

# 研究報告書

## 「非線形多様体学習による脳情報表現とそのBMI技術への応用」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成20年10月～平成26年3月

研究者: 末谷 大道

### 1. 研究のねらい

我々は、普段から特別に意識することなしに多くの自由度を持つ筋肉群をタイミング良く操作し、巧みで滑らかな身体運動を実現させている。本研究課題では、運動(特にフィードフォワード的に生成される随意的運動を念頭にしたもの)を身体の空間<sup>(1)</sup>に埋め込まれた多様体<sup>(2)</sup>上の非線形ダイナミクスと見る視点を提供する。脳からの指令が身体を動かし、そして身体から脳への感覚信号が神経ネットワーク構造を改変する、という情報の循環の中で、多様体上の身体ダイナミクスがリアルタイムで変化する神経系のダイナミクスとしてどのように表現されるかを解明するために、複雑系の科学・非線形動力学の知見と統計科学・機械学習の技術を融合させた新たな数理アプローチを提案する。具体的には以下の項目について研究を行う。

◎ 身体が持つ冗長自由度性の問題について、複数種類のデータ(マルチモーダルな情報)に対する正準相関分析(Canonical Correlation Analysis: CCA)<sup>(3)</sup>による運動制御に本質的な低次元情報の抽出と多様体への適切な座標系の設定。

◎ 神経系で常に発生し続ける自励ダイナミクスを活用した、正確なタイミングと高い再現性を持つ運動パターン(軌道)の生成を実現させる学習原理の提案。

◎ 有限個の運動パターン生成に関する経験から上位レベルでの多様体を形成し、新たな環境・身体運動に対する汎化能力を持った学習原理の提案。

そして、これらの知見に基づいて、様々な計測技術によって測定されるマイクロなレベルからマクロなレベルに至る脳活動をどのような形式で脳情報として表現すべきかが明らかにし、新たなブレイン・マシン・インターフェース技術を開発するための基盤を与える。

※ 註

(1): 視覚から得られる手先の軌道に関する作業空間や体性感覚から得られる身体に関する関節角空間や筋空間のこと。

(2): 曲線や曲面を一般化した数学的概念で局所的にユークリッド座標系が貼付けられる空間のこと。

(3): 「観測信号＝独自情報＋共通情報＋ノイズ」と捉え、「共通情報＝相関の高い成分」という規準に従ってデータを分解する統計データ解析手法のこと。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

研究テーマ A「正準相関分析に基づくマルチモーダルな情報からのシナジーの抽出」

運動データからシナジーを抽出する新たな方法として、正準相関分析(CCA)を用いる方法を提案し、多自由度の筋骨格系モデルのシミュレーションデータに適用した。その結果、複数の感覚情報から手先の軌道やそこに働く力等の運動の目的に合致した、本質的な少数自由度の

変数を抽出することができた。

#### 研究テーマ B「自励的な神経ダイナミクスを活用した正確なタイミング・高再現性を持った運動パターンの生成」

神経系は、外部からの入力がなくとも常に自励的に不規則な活動を示している。この自励的な神経活動と外部からの刺激や上位からの入力に対する正確なタイミングで再現性の高い応答がどのように両立し得るか明らかにするために FORCE モデルを用いた学習の問題に取り組んだ。その結果、ある統計的性質を満たすカオスによって実際にこれらは両立し、自励的なダイナミクスがコヒーレントなパターンの生成に重要な役割を果たすことが明らかになった。

#### 研究テーマ C「神経空間における運動プリミティブの幾何学構造とその汎化」

例えば、到達運動では我々は可動領域内で任意の位置から任意の方向へ自在に手を延ばすことができるが、このとき我々は個別のパターンを全て逐一学習するのではなく、有限個の基本パターン(運動プリミティブ)を学習した後にそれらを適切に組み合わせることで「任意の」運動を実現させている。この汎化能力の神経ダイナミクスとしての起源を明らかにするために、FORCE モデルでパターンの集合を学習した際のモデルパラメタの幾何学構造に注目した。その結果、パラメタはシナプス荷重の空間上で外界の運動パターンの変化に合わせて連続的に変化し、低次元の多様体構造を形成することが分かった。この多様体に座標系を張ることによって運動の汎化を実現する階層的なモデルを構成できることが分かった。

## (2) 詳細

#### 研究テーマ A「正準相関分析に基づくマルチモーダルな情報からのシナジーの抽出」

我々は、普段から特別に意識することなしに多くの自由度を持つ筋肉群をタイミング良く操作し、巧みで滑らかな身体運動を実現させている。ベルンシュタインは、運動制御の本質は自由度の操作であると提起し、現在これは「ベルンシュタインの自由度問題」と呼ばれている。

近年この問題を解明するために「シナジー」の概念が注目されている。関節角や筋電位(EMG)データからシナジーを抽出する数理的なアプローチとして、主成分分析(PCA)や独立成分分析(ICA)、非負行列因子分解(NMF)などの手法が用いられている。例えば、PCA では「観測データ=情報+ノイズ」と捉え、「情報 = パワーの大きな成分、ノイズ=パワーの小さな成分」という規準によってデータを分解し、各成分が身体の個々の自由度の重み付けとしてどのように表されるかによってシナジーが抽出される。しかし、運動は視覚・体性感覚・関節角・筋長など様々な種類の情報の複合体として感覚されるためPCAの様な単一種類の情報を扱う手法のみでは運動に本質的なシナジーを取り出すためには不十分である。

そこで、我々は正準相関分析(CCA)に基づくシナジー解析を提案した。ヒトがボールを見ながら(視覚)手で把持する(体性感覚)という場合のように複数種類の感覚情報が得られるとき、CCA では「観測信号=独自情報+共通情報+ノイズ」と捉え「共通情報=相関の高い成分」という規準に従ってデータを分解する。我々は、冗長性を持つ上腕筋骨格モデル(図1(a))が運動を行う際に筋張力のみに対するPCAおよび筋張力と筋長・視覚との間のCCAの適用を通じてシナジーを抽出しその比較を行った。その結果、PCA で得られるシナジーよりも CCA で得られるシナジーに「手先で働く力」に近い波形が得られた(図1(b))。これは、運動を行う際に我々は意識上で個々の筋肉を個別に制御しようとするのではなく「作業空間上で力を直接働か

せて手先を始点から終点へと移動させるように腕を動かす」という意識上の感覚と一致し、中枢系ではこのような「少数自由度で制御しやすい変数」を抽出していると考えられる。

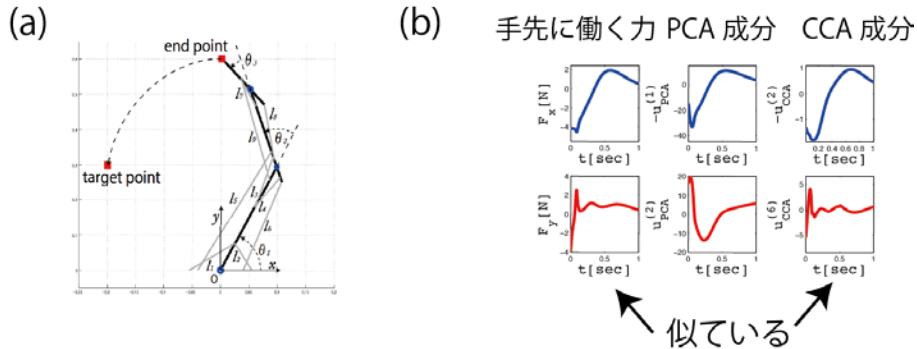


図1 (a) 上腕筋骨格モデル。(b) 手先に働く力と PCA 成分、CCA 成分との比較。

### 研究テーマ B「自励的な神経ダイナミクスを活用した正確なタイミング・高再現性を持った運動パターンの生成」

五感および身体の体性感覚等の外からの情報に応答することで、脳は様々な情報処理や身体を通じた行為を行う。その一方で、力学系の言葉で言えば脳は自励系 (autonomous system) としての性質も持ち、特に外からの入力がなくとも常に自励的に不規則な活動も示している。理論的には、非対称結合の再帰型神経回路において簡単な条件でカオスが生成されることは以前より知られていたが、その計算論的な役割は不明なままであった。

最近 Sussillo と Abbott らは、Jäger や Maas らが提唱する reservoir computing (RC) のパラダイムに基づいて FORCE (First-Order Reduced and Controlled Error) モデルと呼ばれる学習モデルを提案した(図2(a))。そして、神経回路網のカオスが多様な時系列パターンを安定に記憶・生成するために重要であることを示した。

そこで、我々は外部からの刺激に対する誘発あるいは上位からの意図によって正確なタイミングでパターンを想起することと不規則な自励的ダイナミクスがどのように両立し得るか調べるために、短時間のパルスのトリガー入力と目標パターンをペアにした学習を FORCE モデルで行った。その結果、神経回路網のダイナミクスが非カオスでも逆にカオスが強すぎても学習は成功せず、パターンを表現するための「軌道の多様さ」と外部入力に対する「柔らかさ」が両立しなければならないことが分かった。学習が成功する際にトリガー入力の後カオスの初期値鋭敏性が速やかに消失(試行間での誤差がなくなる=高い再現性)し、アトラクターから飛び出す「過渡的な遷移ダイナミクス」としてパターンが想起され、それが終わると再びカオス状態に戻る(図2(b))。これは甘利や Hopfield らの連想記憶モデルと異なり、アトラクターは学習パターン自体とは何の関係もないものの、デフォルト状態としてネットワークを常にアクティブな状態に保ち、上位レベルからのトリガー入力に速やかに対応するために利用されることを意味する。また、入力に対する応答と学習後の自励ダイナミクスを比較すると自励ダイナミクスの中に入力に対する応答と似たダイナミクスが間欠的に現れることも分かった(図2(c))。

### 研究テーマ C「神経空間における運動プリミティブの幾何学構造とその汎化」

日常の運動、例えば到達運動では我々は可動領域での任意の位置から任意の方向へ自在

に手を延ばすことができるが、このとき次の問題が考えられる：(i) 個別の到達運動についてその運動指令(時系列パターン)をどのように生成し、記憶として蓄えられるか。(ii) 「任意」の運動をどのように実現するか。

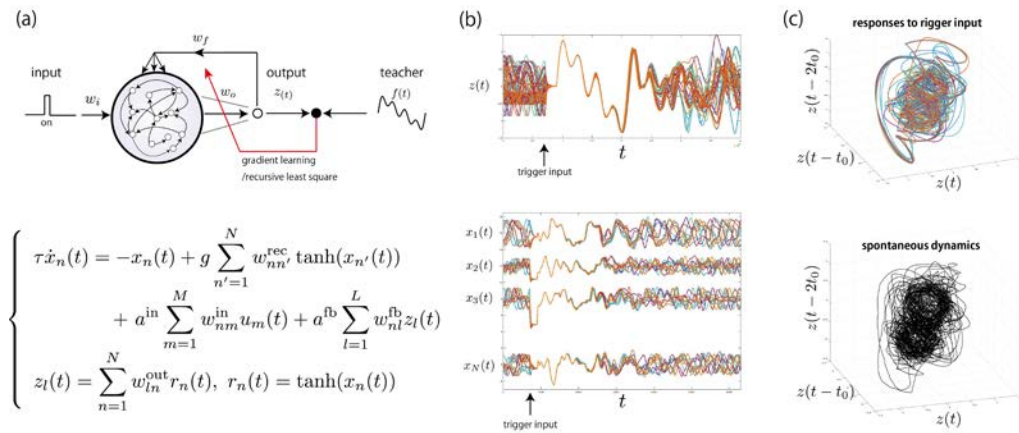


図2 (a) FORCE モデル。(b) 学習後のダイナミックストリガー入力によってほぼ同じタイミングで学習したパターンを再現性高く想起する(異なる色=異なる試行)。(c) トリガー入力に対する応答と自励ダイナミクス(入力なし)との比較。

問題(i)については、計算論的神経科学では正則項付きの最適化問題として定式化されており、その解として運動指令が得られることになる。これを研究テーマ B でとりあげたような神経力学系で実現することにより、音楽のカセットテープのように時系列パターンそのものを記憶するのではなく、トリガー入力によってそれを物理的な時間に合わせてリアルタイムで生成できる。このとき「時系列」という動的パターンはシナプス荷重(=力学系のパラメタ)という静的なパターンとして記憶されることになる。

一方、問題(ii)については個別の運動を全て(i)のような方法で学習しようとするとう数無数の運動指令が必要になる。実際には基本となる有限個の個別パターン(運動プリミティブ)の学習による経験から、上位レベルでそれらを利用することにより「任意」の運動指令を生成していると考えられる。

そこで、本研究では、(i)については個別の運動プリミティブは FORCE モデル的な神経回路網で既に獲得されているとし、モデルのパラメタ集団が持つ幾何学的性質(運動プリミティブの類似性に従って神経回路網間の「近さ」がどう変化するか)について到達運動を例に調べた。異なるネットワーク間を比較するために中間層を設け Sanger の一般化 Hebb 学習(主成分を抽出することが知られている)によって内部ダイナミクスの次元を圧縮してから学習を行い、中間層から出力ニューロンへのシナプス荷重を教師有り学習で求めるモデルを考えた。

到達運動の開始位置と方向を変えながら学習後のシナプス荷重がどのように変化するかを調べた。合計16方向の到達運動の開始位置を弧状に変えた際のシナプス荷重ベクトル(400次元)をその主成分空間でプロットした結果である。タスク空間での16方向の運動パターンに合わせてシナプス荷重空間にタスク空間での運動パターンの連続性を保つように滑らかな多様体 S が形成されることが分かった(図3(a))。また、運動の開始位置を変えるとそれに合わせて多様体 S も滑らかに変化することが分かった。

さらに合計320通りの運動パターンの学習結果を低次元空間で可視化したところ多様体の族(ファイバー束) $\mathcal{T}$ が形成されることが分かった(図3(b))。このような有限のサンプルから得られた多様体構造に対して上位の中枢系が座標系を獲得することによって、逐一個別のパターンを学習することなく、可動領域の任意の位置から任意の方向への運動パターンの生成が速やかに生成する階層的なモデルを構成することができる(図3(c))。

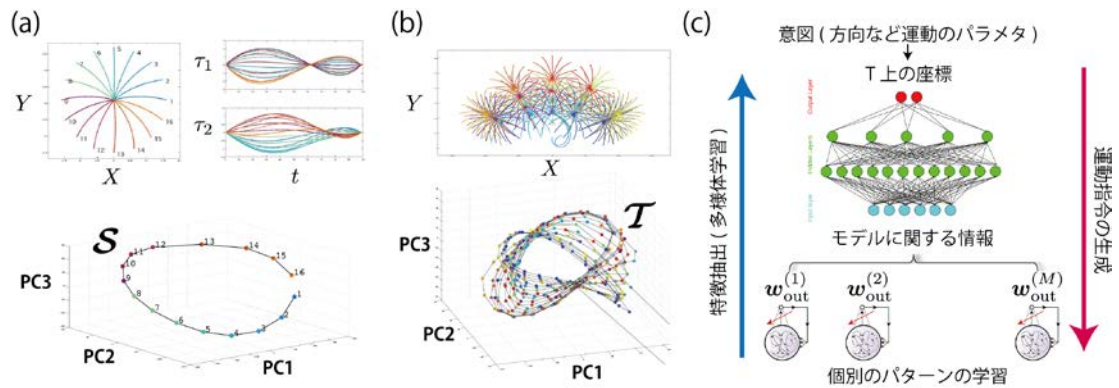


図3 (a) 到達運動の作業空間での軌道とトルクパターン。モデルパラメタ  $w_{out}$  の集合が作る多様体  $S$ 。(b) 多様体の族  $\mathcal{T}$ 。(c) 階層的学習モデル。下位で個別パターンを学習し、上位でモデル集合全体( $\mathcal{T}$ )の座標系を獲得することでその運動に関する汎化を行う。

### 3. 今後の展開

現在の BMI 技術では、脳神経活動から離散的な情報(運動のラベル)や軌道レベルでの運動の再現を個別に行っている研究が主である。本研究をさらに発展させることにより、神経活動の背後にある生成モデルを考え、データ同化的なアプローチで利用することにより自然で滑らかなフィードフォワード的運動が実現できると考えられる。また、複数の運動の集合から適切な多様体を構成することで非訓練パターンに対する速やかな学習を実現し、環境の変化に対応するための汎化を可能にする BMI 技術への展開が期待される。そのためには、本研究テーマで得られたアプローチを実データ解析に広く実践していくと共に感覚器からのフィードバック情報も利用した運動生成モデルの設計を行う必要がある。

### 4. 評価

#### (1) 自己評価

申請時に書いたことであるが、従来の非線形科学的なアプローチによる脳研究の欠点(順問題的な設定で定性的な理解・シナリオ作りに留まっている)と従来の統計科学的なアプローチによる脳研究の欠点(脳をブラックボックス的な存在に留めて入出力関係しか主に見ず、予測や判別といった目的に偏りすぎている)を補うことで、脳科学に対して方法論としての新たなアプローチを与えることが本研究の最大の目的であった。本研究で取り組んだ個々のテーマは、従来からある研究の付け足しではなく、独自性の高いものであったと思う。実データを統計科学的な手法で解析し、それを通じて背後の力学構造を明らかにする新たなアプローチの端緒を提示でき、当初に提案した課題はほぼ達成したと考えられるが、これを完成させる方向で、今後、さらなる研究を進展させてゆきたい。私自身の研究期間は平成25年度で終了するが、同領域はあと2年度続くので他のさきがけ研究者との共同研究を通じて同領域の発展に貢献したいと考えてい

る。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

ヒトの運動に注目し、数理的なアプローチにより軌道生成、軌道学習等について新しい提案を行うとともに、本研究領域に属する研究者との討議／共同研究を通じて、本領域研究の数理的な進展に大きく貢献した。研究進捗は良好であり、Physical Review 誌に複数の論文が掲載され、多くの重要なシンポジウムで発表するなど、活発な学術活動を行った。提案された研究課題はほぼ完遂されたと考えられる。

本研究では、多くの冗長自由度を持ちながら滑らかで迅速な人の随意的運動を数理的に扱うために、運動を身体の空間に埋め込まれた多様体上の非線形ダイナミクスと見る視点から非線形物理学の知見と統計科学・機械学習の技術を融合させた新たな数理アプローチを提案することを試みた。その結果、①運動データからシナジーを抽出する新たな方法として、正準相関分析(CCA)を用いる方法を提案し、多自由度の筋骨格系モデルのシミュレーションデータに適用し、複数の感覚情報から少数自由度の変数を抽出することに成功した。②神経系の自励ダイナミクスを活用し、運動軌道生成を実現させる学習原理を提案。③有限個の運動軌道生成に関する経験から上位レベルでの多様体を形成し、新たな環境・身体運動に対する汎化能力を持つことのできる学習原理を提案した。今後、さらに実際の実験データを用いた検証が進むことが期待される。

これらの知見は、様々な計測技術によって測定される階層的な脳活動の情報表現を明らかにし、新たなブレイン・マシン・インターフェース技術を開発するための基盤を与えることが期待される。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

1. H. Suetani and J.Morimoto, "Canonical Correlation Analysis for Muscle Synergies Organized by Sensory-Motor Interactions in Musculoskeletal Arm Movements", Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2013 年, 2591-2596.
2. H. Suetani, "Organizing Dynamic Movement Primitives from Chaos in Random Recurrent Neural Networks: A Reservoir Computing Approach", Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2014 年(投稿中).
3. H. Suetani, A. Ideta and J Morimoto, "Using Basin Ruins and Co-moving Low-dimensional Latent Coordinates for Dynamic Programming of Biped Walkers on Roughing Ground", Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2012 年, 517-523.
4. H. Suetani and S. Akaho, "A RANSAC-based ISOMAP for Filiform Manifolds in Nonlinear Dynamical Systems-An Application to Chaos in a Dripping Faucet-", Lecture Notes in

Computer Science 679, 2011 年, 277–284.

5. H. Suetani, K. Soejima, R. Matsuoka, U. Parlitz and H. Hata, “Manifold Learning Approach for Chaos in the Dripping Faucet”, Physical Review E 86, 2012 年, 036209[8 pages].

(2) 特許出願

研究期間累積件数:0 件

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- Hiromichi Suetani, “Low-dimensional Dynamics from Spatio-Temporal Data:An Approach Based on Reproducing Kernel Methods”, Dynamics Days Europe 2009(Göttingen, Germany).
- Hiromichi Suetani, “Manifold Learning Approach for Modelling and Controlling Spatio-Temporal Chaos”, The Third International Conference on Dynamics, Vibration and Control (ICDVC-2010)(Shao Yifu Science Museum & Y.C. Tang’ s Student Center, Zhejiang University). [招待講演]
- Hiromichi Suetani, Ulrich Parlitz, “A Kernel-based Modelling for Reconstruction of Nonstationarity in Complex Dynamical Systems”, Dynamics Days Europe 2010(Bristol, UK).
- Hiromichi Suetani and Shotaro Akaho, “A RANSAC-based ISOMAP for Filiform Manifolds in Nonlinear Dynamical Systems-An Application to Chaos in a Dripping Faucet-”, The International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN) 2011(Aalto University, Finland).
- Hiromichi Suetani, Aiko Ideta, Shotaro Akaho, David Engster, and Ulrich Parlitz, “Manifold Learning Approach for Reconstructing Internal States from Partially Observed Data: An Application to Assimilating Series of Events Generated from Nonlinear Dynamical Systems”, 5th International Scientific Conference on Physics and Control(Physcon 2011) (University of Leon, Spain).
- Hiromichi Suetani, Aiko Ideta and Jun Morimoto, “Nonlinear Structure of Escape-Times to Falls for a Passive Dynamic Walker on an Irregular Slope:Anomaly Detection using Multi-Class Support Vector Machine and Latent State Extraction by Canonical Correlation Analysis”, 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2011) (San Francisco, California, US).
- Hiromichi Suetani, “A Manifold Learning Approach for Assimilating Chaotic Dynamical Systems”, Dynamics days 2012(Baltimore Maryland, US).
- Hiromichi Suetani, Aiko Ideta and Jun Morimoto, “Using Basin Ruins and Co-moving Low-dimensional Latent Coordinates for Dynamic Programming of Biped Walkers on Roughing Ground”, 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, page.517–523, 2012 (St. Paul, Minnesota, US).

- Hiromichi Suetani, Shotaro Akaho, Stefan Luther and Ulrich Parlitz, “Manifold Learning for Data Assimilation and Control of Chaotic Dynamical Systems”, Dynamics Days Europe 2012 (University of Gothenburg, Sweden).
- Hiromichi Suetani, Jun Morimoto, “Canonical Correlation Analysis for Muscle Synergies Organized by Sensory–Motor Interactions in Musculoskeletal Arm Movements”, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2013) (Karlsruhe, Germany).
- Hiromichi Suetani, “Geometry of Dynamic Movement Primitives in Neural Space: A FORCE–Learning Approach”, International Conference on Cognitive Neurodynamics 2013 (ICCN2013) (Sigtuna, Sweden).
- Hiromichi Suetani, “Emergence of Chaotic Itinerancy for Recalling Reliable and Precise Timing Patterns in Recurrent Neural Networks: AFORCEW–learning Approach”, Society for Neuroscience meeting 2013 (San Diego, US).