交座標では位置に応じた距離と角度の計算が増えるため、リアルタイムに回答しきれないことがある。さらに、複数音源の距離管理の煩雑さも問題となる。複数の音源が存在する場合、聴取者からの距離に基づく音量や定位の調整が複雑化する。直交座標で距離を計算するためには各音源のX, Y座標を用いて距離を計算しなければならず、計算量が増加するため、リアルタイムでの制御に負荷がかかる。

4.3. 極座標を用いた音源制御による解決と改善点

以上を踏まえ、本研究では極座標を用いることで、直交座標での制御における問題点を次に述べるように解決することができた。極座標では、音源の位置を半径 r と角度 θ で指定できるため、音源をリスナーの周囲で回転させる場合、角度 θ を変化させるだけでよく、滑らかな円運動が簡単に実現できる。これは、直交座標のようにXとYの両方の値を調整する必要がなく、計算がシンプルであるため、リアルタイムでの自然な回転を表現できる。また、距離に応じた音量制御が容易になった。極座標では音源とリスナーの距離が半径 r で直接得られるため、距離に応じた音量減衰やリバーブなどの効果を適用する際、計算が単純になる。これにより、聴取者との距離に基づく自然な音量やエフェクトの制御が可能となった。逆二乗則に基づく音量減衰も距離情報から容易に実現でき、定位がより現実的に感じられるようになる。さらに、複数音源の制御も容易になった。極座標では、音源の距離と角度がそれぞれ独立した変数として扱えるため、複数の音源を同時に動かす際の制御が簡単になる。たとえば、複数の音源が放射状にリスナーから遠ざかるように移動させたい場合、各音源の半径 r を一括で変更するだけで実現できる。このように、複数音源の操作が直交座標に比べて直感的で計算量も少なくなった。さらに、極座標を用いることで、音源の位置が距離と角度で指定できるため、空間内での自由なパフォーマンス表現が可

能となった。聴取者を中心に音像を取り囲むような演出や、あるいは特定の方向から遠ざかるような動きも簡単に作成できるため、ライブパフォーマンスやインスタレーションのように動的な音響環境が求められる場合に非常に有効である。極座標による音源制御は、音像の回転や距離調整に伴う制御を容易にし、自然で滑らかな音源の移動を実現する。また、計算が直交座標に比べて効率的で、特にリアルタイム制御や複数音源を扱う場合に適している。このため、MAX における音響制御の精度や表現力が向上し、より現実味があり豊かな音響体験を提供できる点大きい。

5. ミクスト作品における極座標を用いた音響移動の制御

以上の考察を踏まえて制作したのが 2015 年に作曲したフルートと電子音響のための「Anamnèse」である。本作品では、時間と空間の多層的な重なりをテーマにしており、電子音響パートにおける音像の移動には極座標を用い、幾何学曲線をもとに音像移動を制御している。

5.1. 幾何学曲線の種類

先述のとおり、音源の位置を半径 r と角度 θ という物理的な量で表現できるため、極座標は聴取者を取り巻く音像の移動を表現するのに適している。また、極座標で表す方が簡潔な表記となる曲線の方程式もある。そのうち「Anamnèse」では、バラ曲線、レムニスケート曲線、フェルマーの螺旋などを用いた。

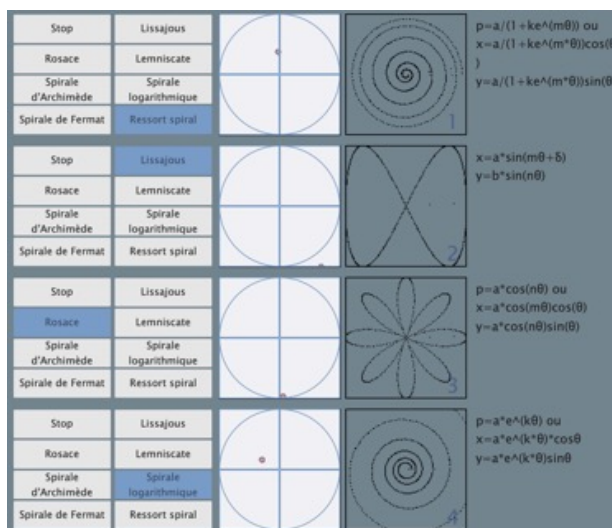


図 1: 「Anamnèse」における極座標を用いた音像移動の軌跡制御

5.2. バラ曲線を用いた空間制御の実装

バラ曲線 (rose curve) は、極座標を使って表される曲線の一種で、花のような形状を持つことで知られおり、極座標 (r, θ) において以下の式で表される。

$$r = a \cos(n\theta) \text{ もしくは } r = a \sin(n\theta)$$

これを次のように媒介変数で表示できる。

$$\begin{cases} x = a \cos(n\theta) \cos(\theta) \\ y = a \cos(n\theta) \sin(\theta) \end{cases}$$

ここで r は、原点 (中心) からの距離 (半径) を表し、 θ は極座標の角度であり、曲線の回転角度である。各変数について、 a は振幅を調整する定数であり、バラ曲線の半径の最大値を決定する定数で、座標上の曲線の大きさを制御する。 a の値が大きくなると、曲線全体が広がり、より大きな半径を持つようになる。 n は周波数 (花びらの数) を制御する定数で、曲線の「花びら」の数を決定する。特に n が整数の場合、奇数なら花びらの数は n 本となり、偶数なら $2a$ 本となる。 n が有理数の場合、バラ曲線は閉じた曲線にならず、無限に続く曲線となる。バラ曲線の特性として、 $r = a \cos(n\theta)$ か $r = a \sin(n\theta)$ のどちらを用いるかによって、同じ花びらの数でも異なる回転方向になる。このように、バラ曲線は振幅 a と周波数 n を変えることで多様な形状を描き出すことができ、移動する音響の軌跡としてはその中心点にいる聴取者からは接近と離反を繰り返しながら、回転する音響を聴取することになる。

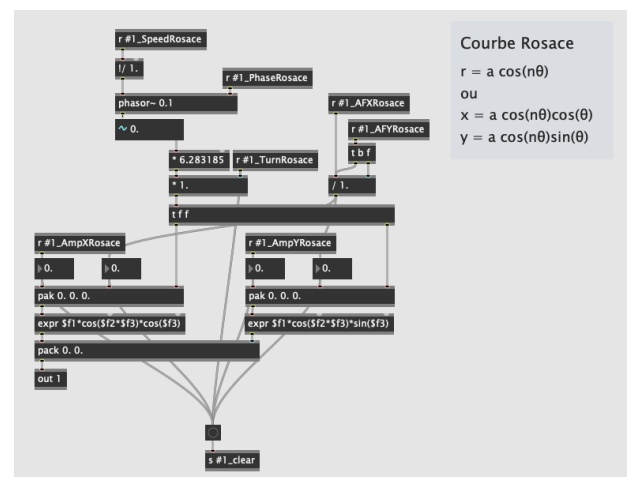


図 2: バラ曲線の MAX による実装

5.3. レムニスケート曲線を用いた空間制御の実装

レムニスケート曲線はもともと 8 の字の曲線を表すものであるが、ベルヌーイ Bernoulli のレムニスケート

を指すことが多い。また、直交座標では次のように表現される。

$$(x^2 + y^2)^2 = (x^2 - y^2)$$

これを極座標で表現すると次のようになる。

$$r^2 = 2a^2 \cos 2\theta$$

これを媒介変数で表現すると

$$\begin{cases} x = \frac{a \sin 2\theta}{1 + \sin^2 \theta} \\ y = \frac{a \sin \theta \cos \theta}{1 + \sin^2 \theta} \end{cases}$$

となる。よって原点（中心）からの距離 r と、極座標の角度 θ 、および振幅曲線 a によって表現されるレミニスケート曲線は、 x 軸、 x 軸に対して線対称で原点で自ら交わる曲線となる。このように、左右を行き来する軌跡は、移動する音響としてその中心点にいる聴取者からは、加速する接近と減速する離反の繰り返しを左右方向にて聴取することになる。

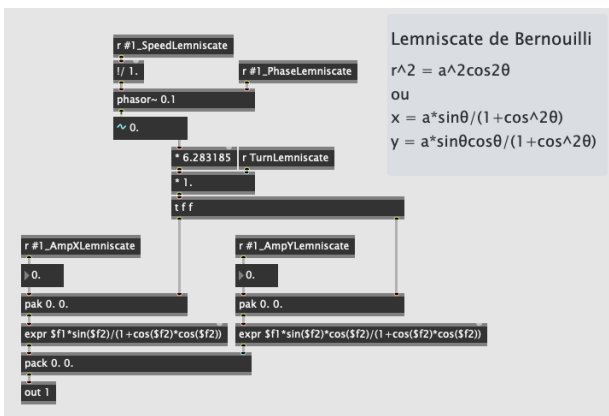


図 3: レミニスケート曲線の実装

5.4. フェルマーの螺旋を用いた空間制御の実装

螺旋 spiral とは、半径が一定である「円」とは異なり、半径が角度によって変化（単調増加または単調減少）する曲線のことを指し、三次元で表現される曲線である「らせん」とは区別される（西村 2021）。半径 r を角度 θ の関数 $r(\theta)$ としたとき、 $r(\theta)$ の関数が変われば描かれる螺旋の種類も変わってくる。アルキメデス螺旋 Archimedean spiral が半径 r を角度 θ の 1 次関数であるのに対し、半径 r が角度 θ の指数関数として変化するとき、対数螺旋 Logarithmic spiral あるいはベルヌーイ螺旋 Bernoulli spiral となる。さらに、 $r(\theta) = a\sqrt{\theta}$ となる螺旋があり、そのひとつにフェルマーの螺旋 Fermat's spiral が挙げられる。アルキメデス螺旋が等間隔に半

径が変化し、また対数螺旋が角度 θ に対し半径 r が指数関数的にを増大するのにに対し、フェルマーの螺旋は接近と離反で異なる軌跡を描く曲線で、角度 θ が増大するにつれ半径 r の幅は狭くなっていくことが特徴である。このようなフェルマーの螺旋は極座標では次のように表現される。

$$r^2 = a^2 \theta$$

これを媒介変数で表現すると

$$\begin{cases} x = \pm a\sqrt{\theta} \cos(\theta) \\ y = \pm a\sqrt{\theta} \sin(\theta) \end{cases}$$

となる。よって原点（中心）からの距離 r と、極座標の角度 θ 、および振幅曲線 a によって表現されるフェルマーの螺旋は、原点に対し距離 r の幅が狭くなっていく曲線となる。このように、連続して近接と離反をしながらも、連続的に弧を描く軌跡は、移動する音響としてその中心点にいる聴取者からは、自分の周りを周回しながらも近接時には加速し、離反時には減速する軌跡として聴取することになる。

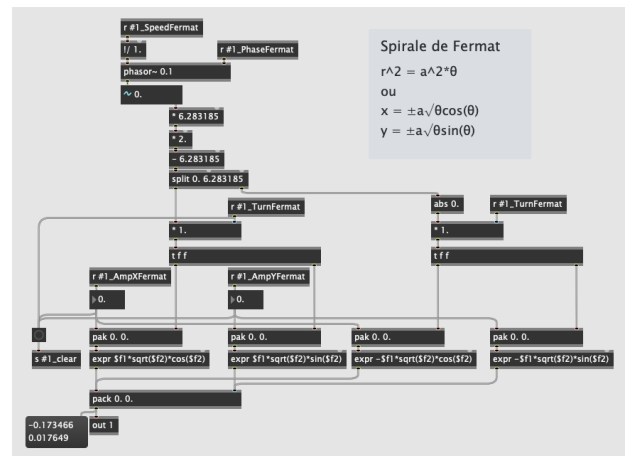


図 4: フェルマーの螺旋の実装

6. まとめ

ミクスト音楽における電子音響パートの音響の定位の移動を制御するにあたって、従来の直線的な移動に対し、幾何学曲線を用いることで、円や螺旋など複雑な軌跡に沿った音の移動が可能となり、空間的な没入感を高めることができる。本稿では、音像の移動をマルチチャンネルスピーカースystemで実現するために、VBAP やアンビソニックスなどのパンニング手法をもとに、MAX で極座標を用いて音響の空間移動の軌跡を制御するプログラムを実装することで、計算量を減

らしながら滑らかな音像移動を構築した。特にリアルタイム制御に適しているこの方法を用いて、フルートと電子音響のための「Anamnèse」を制作し、幾何学曲線に基づく音の空間表現を実現した。今後の課題として、幾何学曲線の形態的な種類分けを進め、それを電子音響の音像を移動させる際、その軌跡の制御に応用させることで、ミクスト音楽における空間的な音響表現を追求していきたい。

7. 参考文献

- John, M. Chowning. 1977. "The Simulation of Moving Sound Sources" in *Computer Music Journal*, MIT Press, 1(3), 48-52.
- Gandemer, Lennie, Gaétan Parseihian, Christophe Bourdin, and Richard Kronland-Martinet. 2018. "Perception of Surrounding Sound Source Trajectories in the Horizontal Plane: A Comparison of VBAP and Basic-Decoded HOA". in *Acta Acustica united with Acustica*, Hirzel Verlag, 104 (2), 338-350.
- Guillot, Pierre. 2017. *La représentation intermédiaire et abstraite de l'espace comme outil de spatialisation du son*. Musique, musicologie et arts de la scène. Université Paris 8, Vincennes Saint-Denis, France.
- McGee, Ryan, and Matthew Wright. 2011. "Sound element spatializer" in *the Proceedings of International Computer Music Conference*. International Computer Music Association, Huddersfield, UK, 1-4.
- Merlier Bertrand. 2006. "Réflexions à propos de la mise en espace de la musique électroacoustique dans les logiciels audionumériques" *Journées d'Informatique Musicale*, Association Française d'Informatique Musicale; Centre de recherche en Informatique et Création Musicale, Saint-Denis, France.
- Nouno Gilbert, and Carlos Agon. 2002. "Contrôle de la spatialisation comme paramètre musical" *Journées d'Informatique Musicale*, Association Française d'Informatique Musicale; GMEM - Centre national de création musicale, Marseille, France.
- 岡本 健太郎. 2021. 『アートで魅せる数学の世界』, 技術評論社.
- 西村 隆一. 2014. 「アンビソニックス」, 『映像情報メディア学会誌』 68(8).

巴山 竜来. 2019. 『数学から創るジェネラティブアート』, 技術評論社.

8. 参考作品

渡邊 裕美 2015 フルートと電子音響のための *Anamnèse Hyper-Regard*, Ensemble Regards, Studio le Regard du Cygne, 2015.6.27

9. 著者プロフィール

渡邊 裕美 (Hiromi WATANABE)

静岡県出身。東京藝術大学大学院音楽学専攻修士課程修了後、渡仏。パンタン県立音楽院にて審査員満場一致の最優秀で電子音響音楽のDEMを取得、同時にSACEMから奨学金が授与される。ジャン・モネ大学サン＝テティエンヌ校コンピュータ音楽専門職修士課程修了。繊細な色彩の移ろいが生み出す仮想の音響空間を求めて音楽制作を続けている。近年は幾何曲線を用いた音の空間投影のコントロール、及び音楽と映像・身体表現の連関などに関心を抱いている。

主な受賞歴は Musica Nova 2017 ミクスト部門第1位(プラハ)、CCMC 2011にてACSM116 賞受賞。また INA-GRM 主催 Banc d'essai 2013 (パリ)、NYCEMF 2016、ICMC 2016 (ユトレヒト) に作品入選。現在は名古屋市立大学大学院芸術工学研究科研究員、および京都市立芸術大学非常勤講師。



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/> をご覧頂るか、Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA までお手紙をお送りください。