

生体信号の情報処理のためのプラットフォームについて

長嶋洋一†

筋電情報など生体信号の情報処理に関して、マイクロエレクトロニクスとオープンソースの進展により登場した新たなプラットフォームについて検討するとともに、新・筋電センサ回路を実装した生体情報処理システムについて紹介する。検討の対象とした生体情報は、血流/脈拍・脳波・心電・呼吸・体温・血圧・姿勢・皮膚電気抵抗・血糖値・筋電など約10種類、マイコン・プラットフォームはAKI-H8・Arduino・Propeller・Raspberry Pi・mbedの5種類である。実装の詳細や追試可能なサンプルコードも全て雑誌記事とWebにて公開した。

A study of platforms for biologic information processing

YOICHI NAGASHIMA†

This is a report about new platforms for biological signal processing like electromyography information. Recently we can get good systems that appeared from the development of micro-electronics and open-source culture. I introduce the biological information processing system that implements the new EMG sensor and the new mbed-platform. The target examples of biological information are blood flow / pulse, EEG, ECG, respiration, body temperature, blood pressure, attitude, galvanic skin resistance, blood sugar levels, and EMG. The target examples of microcomputer platform are AKI-H8, Arduino, Propeller, Raspberry Pi and mbed.

1. はじめに

筆者はこれまで、Computer Musicやメディアアートに関連する研究/システム開発/作曲/公演/教育などの活動を続けてきた[1]。Computer Musicの作曲の一部として新インターフェースや新楽器を制作しているが、その中で筋電センサ等の生体センサを新たに開発してきた[2-23]。また、GainerやArduinoなどが出現する前から、過去には秋月電子(秋葉原)のAKI-80やAKI-H8などのマイコンを活用してきたこともあり、オープンソース文化とともに普及してきたスケッチング(物理コンピューティング)について研究し、汎用のプラットフォームも開発してきた[24-40]。

本稿では、2015年2月末に刊行される「インターフェース」誌(CQ出版)2015年4月号「生体情報の信号処理」特集記事の執筆依頼を契機に、筋電情報など生体信号の情報処理に関して調査[41-65]した上で整理し、マイクロエレクトロニクスとオープンソースの進展により登場した新たなプラットフォーム(マイクロコントローラ)について検討するとともに、新・筋電センサ回路を実装した生体情報処理システムを開発したので紹介する。実装の詳細や追試可能なサンプルコードも全て雑誌記事と資料Web[66]にて公開しているので適宜参照されたい。

2. 生体情報と生体信号の計測

大きく生体情報を分類すると、(1)生命体として生きている証しであるバイタルサイン(血圧、脈拍、呼吸、体温、排尿/排便、瞳孔反射、脳波など)、(2)反射(無意識の反応)、(3)随意運動(意志/意図に基づく運動、発声/発音、脳波など)、の3種類があり、本稿で対象とするのは(3)のみである。

また生体情報の計測は大きく「非接触計測」と「接触計測」に分かれ、前者には画像認識・サーモグラフィー・医学的計測(レントゲン、CTスキャン、超音波エコー等)があるが本稿では扱わない。また後者には大きく3領域あるうち、「化学的計測」(ホルモン、血糖値・・・)は本稿では扱わず、「物理的計測」と「電氣的計測」(ここがメイン、次節で解説)について検討する。

生体情報の物理的計測の例としては、呼吸の計測のために口頭/鼻先に置いたセンサで風量変化を検出したり、胸部に巻いた伸びセンサで肺の伸縮を検出したり、鼻先のCO2濃度センサの変化を計測する。また心拍の計測には、指先/耳たぶのクリップに赤外LED→フォトTRのペアを配置して、ヘモグロビン濃度変化に対応した透過光量変化を検出する。血圧は血管に加圧して心音から計測し、体温は温度センサで絶対値を計測する。皮膚電気抵抗(GSR: GalvanicSkinResponse)とは皮膚の電気伝導度のことで、汗腺(交感神経系)が影響する。姿勢の計測には、身体に取り付けた3次元加速度センサの重力方向に対する成分から推定する。最近では高感度マイクから筋肉の状態を計測する筋音の計測事例もある。

3. 生体情報の電氣的計測と注意点

生体情報の電氣的計測については、基本的に神経繊維が高速の化学反応によりインパルスを伝播させる電気信号を検出する。ここには脳波(EEG: ElectroEncephaloGram)、心電(ECG: ElectroCardioGram)、筋電(EMG: ElectroMyoGram)の3種類が相当する。なお筋電にはさらに皮膚内部の神経繊維付近まで電極針を刺す「針筋電」と「表面筋電」と「誘発筋電」(電気刺激に対する反射筋電分析)があるが、本稿では表面筋電のみを対象としている。

† 静岡文化芸術大学
Shizuoka University of Art and Culture

多くの経験則とともに、生体信号処理に特有の注意点も多い。まず電気信号の伝わり方として、神経や筋肉(内部)の活動電位が約100mVなのに対して、身体を伝導する際に1/1000~1/10000に減衰するために、電気信号として非常に微弱である。文献によりばらつきがあるが、表面電極で検出できる生体信号の電圧レベルは、EEG(脳波)で $1\mu\text{V}\sim 500\mu\text{V}$ 、ECG(心電)で $50\mu\text{V}\sim 2\text{mV}$ 、EMG(筋電)で $10\mu\text{V}\sim 10\text{mV}$ のオーダーである。また周波数帯域はおおよそDC~5kHz程度までであり、EEG(脳波)で0.5Hz~70Hz、ECG(心電)で0.1Hz~200Hz、EMG(筋電)で1Hz~2kHzである。

また生体を電気的に見ると信号源インピーダンスが相当に大きく、EEG(脳波)で $1\text{k}\Omega\sim 100\text{k}\Omega$ 、ECG(心電)で $1\text{k}\Omega\sim 100\text{k}\Omega$ 、EMG(筋電)で $100\text{k}\Omega\sim 10\text{M}\Omega$ のオーダーである。ここに周囲環境からハム(交流誘導ノイズ)等が乗る電圧レベルは100~1000倍のオーダーであり、ペア電極と差動増幅回路によりコモンモードであるハムをキャンセルすること(共通の基準電極も必要になる)、50Hz/60Hzを選択できるノッチフィルタで減衰させる事も必要となる。

表面電極による生体信号計測に特有の経験則として、アーティファクト(基線変動)という、電極の接触状態/人体の運動による100~1000倍のオーダーの偶発的ノイズの除去、さらに電極が皮膚に馴染むまで数分程度かかる、というノウハウも重要であり、長時間連続計測の場合には温度など周囲環境のドリフトにも注意する必要がある。

この他にも、生体信号に特有のポイントとして、閾値(細胞膜の脱分極→非線形動作)、不応期、生体環境に有害な電気刺激等を与えない(危険防止)、個人差/疲労/適応/学習について考慮する、被験者実験には被験者の同意書・倫理委員会の承認が必要、などの注意点がある。

4. 第5世代の筋電センサ回路

筆者がこれまでに開発してきた4世代の筋電センサについては文献[2-23]および資料Web[66]に譲り、ここではアナログ技術の専門家であるコラボレータの照岡正樹氏と新たに開発した第5世代の筋電センサ回路(図1)についてのみ紹介する。なお、この回路に採用したICや回路設計上のテクニックについての詳しい解説は「インターフェース」誌(CQ出版)2015年4月号「生体情報の信号処理」特集記事にあるのでそちらを参照されたい。

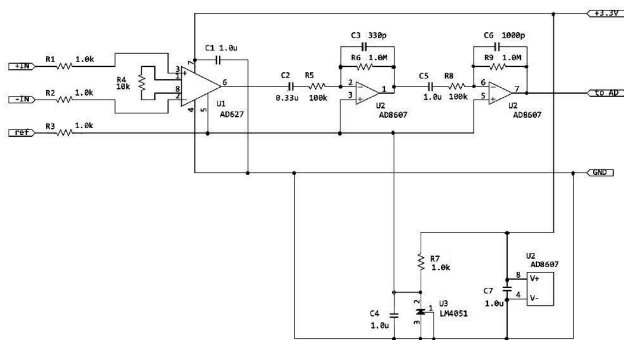


図1 新筋電センサ回路
Figure 1 The new EMG Circuit.

過去に開発した第3・第4世代の筋電センサにおいては、

センサ電極として性能の良好な純銀円板電極を採用し、導電ゴム電極も実験していたが、今回はセンサ回路の性能が向上したのを受けて、一般に普及している導電パッド電極を使用した。これは電気刺激マッサージ器の電極として皮膚に貼るタイプのもので、導電性の布素材と導電ジェルから構成されている。図2は「筋肉マウス」という電気刺激パッド付きUSBマウスの小型パッドを筋電電極に使用している様子で、導電ジェルを除去して圧迫することにした。

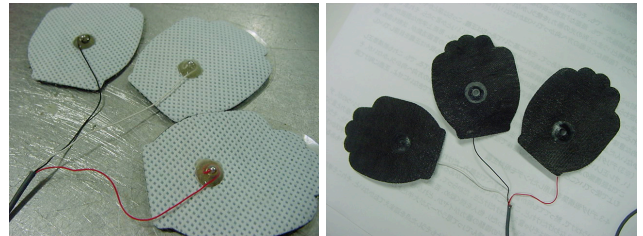


図2 新筋電センサの電極パッド
Figure 2 Pads of the new EMG Sensor.

これまでは筋電センサとホストPCとをMIDIやオーディオ信号などで接続していたが、微弱信号である生体センサではケーブルを伝導するノイズ対策が必至であるために、今回は筋電センサシステムをArduino汎用シールド上に構築して、ホストPCとの通信用にXBeeを採用した。図3はその様子であり、0.1インチ(2.54mm)のさらに半分(500mil)のピン間隔のアンプLSIを手配線で取り付け、XBee回路と2チャンネルの筋電センサ回路までをArduinoシールド上に搭載した。

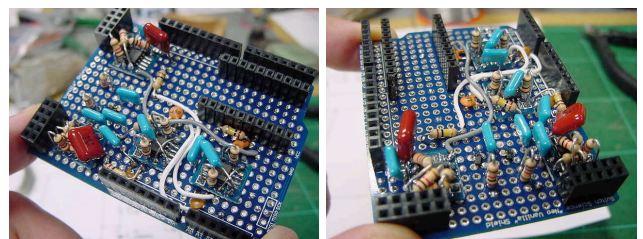


図3 新筋電センサ・システム
Figure 3 The new EMG Sensor System.

5. プラットフォームの検討

筆者は日本語と英語ぐらいしか満足に使えないが、コンピュータ関係「言語」としてはこれまで30年以上、数多くのCPUやツールやOSの言語体系(アセンブラ、インタプリタ、高級言語、マクロ、コマンド、スクリプト等)に触れて、おそらく200-300言語の経験(すぐに忘れるが必要があればマニュアルを読んですぐに復活)があり、多数のマイコンシステムと付き合い、多くのオリジナルシステムを組み込みマイコン上に実装してきた[24-40][67]。そこで今回の新しい筋電センサ・システムを開発するにあたり、最新状況に対応した「生体情報・信号処理」向きのマイコン・プラットフォームとして5種類(AKI-H8、Arduino、Propeller、RaspberryPi、mbed)を選んで色々な視点でまとめたものが、本稿の末尾Appendixに載せたプラットフォーム仕様比較表である。以下、それぞれに簡単にコメントする。

AKI-H8

秋葉原・秋月電子のロングヒット品(いまだ現役)だが、書き込みの面倒さから出荷が減っている。ただしアセンブラと割り込みを駆使した高い性能を必要とする時に活躍する[68]。外付け回路なしに64チャンネルのPWM出力LED制御システムを製作した事もあり、8チャンネルのA/Dコンバータや電圧出力の2チャンネルD/Aコンバータも強力である。

Arduino

世界的なオープンソース・ハードウェア文化を牽引している主役で、多種の基板バリエーション、フリー開発ツールとライブラリ群、そして多種の「シールド」基板として周辺回路群が充実している。電子工学が専門でない人々のスケッチング(ラピッドプロトタイピング)を支援し、世界中で教育ツールとして普及しており、他のマイコンに比べてやや非力だが、入門機としては今後も主流であろう。

Propeller

筆者もかつて「トランジスタ技術」誌(CQ出版)で紹介したユニークなマイコン[69]で、「PropClip」という40ピンDIPサイズのボードは、体感としてはAKI-H8やArduinoの20倍ほどの能力を持っている。内部に8個の32ビットCPUが並列動作し、独自のspin言語や独自IDEなどややマニアックだが、約2倍のスペック(クロック160MHz、ポート64ビット)のPropeller2も予告されており、今後も注目したい。

Raspberry Pi

他のマイコンと並べるのはちょっと世界が違う、Linuxカードコンピュータで、いわば超小型のパソコンないしサーバである[70]。Unix文化のいいところを全て盛り込みつつ超安価で、似たBeagleboard Blackというさらに強力なものも出ている。ただし残念ながら+5V1A以上のAC電源アダプタが必要で、ノートパソコン用の大型リチウムイオンバッテリーでも搭載しない限り、「現実的に乾電池駆動は無理」なので、マイコンの「携帯機器」という領域からははみ出てしまっており、今回は対象外となった。

mbed

ここ1-2年で急速に成長しているマイコンで、ようやくメーカ向けのマイコンもオープンソース文化に、という状況を実感する。多種のマイコンは基本的にはARM-CPUを使っていて、オンラインIDE(サーバ上の開発環境にブラウザでアクセス)と豊富なライブラリにより急速に普及している。本システムでは、秋月電子[71]から税込み1500円で入手できるNucleoF401RE[72]を採用した。このmbedマイコンには他のmbedに無い2つの大きな特長があり、「ファームウェア書き込み専用のCPUを別に搭載」「Arduinoシールド互換ヘッダと、オリジナルMorphoヘッダの2つを持つ」というメリットは強力である。

6. 筋電センサ・システムの製作

以上の準備を受けて、NucleoF401REのオリジナルMorphoヘッダ上に搭載したArduino汎用シールド基板上に2チャンネル筋電センサ回路とXBeeインターフェースを搭載して、図4の新筋電センサ・システムが完成したが、この詳しいメイキング紹介は「インターフェース」誌(CQ出版)2015年4月号の特集記事を参照されたい。筋電センサの特性とし

て、自分が筋電電極ベルトを装着しているとプログラミング等に不自由すること、筋電情報は毎回異なることから、USBオーディオインターフェースを分解改造した「USBオーディオ治具」を別途に製作して、3パターンほどの筋電情報をMax/MSP経由でサウンドファイル(図5)として記録して、生体情報処理のステップにおいては、この筋電データを再生して「USBオーディオ治具」からNucleoF401REのA/D入力に供給することで、再現性のある実験を進めた。

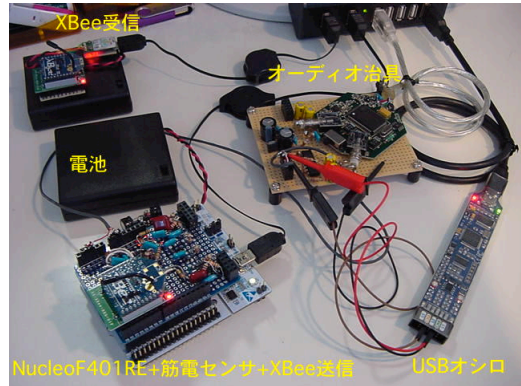


図4 新筋電センサシステムによる実験の様子
Figure 4 The experiment with the new EMG Sensor System.

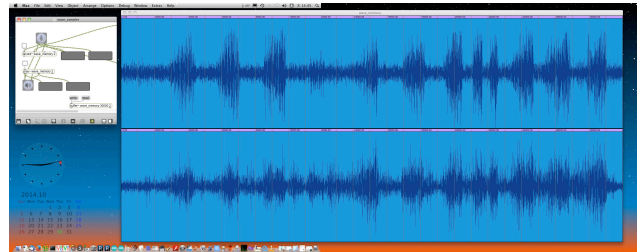


図5 記録された筋電情報データの例
Figure 5 An example of EMG Signals.

新筋電センサ・システムからXBeeのWiFi経由で送られたリアルタイム筋電情報に対する信号処理アルゴリズムを検討するために、まず図6のようなMax/MSPパッチを制作して記録された筋電情報に対して実験を行った。図6では、筋電信号を全波整流し、100段の移動平均で平滑化した様子を確認している。この他にも、ノッチフィルタやA/D変換のオフセットエラーなどの検討を行った。

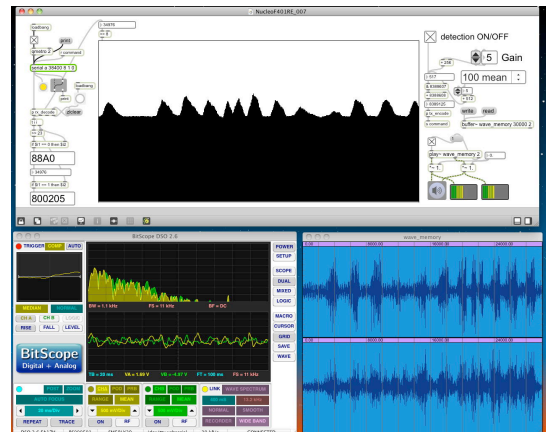


図6 筋電情報データの信号処理実験
Figure 6 An experiment of EMG signal processing.

7. mbedによる筋電パターン認識

筆者は第4世代の筋電センサシステム[66]において、Wiiリモコンの手首ベルトをイメージした位置に4チャンネルの筋電センサ電極を配置した実験において、各チャンネル50バンドのリアルタイムFFT解析を行い、計200バンドFFTデータによって29種類の「手首から先のジェスチャー」認識を行った。これは宿主PC(Mac)の処理性能によって実現されたが、今回は筋電センシングを行うmbed側で何らかの認識処理を実装できないか実験した。筋電情報のパターン認識と言えばニューラルネットワークと独立成分分析が定番であるが、ここでは(1)FFT解析と、新たに提案した(2)リサージュ解析の2手法の実装について報告する。

まずFFTであるが、第4世代で実験したような豪華な信号処理はさすがにmbedでは厳しいので、多くのFFTサンプルのソースコードがフリー公開されているmbedサイトを検索した末に、MITで公開されているFFTモジュール[73]を利用したFFTサンプルコード[74]を発見、これをNucleoF401REに実装することにした。16バンドに限定されたごくシンプルなFFTモジュールであるが、16バンドのうち周波数帯域の低い方から14バンドを、それぞれ2バンドずつ平均して2チャンネルの筋電情報について刻々とリアルタイムでXBee送信する、という動作を実現できた。(図7)

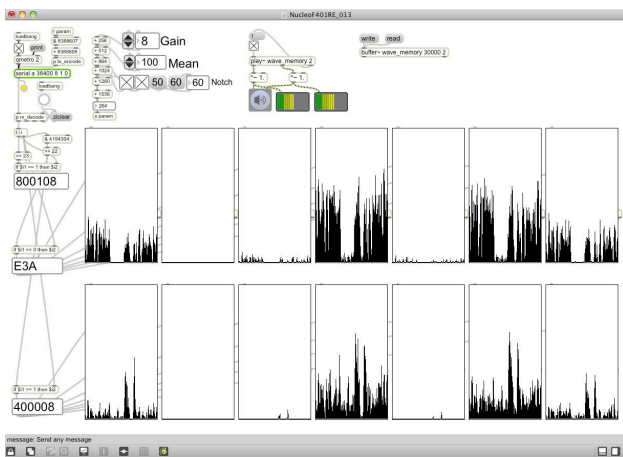


図7 筋電情報FFTの実験
Figure 7 An experiment of EMG - FFT.

そして、新たに「リサージュ解析」とでも呼べるような筋電パターン認識手法を開発した。図8はmbedが2チャンネルの筋電情報に対してこのリサージュ解析(パターン認識)を行って刻々とXBee経由でホストに送る様子である。

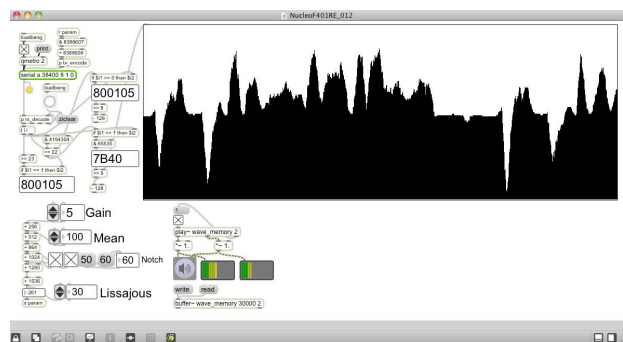


図8 筋電情報のLissajous解析
Figure 8 EMG Lissajous Analysis.

リサージュ図形(あるいはリサージュ曲線)の元々の意味は、互いに直行する2つの単振動の変位量を(x, y)という2次元のベクトルと解釈して2次元平面にプロットした時に描かれる曲線である。これを拡張し2次元変数の関係性を可視化するという発想で図9のようにMax/MSP上で色々なアルゴリズムで「リサージュ解析」の可能性を検討し、近接したセンサ電極間において有効にジェスチャー認識できる演算式を決定した上でNucleoF401RE側に実装[75]することに成功し、ソースコードをmbedサイトで公開した。

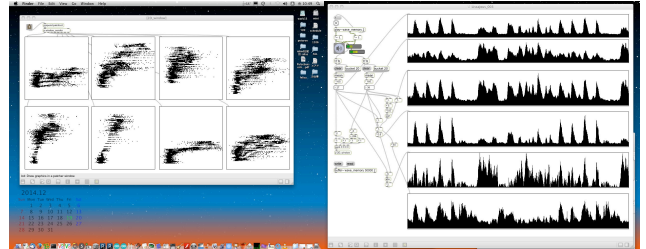


図9 筋電情報Lissajousの実験
Figure 9 An experiment of EMG - Lissajous.

8. おわりに

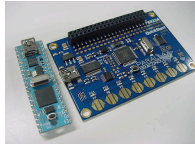

新・筋電センサと新しいmbedによるアプローチについて紹介した。筋電情報は脳から筋肉に指令が出た段階で発生するので、具体的に慣性質量を持つ肉体が動いてから検出する加速度/衝撃センサやスイッチより、さらにその動きを捉えるKinectなど画像認識センサより、はるかに早い段階で人間のパフォーマンスを抽出できる優位性がある。さらにバイオフィードバックと組み合わせることで、色々な発展の可能性を秘めているので、今後もさらに筋電や生体情報の世界を追求していきたい。

参考文献/リンク

- 1) Art & Science Laboratory, <http://nagasm.org>
- 2) 長嶋洋一, Interactive Computer Musicのための生体センサ等を応用した「新楽器」について, 平成10年度前期全国大会講演論文集2, 情報処理学会, 1998
- 3) 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(研究ノート), 京都芸術短期大学紀要[瓜生]第20号1997年, 京都芸術短期大学, 1998
- 4) 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), 情報処理学会, 1998
- 5) Yoichi Nagashima, BioSensorFusion: New Interfaces for Interactive Multimedia Art, Proceedings of 1998 International Computer Music Conference, International Computer Music Association, 1998
- 6) Yoichi Nagashima, "It's SHO time" - An Interactive Environment for SHO(Sheng) Performance, Proceedings of 1999 International Computer Music Conference, International Computer Music Association, 1999
- 7) 長嶋洋一, [サイバー楽器]のシステムデザインについて, 平成12年度前期全国大会講演論文集2, 情報処理学会, 2000
- 8) 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, 静岡文化芸術大学, 2001
- 9) 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), 情報処理学会, 2001
- 10) 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), 情報処理学会, 2002

- 11)長嶋洋一, 生体センサによるパフォーマンスとシステムの遅延/レスポンスについて, 平成14年度前期全国大会講演論文集4, 情報処理学会, 2002
- 12)Yoichi Nagashima, Interactive Multi-Media Performance with Bio-Sensing and Bio-Feedback, Proceedings of International Conference on Audible Display, 2002
- 13)Yoichi Nagashima, Interactive Multimedia Art with Biological Interfaces, Proceedings of 17th Congress of the International Association of Empirical Aesthetics, 2002
- 14)長嶋洋一, 宇宙音楽と人体音楽の作曲事例報告, 情報処理学会研究報告 Vol. 2003, No. 16 (2003-MUS-49), 情報処理学会, 2003
- 15)長嶋洋一, メディア・アートと生体コミュニケーション, 静岡文化芸術大学紀要・第3号2002年, 静岡文化芸術大学, 2003
- 16)Yoichi Nagashima, Bio-Sensing Systems and Bio-Feedback Systems for Interactive Media Arts, Proceedings of 3rd International Conference on New Interfaces for Musical Expression, 2003
- 17)長嶋洋一, SCANNED SYNTHESISのための身体動作コントロール, AES東京コンベンション2003講演論文集, 2003
- 18)Yoichi Nagashima, Combined Force Display System of EMG Sensor for Interactive Performance, Proceedings of 2003 International Computer Music Conference, International Computer Music Association, 2003
- 19)Yoichi Nagashima, Controlling Scanned Synthesis by Body Operation, Proceedings of the 18th International Congress on Acoustics, 2004
- 20)長嶋洋一, 筋電楽器における音楽的ニュアンスの認識に向けて, 電子情報通信学会 ヒューマン情報処理研究会 研究報告集, 電子情報通信学会, 2010
- 21)長嶋洋一, 新しい筋電楽器のための筋電情報認識手法, 情報処理学会研究報告 2010-MUS-085, 情報処理学会, 2010
- 22)長嶋洋一, 新しい筋電楽器のジェスチャ・表現の検討について, 日本音楽知覚認知学会2010年春季研究発表会資料, 日本音楽知覚認知学会, 2010
- 23)長嶋洋一, 筋電センサの認識に関する新しいアプローチ, 静岡文化芸術大学紀要・第11号2010年, 静岡文化芸術大学, 2011
- 24)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, 1996
- 25)長嶋洋一, [広義の楽器]用ツールとしてのMIDI活用, 情報処理学会研究報告 Vol. 96, No. 124 (96-MUS-18), 情報処理学会, 1996
- 26)Yoichi Nagashima, Real-Time Interactive Performance with Computer Graphics and Computer Music, Proceedings of the 7th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Man-Machina Systems, International Federation of Automatic Control, 1998
- 27)長嶋洋一, 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, 情報処理学会研究報告 Vol. 2002, No. 40 (2001-MUS-45), 情報処理学会, 2002
- 28)長嶋洋一, 音楽/芸術表現のための新インターフェース, 静岡文化芸術大学紀要・第4号2003年, 静岡文化芸術大学, 2004
- 29)長嶋洋一, マルチメディア心理学実験のためのプラットフォームについて, 日本音楽知覚認知学会2008年春季研究発表会資料, 日本音楽知覚認知学会, 2008
- 30)長嶋洋一, サウンド・インスタレーションのプラットフォームについて, 情報処理学会研究報告 Vol. 2007, No. 50 (2008-MUS-75) (2008-HCI-128), 情報処理学会, 2008
- 31)長嶋洋一, 並列処理プロセッサを活用したメディアアートのための汎用インターフェース, 情報処理学会研究報告 Vol. 2008, No. 78 (2008-MUS-76), 情報処理学会, 2008
- 32)長嶋洋一, メディアアートのための汎用インターフェースのプラットフォームについて, 情報科学技術フォーラム2008講演論文集, 情報処理学会・電子情報通信学会, 2008
- 33)長嶋洋一, フィジカル・コンピューティングとメディアアート/音楽情報科学, 情報処理学会研究報告 Vol. 2008, No. 89 (2008-MUS-77), 情報処理学会, 2008
- 34)長嶋洋一, デザインプロセスにおける「スケッチ」と物理コンピューティング, 静岡文化芸術大学紀要・第9号2008年, 静岡文化芸術大学, 2009
- 35)長嶋洋一, シーズ指向による新楽器のスケッチング, 情報処理学会研究報告 2009-MUS-080, 情報処理学会, 2009
- 36)Yoichi Nagashima, Parallel Processing System Design with "Propeller" Processor, Proceedings of International Conference on New Interfaces for Musical Expression, 2009
- 37)長嶋洋一, 並列処理プロセッサ"Propeller"によるプラットフォームの検討, 情報処理学会研究報告 2009-MUS-083, 情報処理学会, 2009
- 38)長嶋洋一, 並列処理プロセッサ"Propeller"によるスケッチング・プラットフォーム, 静岡文化芸術大学紀要・第10号2009年, 静岡文化芸術大学, 2010
- 39)長嶋洋一, 改造による新楽器の創造, 情報処理学会研究報告 (2011-MUS-93), 情報処理学会, 2011
- 40)長嶋洋一, デザイン・エンタテインメントを支援するプラットフォームについて, 平成24年度全国大会講演論文集, 情報処理学会, 2013
- 41)佐藤俊輔, 吉川昭, 木竜徹, 生体信号処理の基礎, コロナ社, 2004
- 42)谷口慶治, 若松秀俊, 医用電子・生体情報, 共立出版, 1996
- 43)星宮望, 生体情報計測, 森北出版, 1997
- 44)赤澤堅造, 生体情報工学, 東京電機大学出版局, 2001
- 45)福田忠彦, 生体情報システム論, 産業図書, 1995
- 46)生体情報の可視化技術編集委員会編, 生体情報の可視化技術, コロナ社, 1997
- 47)井口雅一, 人間-機械系: 人による機械の制御, 共立出版, 1970
- 48)岡本勉, 岡本香代子, 筋電図からみた歩行の発達: 歩行分析・評価への応用, 歩行開発研究所, 2007
- 49)シン・J・オー著/白井康正監訳/白井康正, 玉井健介, 武内俊次訳, 筋電図実践マニュアル: 各種検査法の手技とデータ解釈, メディカルサイエンスインターナショナル, 1999
- 50)Aldo O. Perotto著/栢森良二訳, 筋電図のための解剖ガイド: 四肢・体幹, 第3版, 西村書店, 1997
- 51)木下真男, 高宮清之, 筋電図の読み方, 新興医学出版社, 1998
- 52)藤原哲司, 筋電図・誘発電位マニュアル, 改訂3版, 金芳堂, 1999
- 53)岡本勉, 岡本香代子, ニューエクスサイズウォーキング: 筋電図的研究から開発した運動としての歩行, 歩行開発研究所, 2004
- 54)堀浩 他, 脳波・筋電図用語事典, 新訂第2版, 永井書店, 1999
- 55)栢森良二, 末梢神経麻痺の評価: 電気診断学とリハビリテーション, 医歯薬出版, 1992
- 56)木塚朝博, 増田正, 木竜徹, 佐渡山亜兵, 表面筋電図, 東京電機大学出版局, 2006
- 57)戸川達男, 生体計測とセンサ, コロナ社, 1986
- 58)丹羽真一, 鶴紀子, 事象関連電位: 事象関連電位と神経情報科学の発展, 新興医学出版社, 1997
- 59)西村芳一, DSP処理のノウハウ: RISC CPU (SH2)で実現する: 変復調/フィルタ/FFT/SBC/DCT, CQ出版, 2000
- 60)R. K. ヤング著/袋谷賢吉訳, ウェーブレット: 信号処理とシステム推定への応用, トップラン, 1997
- 61)鳥居孝夫, 計測と信号処理, コロナ社, 1997
- 62)三上直樹, デジタル信号処理の基礎: はじめて学ぶデジタルフィルタとFFT, CQ出版, 1998
- 63)電子情報通信学会編, パターン認識, 電子情報通信学会, 1988
- 64)村田昇, 入門 独立成分分析, 東京電機大学出版局, 2004
- 65)アーボ ビバリネン, エルキ オヤ, ユハ カルーネン, 詳解 独立成分分析 - 信号解析の新しい世界, 東京電機大学出版局, 2005
- 66)http://nagasm.org/ASL/CQ_mbed_EMG.html
- 67)<http://nagasm.org/1106/MDW2015/nagasm.html>
- 68)<http://nagasm.org/ASL/mse/>
- 69)<http://nagasm.org/ASL/Propeller/diary01.html>
- 70)<http://nagasm.org/ASL/RaspberryPi/>
- 71)<http://akizukidenshi.com/catalog/g/gM-07723/>
- 72)<http://developer.mbed.org/platforms/ST-Nucleo-F401RE/>
- 73)http://www.mit.edu/~emin/source_code/fft/
- 74)http://developer.mbed.org/users/User_4574/code/GraphicEqFFT/
- 75)http://mbed.org/users/nagasm/code/CQ_nagasm_10_Lissajous/

Appendix プラットフォーム仕様比較表

	AKI-H8	Arduino (Uno R3)	Propeller	Raspberry Pi (Model B)	mbed (NucleoF401RE)
写真					
CPU	Hitachi H8/3048 32bits	Atmel ATmega 32bits	Parallax 32bits×8 (8CPU並列動作)	ARM 64bits	ARM Cortex-M4 32bits
CPUクロック	16/25MHz	16MHz	80MHz	700MHz	84MHz
RAM	4KB	2KB	32KB	512MB	96KB
EEPROM	128KB	1KB	32KB (external only)	SDメモリカード (外付4GB以上)	512KB
電源/信号の電圧	+5V	+5V	+3. 3V	電源+5V 信号+3. 3V～+5V	+3. 3V
開発環境	MS-DOS batch (日立製)	オリジナルIDE (Processing風)	Parallax IDE *1 bst(フリー)	Raspberry Pi自身が Linuxコンピュータ なので自分で開発可能	オンラインIDE (フリー)
開発ホスト	Windows	Windows MacOSX Linux	Windows *1 MacOSX Linux	Windows MacOSX Linux	Windows MacOSX Linux
開発言語	アセンブラ、C	C	spin+アセンブラ	C、Python、Unix スクリプト、etc	C
開発用PC I/F	RS232C	USB	USB	USB/Ethernet	USB
A/Dコンバータ	12bits 8ch 135kHz	10bits 6ch	16bits 28ch 44. 1kHz *2	×	12bits 10ch 240kHz *2
D/Aコンバータ	8bits 2ch 100kHz	6ch PWM	16bits 14ch 44. 1kHz *2	16bits 2ch 44. 1kHz	18ch PWM *2
シリアルポート	2 ports	1 port	8 ports *2	3 ports	3 ports *2
ビデオ出力	×	×	○ (NTSC/PAL/VGA)	○ (NTSC/PAL/HDMI)	×
Character/Fontテーブル	△	×	○	△	△
マルチタスク 処理方式	割り込み、 ポーリング、 ハンドシェイク	ポーリング	共有メモリ ポーリング	リアルタイムモニ タ、ポーリング、 ハンドシェイク	割り込み、 ポーリング、 ハンドシェイク
MIDI Out	○	○	○	○	○
MIDI In	○	×*3	○	△*3	○
バッテリー(乾電池)駆動	○	○	○	×	○

*1 Parallax IDE はWindows専用、bstはWindows/MacOSX/Linuxに全て対応

*2 1チップの最大利用可能チャンネル/ポート数(同時に全てを最大には出来ない)

*3 MIDI規格の性格上、1バイトでも受け落とすと音が鳴り続けるので実験により「不適」と確認した