GPGPU による大脳基底核モデルのリアルタイムシミュレーション

[1]五十嵐潤，[2]庄野修，[3]深井朋樹，[4]辻野広司

[1, 3] 理化学研究所，[1, 2, 4]ホンダ・リサーチ・インスティチュート・ジャパン

igarashi@brain.riken.jp

概要 : 脳のモデルを実時間で実行できれば，ロボットに搭載することによる実環境での機能検証が可能となる．我々は行動選択を行う大脳基底核の神経回路網モデルを，GPGPU の技術を用いて，実時間実行する手法を提案する．GPU は多数の演算器を持つ並列計算機であり，並列処理を行う脳のシミュレーションに適している．提案する手法により大脳基底核モデルを実装した結果，実時間以上の速度でシミュレーションを実行できた．

1　はじめに

近年の電子計算機の発達の恩恵を受け，脳の大規模神経回路網モデルの研究が盛んに行われている．脳のモデル研究は，一般的に，脳の機構の解明を目的として行われている．しかし，そのモデルの妥当性評価はオフラインで行われているため，生物が大きな特徴としてもつオンラインの環境適応能力を十分評価できない．オンラインでの評価を行うには，実センサ入力を脳のモデルが実時間で処理し，それに基づいてアクチュエータを制御して，その結果，センサ入力が変わるという感覚ー運動ループを構成することが重要である．本研究の目的は，脳のモデルを実時間実行し，実環境での機能評価への可能性を開くことである．

題材としての脳モデルに庄野らの大脳基底核モデル[1]を用いた．このモデルは，コンダクタンス・モデルのレベルで構築された，神経科学的に詳細な神経回路網モデルであり，行動の選択やタイミングの決定が，大脳基底核のチャネル間の競合的活動によって起きることなどが検証されている．一方，このモデルでは，各神経細胞の計算負荷が大きく，非常に大きな計算リソースを必要とする．そのため PC を用いたシミュレーションでは，実時間の実行は実現していなかった．

我々は GPGPU を用いて大脳基底核モデルを実時間実行する手法を提案する．GPU は CPU に比べて非常に多くの演算器を持つ並列計算機で，並列処理を行う脳のシミュレーションを，高速に実行することが期待できる．

2　大脳基底核の神経回路網モデル

庄野らが提案する大脳基底核の神経回路網モデル[1]では，大脳基底核モデルの組織的な神経細胞活動によって行動の選択やタイミングの決定を行うとしている．このチャネル間での競合的な活動を実現する，線条体(Striatum)，淡蒼球外節(GPe)，視床下核(STN)，黒質網様部(SNr)の部位を GPU に実装した．図 1 は，大脳基底核モデルの構成を示す模式図で，円は神経細胞，赤線が興奮性，青線が抑制性のシナプス結合を表す．神経細胞数は，図 1 に示した通りである．モデル式については，FSd，FSi，MSd，MSi は[2]，GPe は[3]，STN は[4]を参照．神経細胞の膜ダイナミクスの数値計算法として，4 次の Runge-Kutta 法を適用し，刻み幅を 0.05ms とした．ただし，GPe は，適切な挙動を再現するためには，高い時間分解能が必要なため，Runge-Kutta-Fehlberg 法を適用し，刻み幅を 0.025ms で計算した．単精度浮動小数点数を演算に用いた．

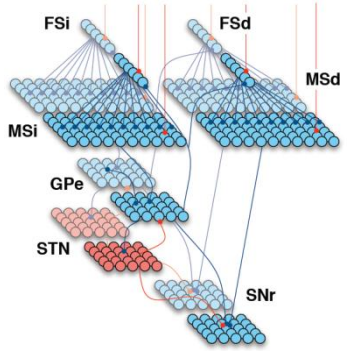

図 1.　大脳基底核モデルのネットワーク模式図

3 GPU による大脳基底核モデルの並列化

本研究では，GPGPU の環境として，Nvidia 社が提供する CUDA を用いた．使用した GPU は，スカラ演算器の SP(Stream Processor)が 8 基集まった SM(Stream Multiprocessor)を 30 基備えた．使用した計算機の詳細について表に示す．

大脳基底核モデルの計算を並列化が可能な処理単位に分割し，それぞれの計算時間を調べた．その結果，コンダクタンス・モデルである STN と GPe の膜電位計算にもっとも時間がかかった．そこで，すべての処理が実時間で計算できるよう，SM に処理を割り振った．割り振り方には，2 種類の方式を採用した．ひとつが，神経細胞の種類ごとに膜電位計算を別々の SM に割り振る方式である．もうひとつが，シナプスコンダクタンスと膜電位の計算を別々の SM に割り当て，シナプス遅延を利用して，シナプスコンダクタンスの計算ステップを 1 ステップずらすことで，SM をパイプラインのように用いる方式である．これらの並列

化で，大脳基底核モデルの計算を 10 の SM に割り振った（図 2）．GPU で実行した大脳基底核モデルは，[1]で報告される組織的な神経細胞活動を再現した(図 3)．

表 GPU 搭載の計算機詳細

CPU	Intel Xeon Quad Core (2.0GHz)
メモリ	2.75GB
GPU	NVIDIA GeForce GTX 280 (240 SP, 30SM, Memory 1GB)
OS	Windows Xp (32bit)
その他	CUDA 2.0

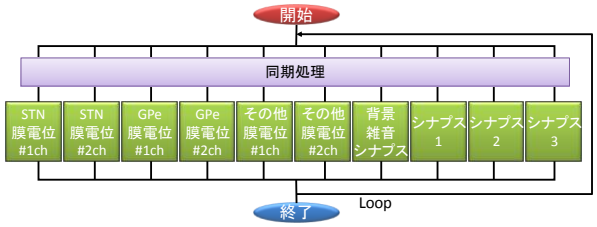

図 2. 処理の並列化と流れの模式図

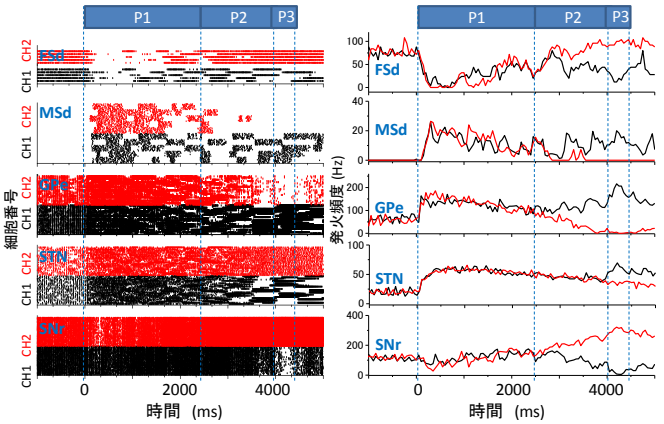

図 3. 大脳基底核モデルの組織的な神経細胞活動．左図が神経細胞の発火のラスター図．右図が集団平均の発火頻度の推移．黒はチャネル 1，赤はチャネル 2 を示す．P1 期間の GPe のチャネル間の競合によって，P2 期間のチャネル選択が起き，P3 期間で選択されたチャンネルの SNr からの出力のタイミングが決まる．

3 結果

大脳基底核モデルのチャネル間の競合的な活動が起きるのに十分な期間である，10s のシミュレーション時間の計算にかかった時間を測定した．Intel Xeon Quad (3.2 GHz)を搭載した計算機 (OS: Mac OS X 10.5.7)で，シミュレータ NEST (Ver.1.9, Intel Compiler 10.1.014 –O2)[5]を用いた場合，4 コア使用時でも実時間実行はできなかった(図 4，青の棒)．一方，GPU の場合，8.4±0.0s で計算が実行され，実時間より高速に計算を実行できた(図 4，赤棒)．結果として，CPU に比べ，GPU は約 4.0 倍高速に計算を実行した．GPU による計算において，シミュレーション時間 10s を 0.5s ごとの期間に区切り，各期間の計算時間を調べた．その結果，時刻とともに大脳基底核モデルの発火活動が変動しても，全区間において実時間よりも高速な処理が確認された．

以上の計算では，GPU が備える全 SM(30 基)の 1/3(10 基)の使用で計算を実行できた．そこで，全 SM(30 基)を使って，3 セットの大脳基底核モデルを，3 セット間で同期をとりつつ，同時に実行した．その結果，計算時間は 8.7s±0.0 で，実時間より高速に計算を実行できた(図 4)．

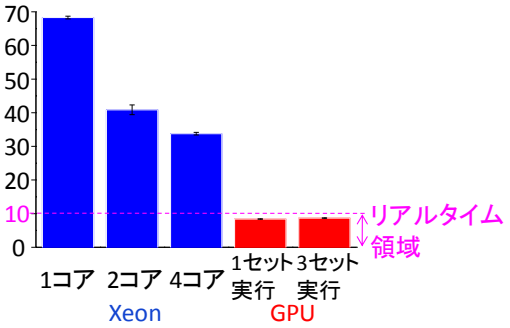

図 4. CPU と GPU による計算時間の比較

4 まとめ

GPU を用いて，大脳基底核モデルのシミュレーションを実時間より高速に実行できた．また，同期をした 3 セットの大脳基底核モデルについても，実時間より高速に実行できた．その主な要因は，GPU の並列計算性能の高さと，シナプス遅延を利用した並列化方式にある．シナプス遅延の利用は，次世代スーパーコンピュータのような大規模並列計算機による神経回路網シミュレーションにおいても，計算効率の向上に寄与すると考えられる．

本研究の結果から，将来的に，より多くのチャンネルで構成される大脳基底核モデルの実時間実行が期待できる．実際の大脳基底核は多数のチャネルによって，行動選択の多様性が実現されていると推察される．より規模の大きい大脳基底核モデルを用いて，多様な選択を行う機能を実証することが今後の課題となる．また，GPU はホストデバイスとの高速な通信が可能であり，センサと PE，PE とアクチュエータ間の実時間通信の実現可能性が高い．この GPU での実時間通信に関する検討・検証は，実時間ロボティクス制御への第一歩となることが期待できる．

参考文献

[1] O. Shouno et al., A Spiking Neuron Model of the Basal Ganglia Circuitry that Can Generate Behavioral Variability, in The Basal Ganglia IX, 58, 2009 (in print).

[2] E.M. Izhikevich, Dynamical Systems in Neuroscience, 267, The MIT Press, 2007.

[3] D. Terman et al., J Neurosci., 22, 7, 2963-2976, 2002.

[4] T. Otsuka et al., J Neurophysiol., 92, 1, 255-264, 2004.

[5]M.O. Gewaltig and M. Diesmann, Scholarpedia, 2, 4, 1430, 2007.