

# 電気刺激フィードバック装置の開発と 音楽パフォーマンスへの応用

長嶋洋一(SUAC)  
赤松正行(IAMAS)  
照岡正樹(VPP)

8チャンネル電気刺激方式生体フィードバック装置"PiriPiri-3"および"PiriPiri-4"をSUAC/IAMAS/VPPの共同研究により開発した。リアルタイムMIDI情報を受けて、生体に張り付けた電極により、多種の電気刺激をシステムからのフィードバックとして与えることが可能である。本発表では、そのコンセプトとシステムデザイン、多数の被験者を使つての評価実験、音楽パフォーマンスへの応用などに関する研究報告の第一弾を行う。

## Development of Bio-Feedback System and Applications for Musical Performances

Yoichi Nagashima (SUAC) \*  
Masayuki Akamatsu (IAMAS)  
Masaki Teruoka (VPP)

\* [nagasm@computer.org](mailto:nagasm@computer.org)

This paper reports the development and application of new electromyogram bio-feedback system called "PiriPiri-3" and "PiriPiri-4". This system has 8 channels of electric feedback system like low-frequency massage device. We also discuss the experiments of this system and applications in musical performances.

### 1. はじめに

コンピュータ音楽を中心としたメディア・アート、センサ等のシステムと人間とのインターフェース等に関するテーマの研究活動とともに、その具体的な応用を実験的に検証する意味で、実際にいろいろなインタラクティブ・マルチメディア作品を創作して公演・発表する活動を行っている(1-20)。オリジナルの実験システムをリアルタイムパフォーマンスに応用することで、開発の過程や作品・公演の中から新たな研究テーマや課題が出てくることも多い。

本稿では、筋電センサ"MiniBioMuse-III"の開発(電氣的生体情報センシング)に引き続き、これと逆方向、すなわち生体に電気刺激によりシステムからのフィードバックを行う、という新しいコンセプトで開発した生体電気刺激フィー

ドバック装置のシステムデザインの詳細と、この評価実験の第一ステップ、さらにこのシステムを音楽パフォーマンスの中心に据えた具体的な作品公演の報告を行う。

### 2. 生体電気刺激装置の解析

生体に電気刺激を与える、という装置は、拷問・刑罰や護身・防御の用途に限ったものではなく、一般的にも健康器具としてよく知られている。従来から高齢者向けの「低周波治療器」として、主に痛み止めや筋肉マッサージの目的で広く普及しており、さらに昨今では同じ原理で筋肉に電気刺激を与えて「運動」(エネルギー消費)させる、というタイプのダイエット機器が爆発的に流行してきた。これらはいずれも、パルス状の高電圧電気信号を、皮膚に取り付けた

電極によって生体に与えて、これが神経および筋肉を刺激するという原理によっている(図1)。

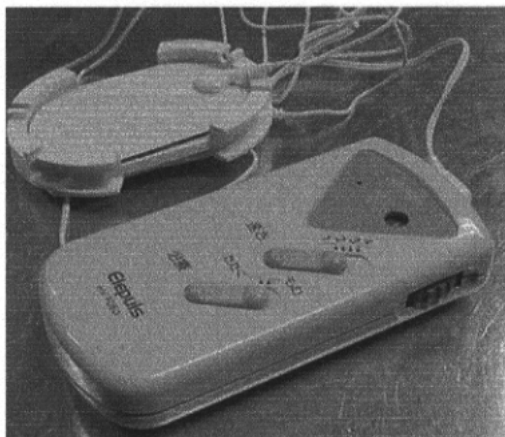


図1 低周波治療器の例(OMRON)

我々はまず、生体フィードバックのシステムのベース(要素部品)として、市販の低周波治療器を活用することとした。その理由は、一般の電子部品を使った場合には、いくらでも容易に強力な電気刺激を発生できるが、これは医学的な人体の許容範囲を越えて障害や生命の危険もあるからである。これに対して、市販の健康器具として必要な規格を満足している低周波治療器を改造した場合には、その製品の最大規格以上の危険な電気刺激が発生してしまうリスクが回避できるからである。この点は、筋電センサで生体情報をセンシングする場合との大きな違いである(21-31)。

図2から図4は、市販の低周波治療器(OMRON製「エレパルス」)の実際の出力電気信号を計測した例である。この装置の場合、動作モードとして「もむ」「たたく」という2種類があるが、電気刺激パルスは図2および図3のように全てパルス幅が約1msecで均一であり、さらに一定時間ごとに正と負の極性を反転させて生体の緊張を弛緩させるようになっていた。

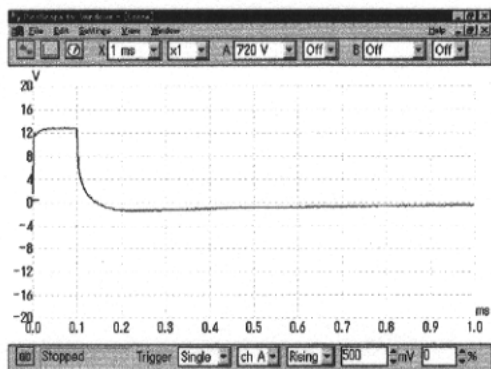


図2 低周波治療器の出力正パルスの例

図2は強さ「3」で約130ボルト、図3は最強の強さ「5」で約170ボルトの電圧である。「もむ」モードでは約30Hzから約100Hzまでの4段階が図4のようにバースト状に約0.9秒ごとにON/OFFしつつ約7秒ごとに極性反転し、「たたく」モードでは約2Hzから約10Hzのパルス列が連続しつつ約7秒ごとに極性反転した。

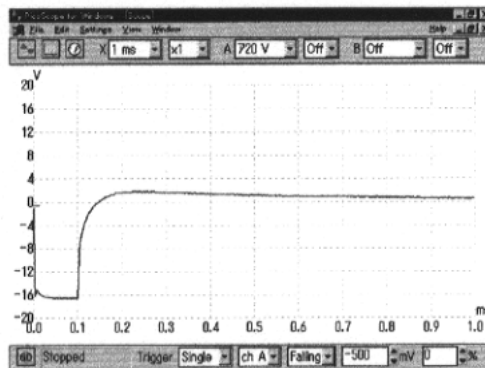


図3 低周波治療器の出力負パルスの例

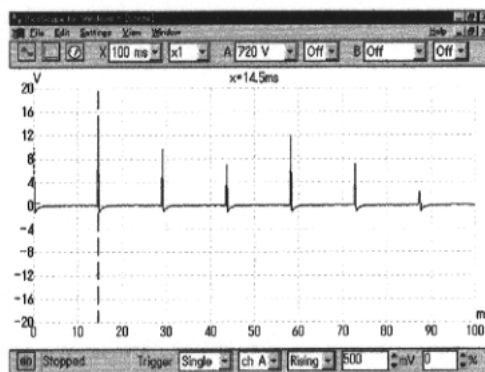


図4 「もむ」モードのバースト内の波形の例

この解析結果および回路解析(紙面の都合により詳細省略)から、我々は、(1)基本的にOMRONの製品からトランスを部品として活用し、OMRONの回路と同じ動作電圧までの動作として基本的な生体限度の範囲内とする、(2)パルス幅、パルス周期、反転モード、動作モードなどはプログラマブルにするとともに、パルス波形として矩形波だけでなく色々な波形を実験できるようにする、という基本方針を決定した。

### 3. "PiriPiri-1"の開発

生体センシングの場合には、御動作しても計測データが正しくないだけであるが、生体フィードバックの場合のミスは人命にかかわるので、システムの開発はステップを追って慎重に行いつつ仕様を検討していった。最初に実験試作したのは"PiriPiri-1"と呼ばれるシステム(図5)で、ブラック基板の上にOMRONの製品基板を

そのまま置き、特殊な負電源回路であったOMRONのマイコン出力を一般のデジタル信号に変換し、トランス出力段のトランジスタ回路のみをオリジナル設計の回路に置換したものである。

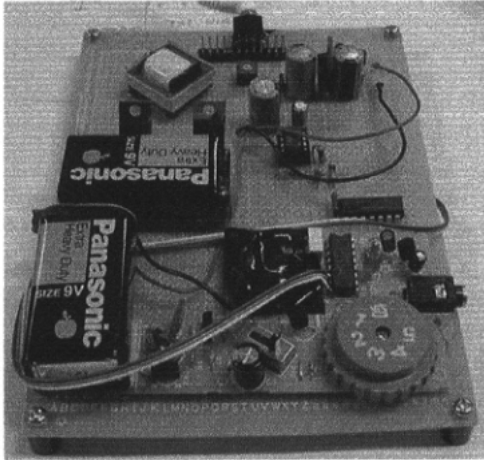


図5 システム"PiriPiri-1"

#### 4. "PiriPiri-2"の開発

この実験システム"PiriPiri-1"の動作確認を経て、次に試作したのが、図6にある"PiriPiri-2"である。これは外見はバラック基板の上にあるが、MaxからのMIDI制御情報の受信により全てのパルス出力(D/Aコンバータ出力によりパルス電圧も連続制御)からトランス出力回路まで全てオリジナル回路となり、OMRONの部品はトランス(上部の放熱器の陰)だけになった本番さながらのシステムである。実際にこのシステム(2チャンネル出力)は応用作品のリハーサルおよび本番でもステージで使用した。アナログ連続値であるパルス出力をパワートランジスタでドライブしたところ、予想外の発熱にあわてて放熱器を大型のものに置換するなど、トライアンドエラーによってシステムを完成に導いた。

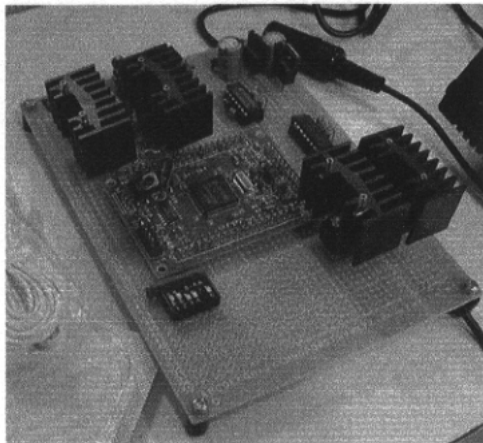


図6 システム"PiriPiri-2"

この"PiriPiri-2"によって、システム中枢のカードマイコンAKI-H8のファームウェアとして、以下のようなプログラマブルな仕様が次第に決定されてきた。

パルスの大きさ MIDIで127段階リニア  
 パルスの極性 プログラマブル  
 パルス波形 波形テーブル(256アドレス)選択  
 パルス幅(MIDI 0-127)

[0]=200  $\mu$ secから[127]=4msecまで指数特性  
 パルス間隔(周波数)(MIDI 0-127)

[0]=1Hz(1sec)から[127]=200Hz(5msec)まで  
 また合わせて、パフォーマンスで利用する上では、電気刺激が来ていることを明示的に示すことが有効である、という視点から、パルスと同時に対応してLEDを点灯させる、という仕様も加わった。

#### 5. "PiriPiri-3"の開発

作品公演のための作曲/リハーサルと並行しての開発のため、2チャンネルではあるが同等の電気刺激を出力するシステム"PiriPiri-2"を作家チーム(赤松・三輪・古館)に送りつつ、これを(1)1台で8チャンネルの電気刺激を別個に制御しつつ同時に出力し、(2)パフォーマーの腰にぶら下げられるような小型軽量化をはかり、(3)同時使用のために2セットを製作、というテーマで開発したのが、図7のシステム"PiriPiri-3"である。

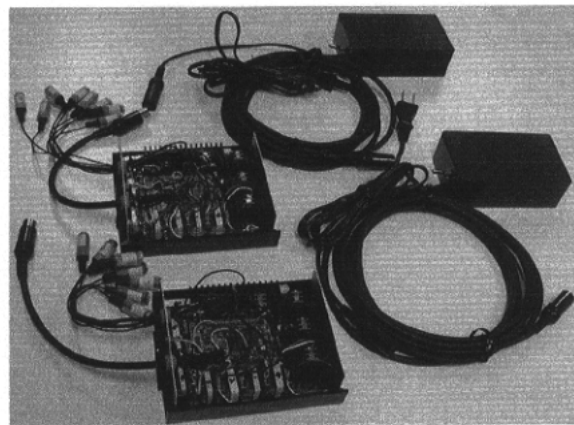


図7 システム"PiriPiri-3"

ここでは、筋電センサMiniBioMuse-III"で駆使した空中配線の技法を再び駆使し、同時に8チャンネル8トランス16トランジスタの放熱を考慮して林立した放熱器を1パッケージ化することとなった。低周波治療器用の電極パッドに接続するミニジャックが鈴なりになる、という異様な外見ながら、なんとか岐阜・神戸・京都での公演に間に合って完成したこのシステムの仕様は以下のようなものとなった。

●DIP SW

電源ON時にこの状態を見る  
 1 2 3 4 の4ビットで受信MIDIチャンネルを指定  
 (SW1をMSBとする4ビット2進数+1=MIDI channel)  
 [1 2 3 4]=[off off off off] MIDI 1 channel  
 [1 2 3 4]=[off off off on] MIDI 2 channel  
 . . . . .  
 [1 2 3 4]=[on on on on] MIDI 16 channel  
 5 は何もなし  
 6 は[off]で1台目(電極番号=0-7) [on]で2台目(電極番号=8-15)  
 ホストは電極番号0-15の情報を自由に送り、マシンはSW6の初期状態により、自分が1台目(電極番号=0-7)であるか2台目(電極番号=8-15)であるかを知って、該当する情報だけを受ける

●MIDI制御プロトコル

ポリフォニックプレッシャー [polyout]  
 MIDIチャンネルが上記DIPスイッチ設定と合致した時のみ有効  
 16進表記 [An px yy]  
 n : 4bit(0-F) MIDI channel(上記)  
 p : 3bit(0-7) パラメータ番号(下記)  
 x : 4bit(0-F) 電極番号(0-7/8-15)  
 yy : 7bit data (0-7F)

●パラメータ概要

[p]=000 / [x]=0-15 : px=0-15  
 正パルス(A)・電極番号[x] パルスの大きさ(yy=1-127:  
 ON yy=0:OFF)  
 パルスの大きさを127段階でリニアに乗算する  
 初期状態: OFF  
 負パルスがまだONだった場合それをOFFとしてこちらを出す

[p]=001 / [x]=0-15 : px=16-31  
 電極番号[x] パルス波形(yyの下3ビットで8種類: 000-111)  
 パルスの波形テーブル(256アドレス8ビット量子化)を選択  
 初期状態: [000]=矩形波  
 波形は以下のとおり  
 000 矩形波  
 001 滑らかに上昇し下降(サインの-90度から270度まで)  
 010 直線上昇、直線下降の三角波  
 011 最大から最小まで直線的に下降する鋸歯状波  
 100 滑らかに下降(サインの180度から270度まで)  
 101 滑らかに下降(サインの90度から180度まで)  
 110 最小から最大まで直線的に上昇する鋸歯状波  
 111 滑らかに上昇(サインの-90度から90度まで)  
 正負パルスでこのパラメータは共通

[p]=010 / [x]=0-15 : px=32-47  
 電極番号[x] パルス幅(yy=0-127)  
 パルス幅を[0]=200μsecから[127]=4msec まで指数スケール  
 で設定 128段階で20倍  
 初期状態: 0 (100μsec)  
 正負パルスでこのパラメータは共通

[p]=011 / [x]=0-15 : px=48-63  
 電極番号[x] パルスの間隔(周波数)(yy=0-127)  
 パルス周波数を[0]=1Hz(1sec)から[127]=200Hz(5msec) まで  
 指数スケールで設定 128段階で200倍  
 初期状態: 0 (0.5Hz=2sec)  
 正負パルスでこのパラメータは共通

[p]=100 / [x]=0-15 : px=64-79  
 負パルス(B)・電極番号[x] パルスの大きさ(yy=1-127:  
 ON , yy=0:OFF)  
 正パルスがまだONだった場合それをOFFとしてこちらを出す

[p]=101 / [x]=0-15 : px=80-95  
 ★ワンショットモーター(詳細省略)

[p]=110-111 reserved(MIDI送信しないこと)

6. 音楽パフォーマンスでの応用

本プロジェクトの特長として、まだシステムが具体化されていない段階でコラボレーションの3者(SUAC/IAMAS/VPP)がミーティングに集い、ここでのアイデアの交換を受けて、次にメンバーMLを設置し、システム検討・開発と同時に進行で音楽パフォーマンス作品への応用を検討する、というユニークな形態をとった。ま

た、最終的なシステム"PiriPiri-3"の前段階で、同等の電気刺激を2チャンネルだけ出力する試作システム"PiriPiri-2"をSUAC/VPPで開発してIAMASに送ったため、公演に使えるシステムが開発されるまで待つことなく作曲が進んだ。以下は、IAMASで本システムを応用して2002年2月-3月に発表公演された具体的な3つの作品の簡単な報告である。これらの公演の正式・詳細な報告、あるいはさらに発展した作品の公演も、後日IAMASにおいて計画されている。

6-1. 作品「Flesh Protocol」

作曲: 赤松正行  
 パフォーマンス: 赤松正行/角正之  
 公演: 2002.2.23 ジーベックホール (神戸市)

重力の影響を排除して電気刺激による身体反応を鮮明にするためにピアノ線で吊るされたダンサーが、リアルタイム生成音響と同期した生体刺激と青色LEDディスプレイを伴ったパフォーマンスを行った作品。極限まで筋肉を鍛え上げたダンサーは一般人には耐えられないほどの電気刺激でもまだレベルが不足する、という驚くべき事実と直面した。

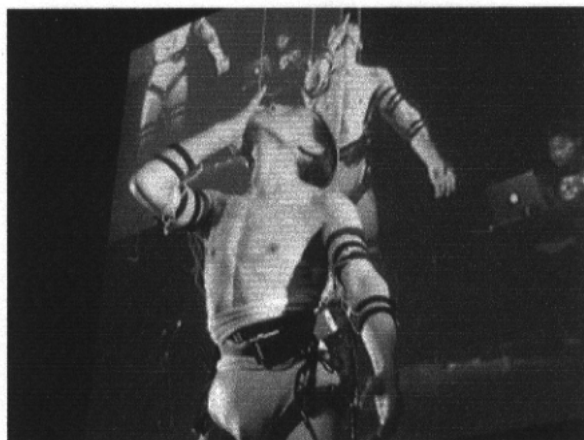
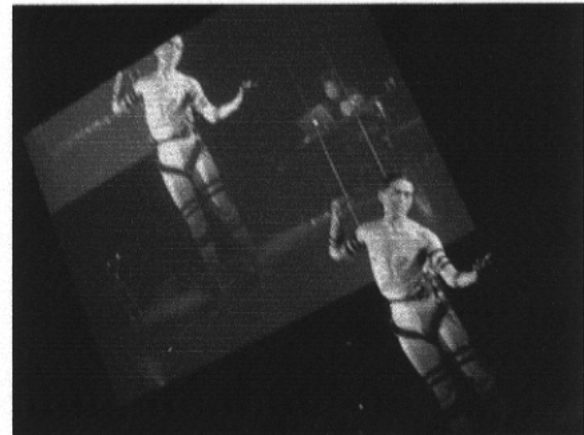


図8 作品"Flesh Protocol"の公演風景

## 6-2. 作品「流星礼拝」

作曲：三輪眞弘

パフォーマンス：三輪眞弘／丸尾隆一／松本祐一／松永ケイ子／川村武子

(テクニカルサポート：古舘健)

公演：2002.3.24 京都芸術センター（京都市）

車座に座った4人のパフォーマーに刺激電極が取り付けられ、それぞれのパルスによって手に持ったパーカッションが発音する。インターネット上を流れる情報の中に潜んだ暗号のようなキーワードが解読された瞬間に、作曲者の主宰する新しい宗教の信者だけがそのお告げを受けることができる。というコンセプトの作品。



図9 作品「流星礼拝」の公演風景

## 6-3. 作品「It was going better If I would be sadist truly.」

作曲：古舘健

パフォーマンス：古舘健／松永ケイ子／川村武子

公演：2002.2.22 ソピアホール（大垣市）

レコードをスクラッチする音響情報からの電気刺激により作曲者本人が痙攣する作品。

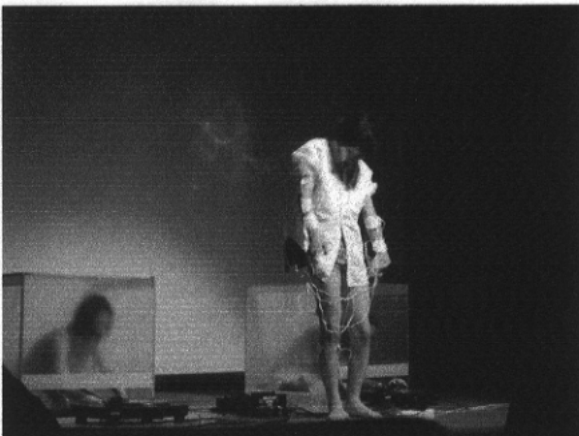


図10A 作品「流It was going better...」の公演風景



図10B 作品「流It was going better...」の公演風景

## 7. "PiriPiri-4"の開発

以上の3作品の公演を行うなかで、小型軽量8チャンネルシステムとして開発した"PiriPiri-3"の問題点・改良希望点が明確になった。その第一は発熱問題であり、小型化のために高密度化されたケース内での発熱量は連続動作においてトランジスタの熱暴走→電源保護機構による出力停止→システムストップを引き起こした。このため公演においてはケースを空けて冷却剤と密着することで緊急対応した。第二の問題点は電気刺激レベル(パルス出力電圧)であり、プロのダンサーには一般的な電気刺激パルスでも強度が不足する問題が指摘された。さらに電気刺激と同期点灯するLEDについての希望、ケーブルを延長しながら必要に応じて抜き取りたい希望、ブラジ・ジャックを用いたために、身体動作等により電極が接触不良(断線と同じトラブル)になる問題点も提起された。これを受けて再びMLによって検討した結果、"PiriPiri-3"をさらに発展させた新しいシステムとして"PiriPiri-4"(図11)を改造・開発した。

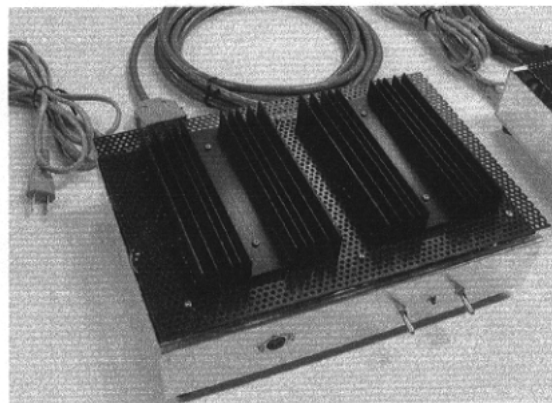


図11 システム"PiriPiri-4"

ここでは、あくまで同じOMRONのトランスを部品として利用する、という一線だけは守った上で、小型軽量携帯型というメリットを捨て

て、(1)巨大な放熱器による連続動作に対する安定性の確保、(2)トランジスタのドライブ電圧を2倍として生体刺激電圧を倍増(一般人の場合にはパルスレベルを半分以上にはMIDI設定しない)、(3)プラグジャックを排してケーブルを直接に端子板から接続することによる信頼性の向上、(4)生体刺激と同期したLED点灯のための専用マイコンの増設により別個の点灯制御を実現、という全面的な改良を行った。(図12)

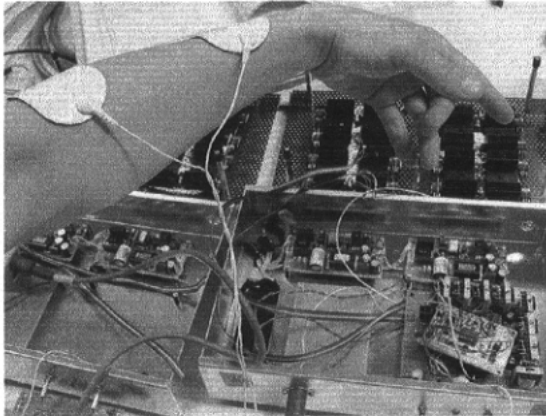


図12 システム"PiriPiri-4"の開発風景

## 8. 電気刺激を「聞く」可能性

市販の低周波治療器の場合には、電気刺激パルスの形状は単純な矩形波のみであるが、本システムでは各種のパルス波形やパルス幅を可変としたことで、実際に体感される刺激が異なり、刺激の相違(異なった情報)を容易に弁別知覚できることを確認できた。また、予備的実験において、パルスでなく具体的な音楽音響信号を高電圧化して刺激電極に与えてみると、また別種の興味ある反応を得ることができた。これは、聴覚障害者などが生体フィードバックによって音楽を聴く、というような可能性、あるいは複数の電気刺激を和音のように知覚してそれぞれの音源分離を行う、というような可能性をも示唆している。今後、このような点についても実験・検討を進めてみたいと考えている。

## 9. おわりに

8チャンネル電気刺激方式生体フィードバック装置をSUAC/IAMAS/VPPの共同研究により開発した。人間の振る舞い・生理状態や身体表現の情報とメディアアートとの双方向・インタラクティブな熱い関係をさらに求めて、今回の開発・公演はさらに新しい次のステップにつながることとなった。今後のさらに発展した内容や結果は、またいずれ次の機会に報告したい。

## 参考文献

- [1] Y.Nagashima : Multimedia Interactive Art : System Design and Artistic Concept of Real-Time Performance with Computer Graphics and Computer Music, Proceedings of Sixth International Conference on Human-Computer Interaction (ELSEVIER), 1995年
- [2] Y.Nagashima et al. : A Compositional Environment with Interaction and Intersection between Musical Model and Graphical Model --- "Listen to the Graphics, Watch the Music" ---, Proceedings of 1995 International Computer Music Conference, 1995年
- [3] 長嶋洋一 : マルチメディア・インタラクティブ・アート開発支援環境と作品制作・パフォーマンスの実例紹介、情報処理学会研究報告 Vol.96, No.75 (95-MUS-16) (情報処理学会), 1995年
- [4] 長嶋洋一 : センサを利用したメディア・アートとインスタレーションの創作、京都芸術短期大学紀要 [瓜生] 第20号1997年、1998年
- [5] 長嶋洋一 : 生体センサによる音楽表現の拡大と演奏表現の支援について、情報処理学会研究報告 Vol.98, No.74 (98-MUS-26), 1998年
- [6] Y.Nagashima : Real-Time Interactive Performance with Computer Graphics and Computer Music, Proceedings of the 7th IFAC/IFIP/FORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Man-Machine Systems, 1998年
- [7] Y.Nagashima : BioSensorFusion: New Interfaces for Interactive Multimedia Art, Proceedings of 1998 International Computer Music Conference, 1998年
- [8] Y.Nagashima et al. : "It's SHO time" -- An Interactive Environment for SHO(Sheng) Performance, Proceedings of 1999 International Computer Music Conference, 1999年
- [9] 長嶋洋一 : マルチメディアComputer Music作品の実例報告、情報処理学会研究報告 Vol.97, No.71 (94-MUS-7), 1994年
- [10] 長嶋洋一 : 「身体情報と生理情報」、長嶋・橋本・平賀・平田編「コンピュータと音楽の世界」、共立出版、1997年、pp.342-356
- [11] 長嶋洋一 : 「コンピュータサウンドの世界」、CQ出版、1999年、pp.148-166
- [12] 長嶋洋一 : メディアアートにおける画像系の制御について、情報処理学会研究報告 Vol.2000, No.76 (2000-MUS-36), 2000年
- [13] 長嶋洋一 : 静岡文化芸術大学スタジオレポート、情報処理学会研究報告 Vol.2000, No.118 (2000-MUS-38), 2000年
- [14] 長嶋洋一 : インタラクティブ・メディアアートのためのヒューマンインターフェース技術造形、静岡文化芸術大学紀要第1号2000年、2001年
- [15] 長嶋洋一 : 新・筋電センサ"MiniBioMuse-III"とその情報処理、情報処理学会研究報告 Vol.2001, No.82 (2001-MUS-41), 2001年
- [16] Atau Tanaka : Musical Technical Issues in Using Interactive Instrument Technology with Application to the BioMuse, Proceedings of 1993 International Computer Music Conference, 1993年
- [17] William Putnam : The Use of The Electromyogram for the Control of Musical Performance, Doctoral Thesis of Stanford University, 1993
- [18] 藤原義久・前川聡 : 「独立成分分析による筋電データからの各指運動の分離」、信学技報MBE99-7、電子情報通信学会、1999年、pp.41-46
- [19] ノイマンピアノ(赤松正行+佐近田展康) : 「トランスMaxエクスプレス」、リットーミュージック、2001年
- [20] 長嶋洋一 : 生体センサとMax4/MSP2による事例報告、情報処理学会研究報告Vol.2002, No.14 (2002-MUS-44), 2002年
- [21] 内藤耕二 : 「生体の電気現象 (I)」、コロナ社、1967年
- [22] 綿貫他 : 「生体用テレメータ・電気刺激装置」、コロナ社、1980年
- [23] ジョンH.ウォーフィル : 「図説 筋の機能解剖 第4版」、医学書院、1993年
- [24] 服部孝道監訳 : 「一目でわかるニューロサイエンス」、メディカルサイエンスインターナショナル、2000年
- [25] 古川孝編 : 「(特集) 治療に役立つ電気刺激」、クリニカルエンジニアリング2001-1、秀潤社、2001年
- [26] 日本ME学会監修 ME選書4「生体の電気現象 [1]」、1966年
- [27] 日本ME学会監修 ME選書11「生体用テレメータ・電気刺激装置」、1980年
- [28] クレム・W. トンプソン : 「身体運動の機能解剖」、医道の日本社、2000年
- [29] 吉田徹 : 「医用計測技術」、コロナ社
- [30] <http://vpp.suac.net/>
- [31] <http://nagasm.suac.net/>