

オーブンブレインシミュレータの開発

大武美保子(東大) 高木利久(東大) 浅間一(東大)

Development of Open Brain Simulator

Mihoko Otake (Univ. of Tokyo),

Toshihisa Takagi (Univ. of Tokyo), Hajime Asama (Univ. of Tokyo)

Abstract— This paper presents open brain simulator, which estimates the neural state of human through external measurement for the purpose of improving motor and social skills. Macroscopic anatomical nervous systems model was built which can be connected to the musculoskeletal model. Microscopic anatomical and physiological neural models were interfaced to the macroscopic model. Neural activities of somatosensory area and Purkinje cell were calculated from motion capture data.

Key Words: モデリング, シミュレーション, マルチスケール, 実世界情報, 神経情報学

1. はじめに

生体,特にヒトを構成するシステムをモデル化し,シミュレーションすることができれば,ヒトが外界から受ける影響をあらかじめ予測したり,ヒトの内部状態を外界からの観測により推定したりして,その状態に応じた適切な働きかけをする工学システムを設計することができる.筋骨格系については,長年研究され,市販のシミュレータも存在する^{1,2)}.神経系シミュレータには,主としてミクロスケールの解剖学および生理学の知見をできるだけ多く反映した生物学的なミクロスケールのものと,神経の性質を抽象化した人工ニューラルネットワークに基づくマクロスケールのものがある.代表的な生物学的神経系シミュレータに,NEURON³⁾とGENESIS⁴⁾がある.ヒト筋骨格系モデルに人工ニューラルネットワークを結合し,歩行神経回路網の推定を行う研究^{5,6)},小脳を模した人工ニューラルネットワークと人体モデルを接続し,運動の脳内表現を探る研究⁷⁾がある.しかし,脳神経系について,ミクロからマクロまでのモデルを扱い,なおかつ筋骨格系など,他のシステムと接続可能なものは構築されてきていなかった.

本研究の目的は,ヒトの運動など,外界からの計測情報を用いて駆動することができる実世界に開かれた脳神経系シミュレータを開発することである.ヒトの動きを外部から観測して脳神経系の内部状態を推定する技術,具体的には,モーションキャプチャデータから筋長や筋伸長速度を計算し,運動情報を処理する神経系への入力情報を計算で求め,神経系モデルを駆動することのできる,オーブンブレインシミュレータを開発したので報告する⁸⁾.

2. マルチスケールシミュレーション

本研究では,詳細なミクロスケールの神経細胞モデルが将来的には全身にわたって得られるものとして,これらのモデルが追加接続可能なマルチスケール神経系シミュレーションプラットフォームを開発する.運動計測データを筋骨格系モデル,マクロスケールの脳神経系モデルへ写像し,データ変換を行うトップダウンアプローチと,ミクロスケールの神経細胞モデルをマクロスケールの神経系モデルに接続するボトムアップアプローチを組み合わせ,マルチスケールシミュレ-

ションを実現する.

運動計測から脳神経系モデルまでは,以下の三つのステップで構成される.

1. 相対的な筋の開始点,終点をあらかじめ定義した筋骨格モデルを用意し,モーションキャプチャデータから筋運動情報を求める.
2. 筋紡錘を収縮性の部分と非収縮性の部分を有するバネマス系として近似し,非収縮部の伸展量に比例した頻度で発火が起こるとするモデル⁹⁾を用いて筋運動情報から神経系への入力データを求める.
3. マクロスケールの神経解剖学モデルにより,筋紡錘からの神経信号の到達点を求める¹⁰⁾.

次に,モデルデータベース^{11,12,13)}に登録されている神経モデルを再構成し,マクロスケールの脳神経系モデルにインタフェースする¹⁴⁾.すなわち,筋紡錘からの神経信号が到達する部位にある神経細胞モデルに,この神経信号を入力し,駆動する.

ここでは,GENESISシミュレータで動く小脳のプルキンエ細胞モデル^{15,16)}を再構成し,マクロスケール神経系モデルにインタフェースして駆動する.小脳は,脊髄小脳路,もしくは脊髄オリブ路とオリブ小脳路を介して,筋受容器からのインパルスを受け取る.オリブ小脳路は登上線維として終わる.プルキンエ細胞に伝えられる興奮は,直接には登上線維を通過して伝えられる.そこで,プルキンエ細胞モデルに対し,筋紡錘に由来する神経信号を登上線維入力として加えることとした.実際には,平行線維入力など,他からの入力もあることや,脊髄オリブ路とオリブ小脳路の間で中継されることなどから,もっと複雑な修飾を受けているが,ここでは,修飾なしに伝達された場合の振る舞いを計算することとした.

3. オーブンブレインシミュレータの計算システム構成とシミュレーション結果

オーブンブレインシミュレータの計算システムは,体の各部位の姿勢を取り込んで送信する,無線送信機つきセンサと,センサの情報を受信して全身の姿勢を再構成する計算を行う,無線受信機つき計算機,体全体の姿勢から,体性感覚野における脳活動を計算する計

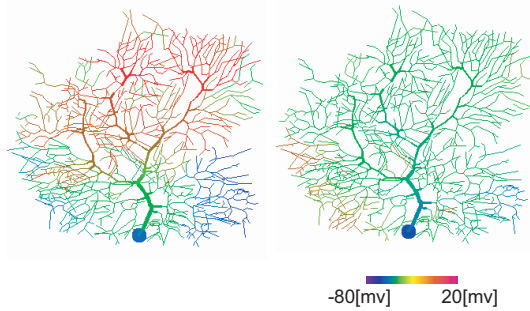


Fig.1 Simulated voltage distribution of Purkinje cell

算機，さらに小脳のプルキンエ細胞における神経活動を計算する計算機で構成される。被験者は，磁気ジャイロ式姿勢センサを全身に分布させたモーションキャプチャスーツを装着する。センサと全身の姿勢を計算する計算機の間は，無線でつながっている。センサ情報から全身の姿勢を計算するモジュールと，全身の姿勢から筋長，筋伸長速度に基づく脳神経活動を計算するモジュール，神経細胞の反応を計算するモジュールは負荷が大きいので，計算機を分散し，ネットワークでつないだ。

モーションキャプチャデータと筋骨格系，筋紡錘モデルから計算される，筋紡錘に由来する神経信号を入力した時のプルキンエ細胞の電位分布を計算した結果を Fig. 1 に示す。青から赤へと電位が高くなり，青が最小-80[mV]，赤が最大 20[mV] を表す。袈裟斬り動作開始直後の，上腕三頭筋長頭の運動から計算された信号が，修飾されずに直接プルキンエ細胞へ伝達された場合の，4[ms] (Fig. 1 左)，9[ms] (Fig. 1 右) 経過後の電位分布である。登上線維入力は，運動の予測と実際との誤差信号がコードされていると考えられていることから，運動学習前の，フィードバックが予測できない時の状態変化を計算したことになると思われる。

4. おわりに

本研究では，生物機械工学，生物電子工学，脳神経科学の分野で得られた知見に基づいて，体を動かしている時に実際に起こりうる，ミクロからマクロまでの脳神経活動を，運動計測データから計算し提示することができる，オープンブレインシミュレータを開発した。これまで個々に構築してきた，1) 全身の姿勢データから，2) 筋長と筋伸長速度，3) これらに基づくマクロな脳神経活動，4) ミクロな神経活動を連続して計算し，提示する統合システムを構築することができた。モーションキャプチャシステムに接続し，筋骨格モデル，筋紡錘モデル，マクロスケールの脳神経系モデル，ミクロスケールの神経細胞モデルを結合して，運動計測データから，脳神経系の電気的活動を計算で求める。本研究で構築した脳神経系モデルは，実際の脳神経系の一部を表現するものであり，計算で得られる神経活動は仮想的なものであるが，将来的に，解剖学的，生理学的知見に基づく神経系モデルが次々と構築された時に，これらを結合し拡張することが可能な，バイオメカトロニクスのための技術基盤を提供する。主観的な身体感覚を客観的に読み取ることができるヒューマンインタフェースや，神経系の機能を身体運動から評価することが可能な，運動性神経疾患の診断支援システム，身体運動が神経系に与える影響を検討すること

ができるトレーニングおよびリハビリテーション支援システム等の応用につながる。

謝辞

本研究は，科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 さきがけ ”神経系の双方向マルチスケールシミュレータの開発”，文部科学省科学研究費補助金特定領域研究 生命システム情報 (領域番号#014)，移動知 (領域番号#454)，情報爆発 (領域番号#456) の支援を受けた。

参考文献

- 1) S. L. Delp and P. J. Loan. A computational framework for simulating and analyzing human and animal movement. *IEEE Computing in Science and Engineering*, Vol. 2, pp. 46-55, 2000.
- 2) J. Rasmussen et. al. Anybody - a software system for ergonomic optimization. In *Fifth World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2003.
- 3) M.L. Hines and N.T. Carnevale. The NEURON simulation environment. *Neural Computation*, Vol. 9, pp. 1179-1209, 1997.
- 4) J. M. Bower, D. Beeman, and M. Hucka. The genesis simulation system. In *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks Second edition (M.A. Arbib, Ed.)*, Cambridge, MA, MIT Press, pp. 475-478, 2003.
- 5) N. Ogiwara and N. Yamazaki. Generation of Human Bipedal Locomotion by a Bio-Mimetic Neuro-Musculo-Skeletal Model. *Biological Cybernetics*, Vol. 84, pp. 1-11, 2001.
- 6) N. Tomita and M. Yano. A model of bipedal walking controlled by the basal ganglia -brainstem systems. In *of The Ninth International Symposium on Artificial Life and Robotics*, pp. 359-362, 2004.
- 7) 川入光男. 脳の計算理論. 産業図書, 1996.
- 8) 大武美保子, 高木利久, 浅間一. バイオメカトロニクスの技術基盤となるオープンブレインシミュレータの開発. *電気学会論文誌 C*, Vol. 127, No. 10, pp. 1705-1711, 2007.
- 9) 星宮望, 赤澤堅造編著. 筋運動制御系. 昭晃堂, 1993.
- 10) M. Otake and Y. Nakamura. Spinal Information Processing and its Application to Motor Learning Support. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 17, No. 6, pp. 617-627, 2005.
- 11) S. Usui. Visiome: neuroinformatics research in vision project. *Neural Networks*, Vol. 16, pp. 1293-1300, 2003.
- 12) N. Goddard et. al. Towards NeuroML: Model description methods for collaborative modelling in neuroscience. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, Vol. 356, pp. 1209-1228, 2001.
- 13) M. L. Hines et. al. ModelDB: A database to support computational neuroscience. *Journal of Computational Neuroscience*, Vol. 17, pp. 7-11, 2004.
- 14) M. Otake and T. Takagi. Reassembly and Interfacing Neural Models Registered on Biological Model Databases. *Genome Informatics*, Vol. 16, No. 2, pp. 76-85, 2005.
- 15) E. De Schutter and J.M. Bower. An active membrane model of the cerebellar Purkinje cell. I. Simulation of current clamps in slice. *Journal of Neurophysiology*, Vol. 71, pp. 375-400, 1994.
- 16) E. De Schutter and J.M. Bower. An active membrane model of the cerebellar Purkinje cell. II. Simulation of synaptic responses. *Journal of Neurophysiology*, Vol. 71, pp. 401-419, 1994.