

立石賞功績賞の受賞記念講演概要

人間と機械の自然な相互作用の情報理論構築とその応用

東京大学 上席研究員・名誉教授 中村 仁彦

1. はじめに

私は現在、「パーソナル・デジタルツインの獲得・記述・認証」(科研費基盤研究(A) 2020-2022年度)という研究に取り組んでいます。個人のデジタルツインとはライフステージと共に成長し、計測によって絶えずアップデートされる個人の(特に運動の)デジタルモデルです。シミュレーションやAIなどの技術によって、健康生活、職業安全、技能継承、トレーニング、リハビリ、特定の病気やケガのリスクの早期発見、回復や老化に伴う生活支援などに生かすことができます。

一つのきっかけは2000年に構造可変リンク系の動力学シミュレーションの論文[1]を、2002年にはその効率的な並列計算のアルゴリズムの博士論文[2]を山根克君¹⁾が発表したことです。もう一つのきっかけは1998年から2002年まで科学技術振興機構のCRESTというプログラムの「脳を創る」(領域代表:甘利俊一)に採択されて、「自律行動単位の力学的結合による脳型情報処理機械の開発」という研究を行ったことです。

2. 筋骨格モデル

人の骨格モデルの開発も行いました。骨格に筋を付着させた筋骨格モデルは、2000年度のIPA未踏ソフトウェア創造事業に採択されて修士課程の鈴木一郎君が6ヶ月で、解剖学の教科書を見ながら筋366本と腱、靭帯、軟骨を含む合計547本の要素からなるモデルを作りました。

1) 以下、研究室の元学生の方々は親しみを込めて君付で呼ばせてください。

た[4]。これらは質量の無いワイヤで、身体の質量は全て骨に割り付けました。筋張力を与えて動きをシミュレーションしたところ体幹の姿勢が保てないことがわかりました。背骨の周辺には脊椎を包み込むように脊柱起立筋と呼ばれる大小の筋があり、体幹の姿勢を作ります。これらを追加して筋は最終的に989本になりました。



2003年度の修士論文で藤田悠介君は運動計測から逆動力学計算で筋張力を推定する問題を扱いました[5]。159自由度の骨格の運動から989本の筋張力と床反力を決定する問題で冗長性の高い問題ですが、不等式条件付き二次計画問題に帰着させて解きました。

鮎澤光君の博士論文[6]では身体各部位の質量分布の同定問題を扱いました。これはGentiane Venture特任助教(現東京大学教授)との成果でした。池上洋介君(博士論文[7])と吉松昭洋君(2012年度修士論文)は、骨格の相似性に着目し人の筋骨格モデルを写像して他の哺乳類(マウス)の筋骨格モデルを作りました。

3. 神経筋骨格モデル

2010-2016年にHPCI戦略プログラム「分野1予測する生命科学・医療および創薬基盤」はスパコン「京」を応用するプロジェクトでした。筋を質量が分布した超弾性体とし、筋と筋、筋と剛体である骨との接触を計算して、筋骨格の

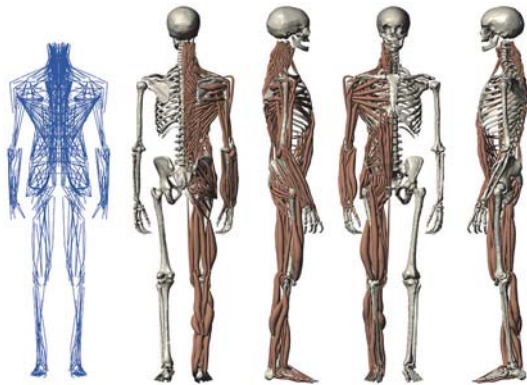


図1 超弾性体筋群と剛体骨格のFEMモデル

有限要素モデルを作りその計算を行いました。平澤謙章君の2013年度修士論文 [8] の成果で、鮎澤光君との共同研究です。

脊髄に分布する 128,250 個の運動ニューロンと筋に分布する 53,590 個の感覚ニューロン（筋紡錘）をスパイクニューロン・モデルで記述し、3次元的に配置して全身神経筋骨格統合シミュレーションを行いました。同プロジェクトでは銅谷賢治教授（沖縄科学技術大学院大学）たちが大脳皮質の $20 \times 20 = 400$ 個のコラムのモデルでパーキンソン患者特有の神経信号の発火リズムを再現されていたので、これを四肢の骨格筋 374 個の運動ニューロンに伝えて四肢の運動の力学シミュレーションを行いました。武市一成君の2014年度修士論文 [9] となった特任助教の村井君との研究成果です。

4. ビデオモーションキャプチャ

2017年度の修士論文で大橋拓也君はディープラーニングによる人間の2次元画像のポーズ推定技術を用いた3次元のモーションキャプチャに取り組みました [10]。4台のカメラの60FPSの画像からOpenPoseと呼ばれるディープ・ニューラルネットワークが推定器が出力する2次元ポーズを全カメラ分集め、骨格の3次元構造と運動の時間的連続性を考慮して3次元再構成しました。

カメラ画像をクラウドに送り、ポーズ推定から3次元再構成とバイオメカニクス解析まで

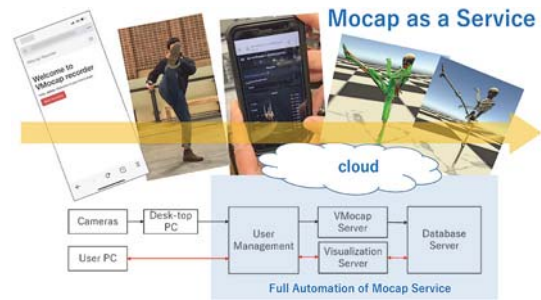


図2 クラウド型ビデオモーションキャプチャ

を行うシステムを池上君と特任助教の Milutin Nikolic 君（現セルビア，University of Novi Sad 准教授）が取り組みました。2022年3月にはバイオメカニクス解析の結果を一気通貫で計算し、データベースに投入して直ちにグラフ化するシステムとして完成しました。一気通貫の計算は特任助教の池上君の成果です。データベースとグラフ化は特任研究員の Cesar Hernandez 君の成果です [11]。櫻井彬光君は計算結果の筋骨格の運動の3次元データを可視化するViewerをUnityを用いて開発しました [12]。4台のカメラの設置された空間で携帯端末用いてサインインして5秒の運動を行ないます。10分後にメールが届いてリンクを開けばグラフをブラウザで、筋骨格の3次元運動をViewerで見ることができます。

このシステムを多くの人たちに使ってもらうことを目指しています。体育館やグラウンドや街角やジムなどにカメラを接地すれば、だれでも運動解析とバイオメカニクス解析を携帯端末から利用できます。青少年のスポーツの安全と競技力の向上に役立てたい。一般の運動愛好家や健康のためにジムへ通ったりジョギングを行ったりする中高年や、リハビリテーションを受ける方々が客観的に自分の運動を知ることができるようにしたいと考えています。

5. 運動と記号

テレンス・W・ディーコンの「言語と脳の共進化 ヒトはいかにして人になったか」 [13] を読んで記号と言語の関係に関心を持つきっかけ

Mathematical Model of Mirror Neuron

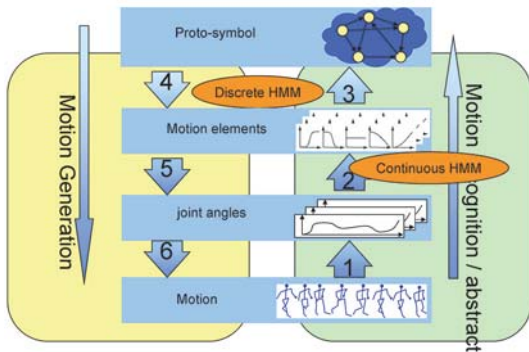


図3 HMMを用いたミラーニューロンのモデル

けになりました。Merlin Donald の「Origins of the Modern Mind」[14]では、「人はまねることで獲得する」ということを示すミメシスという言葉に出会いました。1996年に Giacomo Rizzolatti らが発見したというミラーニューロン [15] についても興味を持ちました。ロボットの研究者としての関心は、人の行動（運動）を見て理解することと、自分で行動（運動）をすること、脳にとっては2つの方向の異なる（双方向の）活動が一つの神経回路でなされることの意味に向かいました。

学習が行動に直結するとしたらこれほど効率的なことはありません。ミメシスで記号を作り、記号を呼び出して再利用することを繰り返すことで複雑な動作を作ることができる。記号を使うことが言語につながり人の知能の基盤を構成している。ならば、ミメシスで記号を獲得して利用するヒューマノイドロボットを作ろう、そこから言語につないでみたいと思いました。

6. 人間とロボットのコミュニケーション

2006年の高野渉君（現 大阪大学特任教授）の博士論文 [16] はミメシスの問題を深化させるものでした。運動や行動は連続しており分節は見えません。連続する運動の切れ目を自動的に発見して分節化する方法を隠れマルコフモデルで実現しました。得られた分節の各々の隠れマルコフモデルを作り、それらの間の統計的パラメータの類似度から距離空間を作ってクラス

タリングすることで記号を作り出しました。

記号を用いて人の行動を理解して、それに適した記号を連想しヒューマノイドロボットの行動を生成する記号の双方向利用の理論を作りました [17]。2005年に開催された愛知万博では、杉原知道君が中心になって、ミメシスの実証実験として小型ヒューマノイドと人のリアルタイム格闘技を見せるデモを行いました。山本江君（現 東京大学准教授）が設計した小型ヒューマノイドロボット UT- μ 2: magnam [18] を使い、人間の行動はモーションキャプチャで計測し、ミメシスは高野君が担当しました。

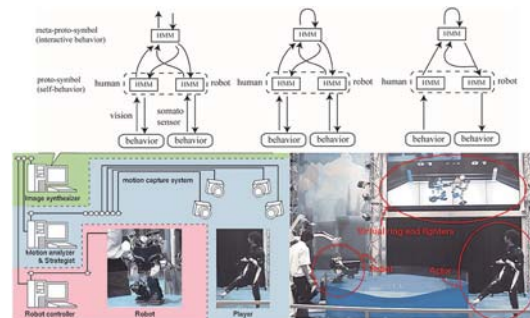


図4 ミメシスによるコミュニケーション理論と愛知万博でのデモンストレーション

7. ロボットの知能の構成論

人の行動や人と人とのコミュニケーションの基礎には記号があり、言語があり、それらが複雑に高度に発達して人の脳を共進化させ、人の生活と社会を発展させてきたというのが現代の科学的パラダイムである。これをなぞるように、人の骨格や運動の特徴を数学的問題に帰着させて答えを求め、ロボットの知能を構築する方法論にたどり着いた。技術は未熟であり実用化までには一層の研究開発が必要である。しかし方向性としてロボットの知能の構成論は人間の知能の進化をなぞることになるだろう。

物理的あるいは数学的な真理というよりは、これはロボットの運命である。ロボットは人が作り出したものである。人の形態に近いかどうかに関わらず、機械の動作は人の設計者のイメージの影響を受けて、人の動作の鋳型にはめ

られたものになる。わたしたちは動物、とくに哺乳類の動作は擬人化して解釈する。身体や脳の進化の歴史から、人の知能は哺乳類の知能の特殊化であり共有する部分がある。擬人化による解釈は人の思い込みに過ぎないとは言い切れない。

人の知能が、人の知能をなぞってできたロボットの知能からあまりかけ離れたものでないとして、人の知能の限界を考えるのも何かの参考になるかもしれない。

8. 知能の構成論からみる人間の社会

言語を記号としてみることを、それを普遍して人間社会を作り上げているものは記号であることとみることは構造主義と呼ばれる。言語学の記号論を適用して社会活動を記述した1949年のクロード・レヴィ=ストロースの「親族の基本構造」[19]に由来している。運動記号に基づくロボットの知能の構成法は構造主義的である。構造主義批判の歴史は押さえておく必要がある。

1960年代後半からポスト構造主義が、1980年代にはポストモダン [20] という思想が生まれた。構造主義は、構造を既に存在する静的なものと考えそれを発見する立場であり、現代的な多様性や創造性や偶然性が生まれるメカニズムをその中に含んでいないと批判された。ポストモダンでは、つねに古い構造が壊れて新しい構造が生まれる営みを重視し脱構築 (deconstruction) という言葉が生まれた。

記号には大小がある。大きな記号とは大きなコミュニティに共有される長期にわたって安定した記号である。小さな記号とは小さなコミュニティに共有される比較的短い時間で生成から消失に至る記号である。大きな記号は上位のスーパーコミュニティを作り、小さな記号は部分集合のサブコミュニティを作る。

一つの国家では、大きなゆっくりと変化するスーパーコミュニティをもちその中に動的に変化するサブコミュニティをもつ構造が持続可能な社会の構造である。大きな記号とは社会が普

遍的と方向づける価値である。倫理 (真理や正義) や自由, 平等, 平和, 民主主義, 人権などが含まれる。政治の目的は共通の価値を議論して大きな記号でスーパーコミュニティを保つことである。これが分断のない社会である。保守とは、大きな記号をコミュニティが共有して安定な社会を持続可能にする立場である。われわれは記号の大小を理解して、社会については大きな記号で語ることに留意すべきである。政治は小さな記号で分断を誘ってはならない。

9. 歴史への希望 (むすびにかえて)

ロシアのウクライナ侵攻が2022年2月に始まり歴史の針を100年前に戻すかのような、歴史観と世界観がゆがんで錯覚の中のようにめまいを感じる状況が続いている。

E. H. カーは「歴史とは何か」[21]の中で歴史について次のことを書いている。

- ・現代と過去との対話である。
- ・現在の記号によって過去を記述する。
- ・過去の記述から現代を照らしだす。

歴史はつねに脱構築され、現在の記号で過去を書き変えてゆく。歴史の針が戻るのではなく現在の状況が生んだ新しい記号で第一次世界大戦や第二次世界大戦やその後の世界の見方が、いま書き換えられているのである。

国連の役割の重要性が高まっています。カント [22] が「戦争を避ける永遠の平和」のために構想した国家連合が求心力を保つためには、倫理や自由, 平等, 平和, 民主主義, 人権などの記号の他に、人類の繁栄を記号として持つ必要があります。このために資本主義はグローバリゼーション, エネルギー, 温暖化, 環境, 食糧などの諸問題の解決に向かわなければなりません。科学とデータで脱構築し新しい資本主義を構築することが必須です。つまり、諸問題が課す条件を満たす資本主義が繁栄に導き、多くの国がそれを目指すようになる必要があります。これを成し遂げて共通の歴史を持続させることが人類の希望です。

人類の繁栄のシナリオは他にもあると思います。未来の万能の人工知能にこれをゆだねる選択もあります。しかし人類は自らの手で歴史を記述する道を選択することでしょう。大きな記号を共有して共通の歴史が生まれることを目指すこと、これがロボットの知能から出発して私が考え始めていることです。

[参考文献]

- [1] Y. Nakamura and K. Yamane. "Dynamics Computation of Structure-Varying Kinematic Chains and Its Application to Human Figures," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 16, No. 2, pp. 124-134, 2000.
- [2] K. Yamane. "Realtime Interactive Dynamics Computation of Structure-varying Kinematic Chains and Its Application to Motion Generation of Human Figures," Ph.D Dissertation, Dept of Mechano-Informatics, University of Tokyo, March 2002.
- [3] K. Yamane and Y. Nakamura. "Parallel O (logN) Algorithm for Dynamics Simulation of Humanoid Robots," Proc. of IEEE-RAS Intern. Conf. on Humanoid Robotics, 2006.
- [4] 中村仁彦, 山根克, 栗原一貴, 鈴木一郎. 情報処理振興事業協会 未踏ソフトウェア創造事業「人間の運動・認知情報処理研究のための高度計算基盤ソフトウェア」報告書, 2002. 03.
- [5] Y. Nakamura, K. Yamane, Y. Fujita, and I. Suzuki. "Somatosensory Computation for Man-Machine Interface from Motion Capture Data and Musculoskeletal Human Model," IEEE Trans. on Robotics, vol. 21, no. 1, pp. 58-66, 2005.
- [6] Ko Ayusawa. "Computational Study on Dynamics of Large DOF Multibody Systems with Underactuated Base and its Application to Mass-Property Identification of Humans and Humanoids," Ph. D. Dissertation, Dept. Mechano-Informatics, University of Tokyo, 2011.
- [7] Yosuke Ikegami. "Subject Specic Modeling of Bodies for Muscle Activity Estimation Based on Geometric Morphing," Ph.D. Dissertation, Dept. Mechano-Informatics, University of Tokyo, 2017.
- [8] 平澤謙章, "スパイク脊髄神経モデルと全身筋有限要素モデルの統合とその並列計算," 東京大学情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修士論文, 2014. 03.
- [9] 武市一成, "解剖学および生理学に基づくスパイク脊髄神経モデルによる神経筋骨格統合シミュレータ," 東京大学情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修士論文, 2015. 03.
- [10] T. Ohashi, Y. Ikegami, K. Yamamoto, W. Takano and Y. Nakamura, "Video Motion Capture from the Part Confidence Maps of Multi-Camera Images by Spatiotemporal Filtering Using the Human Skeletal Model," Proc. of IEEE/RSJ IROS, pp. 4226-4231, Oct., 2018.
- [11] C. Hernandez-Reyes, Y. Ikegami, Y. Nakamura. "Open Architecture between Database and Visualization for Democratized Scientific Sports Training," 第40回日本ロボット学会学術講演会予稿集, RSJ2022AC2J2-7, 2022.
- [12] A. Sakurai, Y. Ikegami, K. Yamamoto, M. Nikolic and Y. Nakamura. "Visualization of Human Motion via Virtual Reality Interface and Interaction Based on it," Proc. of 9th Intern. Conf. on Sport Sciences Research and Tech. Support, pp. 130-137, 2021.
- [13] テレンス・W・ディーコン. "言語と脳の共進化 ヒトはいかにして人になったか," 金子隆芳訳, 新曜社, 1999. (原著: 1997)
- [14] Merlin Donald. "Origins of the Modern Mind," Harverd University Press, 1991.
- [15] G. Rizzolatti, L. Fadiga, V. Gallese, L. Fogassi. "Premotor cortex and the recognition of motor actions". Cognitive Brain Research. 3 (2) pp. 131-141, 1996.
- [16] Wataru Takano. "Stochastic Segmentation, Proto-Symbol Coding and Clustering of Motion Patterns and Their Application to Signifiant Communication between Man and Humanoid Robot," Ph. D Dissertation, Dept of Mechano-Informatics, University of Tokyo, March 2007.
- [17] 高野渉, 山根克, 杉原知道, 山本江, 中村仁彦. "身体的記号化モデルに基づく人間とヒューマノイドロボットのコミュニケーション理論," 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 6, pp. 735-745, 2010.
- [18] 山本江. "厳しい時間拘束条件の下で多様な設置状態変化をするヒューマノイドロボットの動作計画," 東京大学情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修士論文, 2006. 03.
- [19] クロード・レヴィ=ストロース. "親族の基本構造," 福井和美訳, 青弓社, 2000. (原著: 1949)
- [20] 浅田彰. "構造と力——記号論を超えて," 勁草書房, 1983.
- [21] E. H. カー. "歴史とは何か," 清水幾太郎訳 岩波新書, 1962. (原著: 1961)
- [22] カント. "永遠平和のために," 宇都宮芳明訳 岩波文庫, 1985. (原著: 1795)