

研究報告

3次元非接触型パフォーマンス・インターフェースの
開発と音楽作品への応用THE DEVELOPMENT OF 3D NON-HAPTIC PERFORMANCE
INTERFACE AND ITS APPLICATION TO MUSICAL WORKS

美山千香士

Chikashi Miyama

ニューヨーク州立大学バッファロー校

The State University of New York at Buffalo

概要

本稿では、これまで行われてきた音楽パフォーマンスのための動作検知の試みを Axel Mulder の分類に基づき比較し、実際の演奏における様々な問題点を議論した後に、それらを解決すべく筆者が 2009 年に製作した新しい 3次元非接触型インターフェース Peacock について、そのハードウェアの設計、操作をモニタリングするソフトウェアの開発、システムの評価、音楽作品への応用、そして今後の展望を詳述する。

This paper introduces a newly designed 3D non-haptic performance interface, Peacock. Peacock's hardware design, OpenGL-based monitoring software, system evaluation, musical applications, and future plans are traced. Employing Axel Mulder's human movement tracking categorization, the Peacock system is compared with other significant motion tracking systems. Finally, the advantages of the Peacock system for practical performance is discussed.

1. 手と音楽

声楽を除く、殆ど全ての楽器は手や指を用いて、音高や音強などのパラメータを操作をする事により演奏を行う。20 世紀以降、電氣的、電子的な技術の導入により、従来の楽器とは異なる音楽パラメータの操作方法が多く発明されてきた。例えば、リボン・コントローラ、MIDI フェーダーやノブ、Korg 社の Kaoss Pad や Jazz Mutant 社の Lemur のようなマルチタッチ・デバイスも現在では演奏に用いられている [1, 2]。これらは、奏者が装置の一部に手を触れて、パラメータを操作する手法であるが、その逆のアプローチ、即ち、装置の方から積極的に奏者の手の動きや状態、位置などを検知して音楽パラメータに反映させる動作検知システムも現在は多様

性を増している。

2. PEACOCK 制作の背景

Axel Mulder は動作検知システムを大きく 3つのカテゴリに分けている、Inside-in 型、Inside-out 型、Outside-in 型である [3]。

表 1. Axel Mulder の分類

カテゴリ	センサーの場所	検知の対象
Inside-in	身体に装着	身体の情報
Inside-out	身体に装着	外部の情報
Outside-in	外部に設置	身体の情報

Inside-in 型のシステムはセンサーを身体に装着し、身体の状態、例えば、関節の角度や、筋肉の緊張状態などを測定するシステムであり、Inside-out 型のシステムは、センサーを身体に装着するが、それにより身体の状態を直接検知するのではなく、例えば、壁や天井との距離を測定する事により奏者の位置を導きだしたり、重力加速度を利用して手足の傾きを求めるような、外部のリファレンスが必要とされるシステムを意味する。この Inside 型、或いはウェアラブル型の初期の代表例としては、Steim の Michel Waisvisz らによる両手間の距離を超音波センサーで計測し、MIDI 信号としてその情報を音源に送信する『Hands』(1984)が、また、このアプローチの発展形として、近年では Elena Jessop の『VAMP』(2009)などがあげられる [4, 5]。VAMP システムは、曲げセンサーによる Inside-in 型のアプローチと、加速度センサーによる Inside-out 型のアプローチを組み合わせ、手の傾きと指の動きの両方を同時に検知することで、複雑な音楽パラメータのコントロールを可能としている。また、田中能の 2 台の iPhone を用いた RjDj



図 1. VAMP システム



図 2. モバイルデバイスを用いた演奏

のパフォーマンスや Stanford 大学の Ge Wang らによる Mobile Phone Orchestra のように、発音を司るデバイスやスピーカーを身体に装着し、完全に自律した楽器として動作検知デバイスを用いるような Inside 型の新たな試みも行われている [6, 7, 8]。

一方、Outside-in 型のシステムは身体に装置を装着するのではなく、外部に装置を設置し、そこから何らかの方法でパフォーマンスの動作検知を行うものである。このアプローチの代表的なものとして、David Rokeby のビデオ検知システム、『SoftVNS』(2002) があげられる [9]。このシステムはビデオを用いた色検出や輪廓抽出、フレーム差分などの様々な解析手法を、Max のエクスターナル・オブジェクト群として提供したもので、ユーザーは目的に合わせて各種の手法を組み合わせることで独自の解析方法を Max の GUI を用いて設計することが出来る。様々なインスタレーションやダンス・パフォーマンスなど、Rokeby 以外によるアーティストの作品にもこのシステムは広く利用された。

このビデオによる Outside-in 型のシステムの中で、手や指の動きの検知に特化したものに Jaime Oliver の『MANO』(2010) がある [10]。このシステムは高フレームレート (75 fps) のビデオカメラを解析に用いるため、CPU 資源の消費は著しいものの、Oliver により実装されたアルゴリズムにより、手の中心や指の先端の位置情報を正確かつ高速に検知することができる。

前者の Inside 型のアプローチは、宿命的な欠陥とし

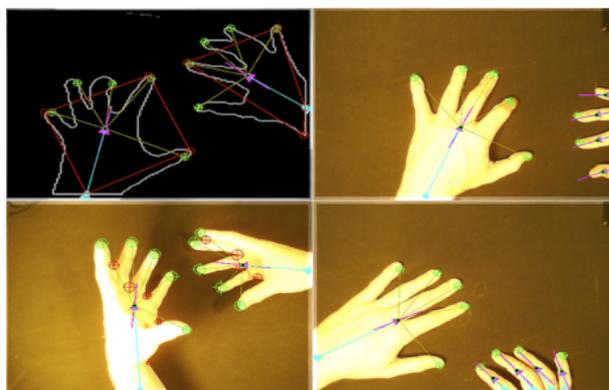


図 3. MANO System

て、インターフェースからコンピュータまでのケーブルが不可欠であり、それが演奏行為の妨げになる点や、ケーブルを頻繁に曲げたり、動かしたりすることによる演奏中の断線のリスクが避けられない点があげられる。Bluetooth などの無線技術の導入によりケーブルの使用を避ける事も可能であるが、無線通信の不安定さ、バッテリー依存の機器をパフォーマンスに用いるリスク、日本国内においては通信法の問題などの複数の新たな課題が発生する。さらに、音楽的な文脈とは無関係なデバイスを身に纏う事により生じる視覚的違和感もしばしば指摘される。また、田中能や Mobile Phone Orchestra のようにインターフェースと音声合成の全てをモバイルデバイスで行う方法では、現時点ではデバイスの限られた CPU 資源や DAC 品質への懸念が否めない。

Outside-in 型のアプローチは主に以下の 4 つの問題点があげられる。第 1 に、ビデオカメラの情報は基本的に 2 次元のものであるので、1 台のカメラでは 3 次元的に対象物がどこに位置しているのかを捉えるのは困難である。第 2 に、ビデオ解析には多くの CPU 資源を必要とするので、1 台のコンピュータでパフォーマンスを行う場合は、それにより音声信号処理が制限されてしまう可能性がある。第 3 に、一般的な NTSC 規格のビデオカメラのフレームレートは 30fps であり、この速度では高速な手の動きを捉えるには不十分である。また、解析処理により生じるレイテンシも無視できない。第 4 に、ビデオカメラによる検知はパフォーマンスを行う会場の照明の状況に左右されるリスクがあり、パフォーマンスの前に入念なキャリブレーションが必要である。

1919 年にロシア人発明家、レフ・テルミンが開発した『テルミン』に、この Mulder の提唱した動作検知デバイスの分類法を適応すると興味深い結果が浮かび上がる。音色は制限されているとはいえ、20 世紀初頭に開発された楽器であるにも関わらず、近年の『SoftVNS』のように Outside-in 型で、上述したビデオ検知の持つ様々な問題を回避しており、さらに楽器としての自律性

を実現しているからである。

本稿で紹介するシステム、Peacock はテルミンのアイデアを基調として、上記の Inside 型、Outside-in 型のシステムの問題点を解決すべく、筆者が 2009 年に開発した非接触型 3 次元インターフェースである。このインターフェースは、Mulder の分類では Outside-in 型に属するもので、身体へのデバイスの装着は必要ではないが、『SoftVNS』や『MANO』のようにビデオカメラによる検知は行わず、代わりに赤外線センサを用いている。

このシステムでは以下の 7 点が実現されている。

1. 非接触、手が装置に触れる事なく演奏が行える
2. CPU 資源をほとんど消費しない
3. 3 次元的な動きの検知が可能である
4. 照明による影響を殆どうけない
5. 一般的なデジタル・ビデオカメラの 2 倍程度の速度で検知を行う
6. USB バスパワー接続
7. OpenGL による視覚的な動作のモニタリング

3. PEACOCK の仕様



図 4. Peacock



図 5. 上部パネル裏面に配置された赤外線センサ

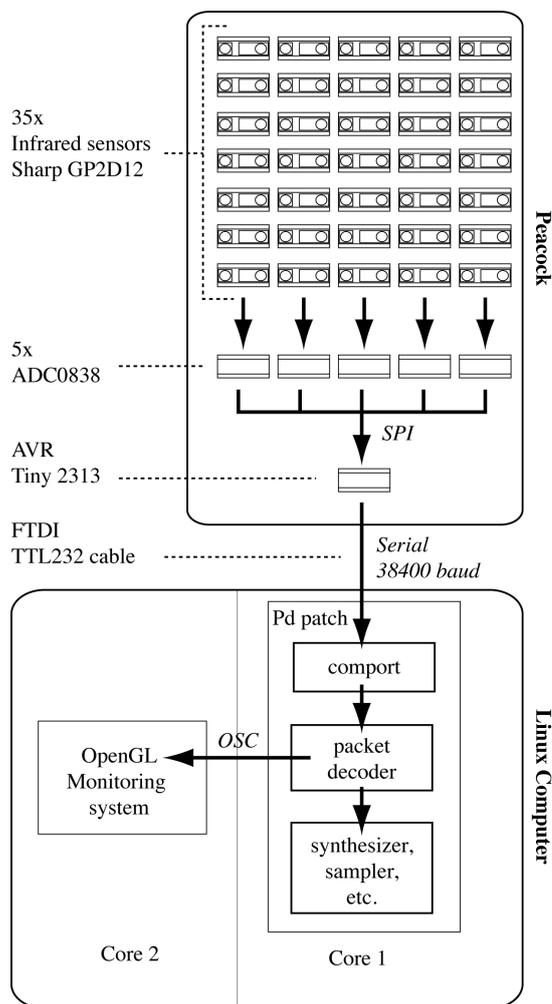


図 6. システムダイアグラム

Peacock は、幅 43.18cm、奥行き 25.4cm、高さ 5.08cm の箱型のインターフェースであり、筐体はアルミニウムで作られている。35 個の赤外線距離センサが、5 行 7 列に上面パネルの裏側に固定されており、各々のセンサが、その真上に障害物が設置された時に、障害物とセンサとの距離に応じて 0.3 から 3.1 ヴォルトのアウトプットを出す。35 個のセンサは約 4.45 cm ごとに設置され、パフォーマーは 2 から 3 個のセンサを手のひらを使って、3 個以上のセンサを、腕を使ってコントロールすることができる。全てのセンサからのアウトプットは 20Mhz で駆動している 8 チャンネルの 8 ビット ADC (National Semiconductor 社の ADC0838) につながれており [11]、センサから送られてくる電圧の変化を、8 ビットのデジタル値に変換し、マイクロ・コントローラ (Atmel 社の ATTiny2313) に SPI バスを用いて送信する [12]。マイクロ・コントローラは受信した値を、センサの ID の情報と組み合わせ、2 バイトのパケッ

トを作り、それらを順次、FTDI 社の TTL232R ケーブルを用いて、ホスト・コンピュータに UART 信号として送信する [13]。ホスト・コンピュータでは Pd-extended が稼働しており、この UART 信号を“comport”オブジェクトを用いて 38400 baud で受信する [14]。

4. モニタリングシステム

非接触型インターフェースである Peacock は、従来の楽器や接触型インターフェースと異なり、接触による奏者の身体へのフィードバックが欠如している。これを補うために視覚によるフィードバックを行う OpenGL を用いた三次元モニタリング・ソフトウェアを開発した [15]。このソフトウェアは、Peacock 上の手の位置に従ってウインドウに描画されている 3 次元オブジェクトの形を変形させ、現在パフォーマンスの手がどのようなパラメータに影響を与えているのかを直感的に認識する事を可能としている。

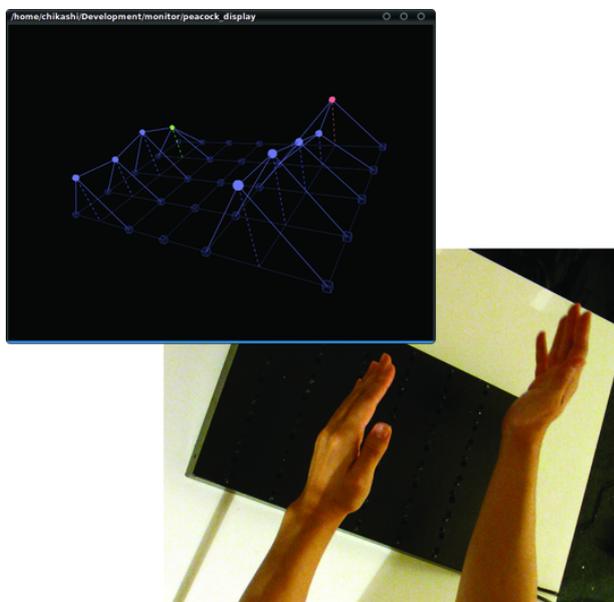


図 7. モニタリング・システム

モニタリング・ソフトウェアは Pd-extended の提供する OpenGL グラフィック処理用ライブラリ GEM を用いず、Linux プラットフォームに単独のアプリケーションとして開発された。単独のアプリケーションとしてソフトウェアの実装した理由は、Linux カーネル 2.6 以降がサポートしている CPU affinity コントロールを利用して、マルチコア CPU において、2つの異なった CPU コアに音声信号処理のプロセスと、モニタリングソフトのプロセスを割り当て、プロセスがコア間を移動しないように設定することで、音声処理プロセスとモニタリ

ングプロセスの完全な分離を行い、予期しないプロセス間の干渉を回避することを意図したためである [16]。Pd-extended とモニタリングソフトは CNMAT が提供している OpenSoundControl プロトコルを用いて通信を行う [17]。そのため、ネットワークを介して Peacock が直接接続されていないコンピュータでもモニタリングを行う事ができる。

5. システムの評価

5.1. サンプリングの速度

Pd-extended 上に実装されたベンチマーク用パッチを用いて、アナログ/デジタル変換、及び ADC からマイクロ・コントローラを介しコンピュータに到達する時間の合計を 1000 回サンプルして平均をもとめたところ、Peacock システムが 35 個のセンサーの値全てをホスト・コンピュータに転送するまで時間は約 18.478 ミリ秒であり、システムはおおよそ 60Hz 程度のサンプリングレートで駆動している事になる。これは、一般的な NTSC 仕様のビデオのフレームレートの約 2 倍である。

5.2. CPU 占有率

Pd-extended の“cputime”オブジェクトを用いて行った、Peacock システム利用によるホスト・コンピュータの CPU 資源の消費量は Intel Core2Duo、2.2Ghz の Macbook 上で 1% 以下であることが分かった。

5.3. データの安定性

ADC に届く赤外線センサからの電圧の安定性の評価を、白色のパネルをセンサー上 20cm に水平に固定して行った。マイクロコントローラからのデータ 1000 個のサンプルを Array オブジェクトにプロットしたのが以下の図である。

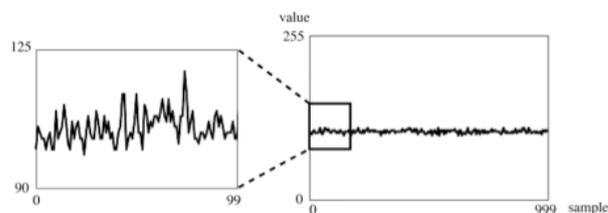


図 8. 赤外線センサのノイズ

1000 個のサンプルの平均は 107.289、最小値は 101、最大値は 115 であった。この結果が示すように、ノイズ

成分は微細なパラメータをパフォーマンスでコントロールするあたり、看過できない問題である。

6. 作品への応用

6.1. Black Vox (2009)

Black Vox は Peacock のために 2009 年に制作した半即興的なパフォーマンス作品である。



図 9. Black Vox の演奏

作品のタイトルの「Vox」はラテン語で「声」を意味する。作品に用いられる全ての電子音は女性の 6 秒間の英語のスピーチを Pd-extended 上で Phase-bash シンセシスを用いてリアルタイムに加工したものである [18]。

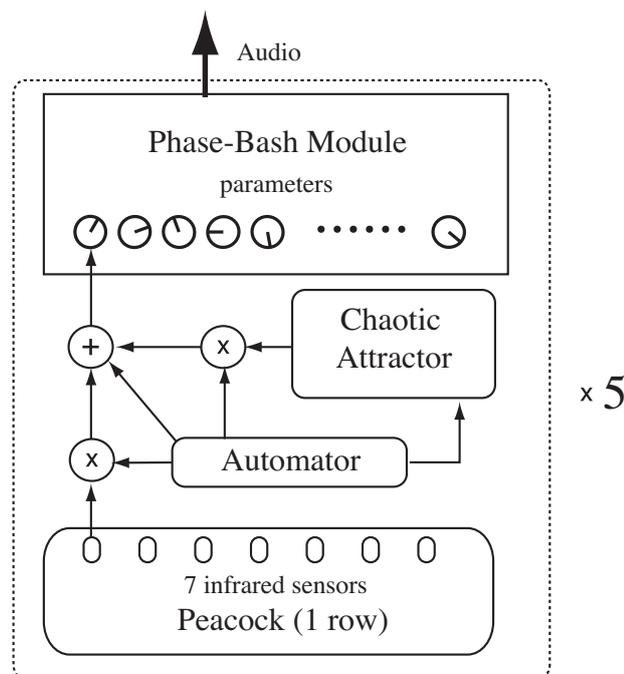


図 10. Phase-Bash モジュールの制御構造

Peacock のようなシステムをはじめ、デジタル・インターフェースを用いた音楽パフォーマンスの優位性とし

て、古典的な楽器の演奏においては不可能な、「動作と音のマッピングの可変性」があげられる。本作品では全体に渡って、Pd-extended パッチに組み込まれたオートメータによって、音と動作のマッピングが常に漸次的に推移しており、奏者が全く同じ動作を行っても、曲中で同じ音響的結果が生まれる事は皆無である。即ち、動作とそれに対するシステムの音響的反應の関係性とその時間軸上の展開が、作品の一つの主題となっている。これに加えて、Peacock は非接触型インターフェースなので、Lemur などの接触型システムや Inside 型システムに比べて、奏者がより自由でダイナミックな動きをする事ができ、聴衆に奏者の動作が視認しやすく、これにより上記の「マッピング」という主題への興味を喚起し易い。また、この事を利用して、演奏操作の動きの中にある種の演劇的な示唆を加える事も可能である。

さらに、Black Vox では、この「マッピングの推移」に加え、もう一つ「音操作主体の推移」も主題となっている。曲中、Phase-bash シンセサイザのパラメータをコントロールするのは奏者の動作のみではなく、オートメータや、オートメータにより操作されているカオス・アトラクタ¹も、曲中の様々なセクションにおいて、シンセシス・モジュールに操作を加えるため、「オートメータ」「カオス・アトラクタ」「奏者の動作」の三者がモジュールの複数のパラメータを個々に、あるいは同時にコントロールすることとなる。これにより、前述したマッピング、「動作がどのように音に反映されているのか?」、という主題に加え、そもそも「音を操作してるのは誰なのか?」という変わりゆく音操作の主体も作品の主題として作品中に提起されている。

作品のパッチ上には 5 基の Phase-bash モジュールが独立して稼働しており、Peacock の 1 行分、横並びの 7 個のセンサーが 1 つのシンセシス・モジュールに対応している。そして、前述した 2 つの移りゆく主題は言わば 5 声の対位法として作品中に展開されていく。

また、セクションによっては、センサーと奏者の手の距離、即ち縦方向の動きが音のパラメータにマップされているだけではなく、奏者が左右に手を動かすとそれに従って音像がパンニングされるなど、多次元的なマッピングが試みられている。

6.2. Liquid Flame (2010)

Black Vox の発展形として制作したこの作品は、Peacock による電子音響の演奏と、リアルタイムに描画されるインタラクティブなコンピュータ・グラフィックス

¹ カオス・アトラクタは Pd-extended 上にエクスターナル・オブジェクトとしてテント写像を実装したものである。無機的で直線的なオートメータの操作と、有機的で複雑な奏者の動作による操作を補完するものとして機能する。

を組み合わせた作品である。映像ソフトウェアは本作品のために OpenGL と GLSL を用いてプログラムされた。

この作品における音響・映像も Black Vox と同様に、オートメータにより漸次的に展開してゆき、そこに奏者の操作によるパラメータへの即興的な介入が加えられる形となっている。映像は奏者の後ろにあるスクリーンに映写され、奏者のシルエットが映像と重なりあう。演奏者の動作、電子音響、そしてライブ映像の三者が統合された表現は、照明に影響されない赤外線センサーを基調としたデバイスの利点を活用したものといえる。

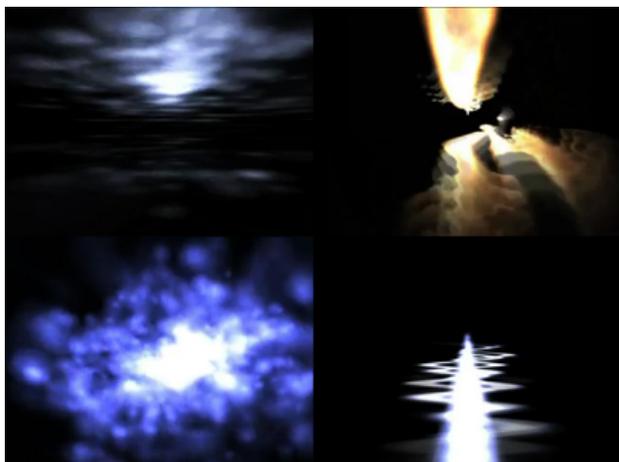


図 11. Liquid Flame のライブ映像

7. 結論

センサーから生じるノイズや、触覚的フィードバックの欠如、デバイスの再生産性の低さなどの課題は残るものの、Peacock はバスパワーで動作する USB 機器としてのモビリティ、照明に影響されずパフォーマンスが出来る汎用性の高さ、検知の3次元性、ケーブルの断線などのハードウェア的なリスクの低さ、軽い CPU コスト、サンプリングの速度という点に於いて、パフォーマンスに際して有効なシステムであると考えられる。

8. 今後の展望

8.1. ノイズの軽減

センサーからのノイズの問題は現在のところ Pd-extended 内で、LPF を適応して対処しているが、バイパス・コンデンサーの数を増やす、赤外線センサーに現在とは違ったコンポーネントを用いる等、ADC の手前でハードウェア的にノイズを低減させる事を検討している。

8.2. 動作認知システムの実装

現段階では Peacock は、単純に 35 個の赤外線センサーからの値を音楽パラメータに直接マップして利用する装置であり、奏者の特定の動作を認識する機能は組み込まれていない。時間軸上の手の動きを追跡し、それを解析し、何らかの音楽的命令とマップすることで、指揮者とオーケストラのような、音楽テキストチャに対するメタレベルでのコントロールが可能になる。Peacock の直接的な「楽器」としての使用法と、メタレベルの「指揮者」としての使用法の二重性により身体と音響との多層的なインタラクションの構築が期待できる。この動作解析アルゴリズムの実装のために DSP 用の CPU 資源を消費しないよう、Nvidia の CUDA や OpenCL などの GPGPU(General Purpose Graphic Processing Unit) テクノロジーの活用を視野にいれている [19, 20]。

9. 参考文献

- [1] Korg Kaoss Pad, <http://www.korg.com/> (アクセス日 2010 年 9 月 20 日)
- [2] JazzMutant Lemur, <http://www.jazzmutant.com> (アクセス日 2010 年 9 月 20 日)
- [3] Mulder, A. *Human movement tracking technology*, <http://www.xspasm.com/x/sfu/vmi/HMTT.pub.html> (アクセス日 2010 年 9 月 20 日)
- [4] Crackle.org — text and image archive for Michel Waisvisz, <http://crackle.org> (アクセス日 2010 年 9 月 20 日)
- [5] Jessop, E. “The Vocal Augmentation and Manipulation Prosthesis (VAMP): A Conducting-Based Gestural Controller for Vocal Performance”, *NIME2009* プロシーディングス pp.256-259
- [6] RJDJ, <http://www.rj dj.me/> (アクセス日 2010 年 9 月 20 日)
- [7] 田中能 “Mapping Out Instruments, Affordances, and Mobiles”, *NIME 2010* プロシーディングス pp.88-93, 2010
- [8] Oh, J. Herrera, J. Bryan, J. Dahl, L. and Wang, G. “Evolving The Mobile Phone Orchestra”, *NIME 2010* プロシーディングス pp.82-87, 2010
- [9] Rokeby, D. *Soft VNS*, <http://homepage.mac.com/davidrokeby/softVNS.html> (アクセス日 2010 年 9 月 20 日)
- [10] Oliver, J. “The Mano Controller: A video-based hand-tracking system”, *ICMC 2010* プロシーディングス, 2010

- [11] National Semiconductor ADC0838 , <http://www.national.com/mpf/DC/ADC0838.html#Overview> (アクセス日 2010 年 9 月 20 日)
- [12] Atmel Corporation AVR ATtiny2313 , http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/DOC2543.PDF (アクセス日 2010 年 9 月 20 日)
- [13] FTDI Chip TTL-232R-USB , http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/Cables/DS_TTL-232R_CABLES.pdf (アクセス日 2010 年 9 月 20 日)
- [14] The Pure Data Portal, <http://puredata.info/> (アクセス日 2010 年 9 月 20 日)
- [15] Woo, M. Neider, J. and Davis, T. *OpenGL Programming Guide* Addison-Wesley, 2007.
- [16] *Limiting execution to certain CPUs* , http://www.gnu.org/s/libc/manual/html_node/CPU-Affinity.html (アクセス日 2010 年 9 月 20 日)
- [17] Wright, M. and Freed, A. "Open Sound Control: A New Protocol for Communicating with Sound Synthesizer" *ICMC 1997* プロシーディングス pp.101-104, 1997
- [18] Puckette, M. "Phase Bashing for Sample-Based Formant Synthesis", *ICMC 2005* プロシーディングス pp.733-736, 2005
- [19] NVidia *CUDA Zone* , http://www.nvidia.com/object/cuda_home_new.html (アクセス日 2010 年 9 月 22 日)
- [20] Khronos Group *OpenCL* , <http://www.khronos.org/opencl/> (アクセス日 2010 年 9 月 22 日)

にも従事している。作曲、コンピュータ音楽を、葉孝之、Cort Lippe、Erik Ona、Georg Friedrich Haas、Jeffrey Stadelman らに師事。第 30 回ブルーージュ国際電子音楽コンクール(フランス) レジデンス部門佳作、2006 年 Scrimo 電子音楽コンクール(フランス) ファイナリスト。2009 年 Prix Destellos(アルゼンチン) 特別賞、2010 年 ASCAP/SEAMUS 委嘱コンペティション(アメリカ) 2 位受賞。2004 年度より、ICMC(International Computer Music Conference) に作品が 7 度連続入選、2008 年より、NIME(New Interfaces for Musical Expression) に 3 年連続入選。その他、現在までに世界 17 カ国の様々なフェスティバルに於いて作品発表を行っている。ギタリストの Jose Navarro 氏、ピアニスト渋谷淑子氏、スイスの Espace Sonore などによる委嘱多数。作品は ICMC 2005 公式 CD、及び MIT Press の Computer Music Journal 28 号に収録されている。2010 年には 7 月と 11 月にアメリカ・マイアミとスイス・バーゼルにおいてそれぞれ委嘱単独コンサートを開催、8 月にはアルゼンチンの Destellos Foundation にレジデンス・コンポーザとして滞在。

<http://chikashi.net>

10. 著者プロフィール

美山千香士 (Chikashi Miyama)

1979 年生まれ。作曲家、プログラマ、ビデオ・アーティスト、インターフェース・デザイナー、パフォーマー。「視覚と聴覚の新たな関係性」をキーワードにメディア、テクノロジーを駆使した作品制作に従事している。2004 年に国立音楽大学音楽デザイン学科修士取得。修了時に大学院研究奨励金を受領し渡欧。2007 年にスイス、バーゼルの Musik-Akademie, Hochschule fuer Musik より Nachdiplom 取得。その後、ニューヨーク州立大学バッファロー校から Presidential Fellowship と Art and Science Special Scholarship のオファーを受け渡米。現在博士課程 4 年。また、同校で TA として後進の指導