

## 主な研究の概要

研究テーマ: ブレインモルフィックコンピューティングハードウェアパラダイムの構築

研究の概要: 近年、脳型ハードウェアの研究が盛んであるが、未だ真の脳型には程遠く、大きなブレークスルーには至っていない。そこで、脳の最新の生理学的知見に基づき、特に脳における生物物理やダイナミクスを、ナノデバイスや微細低消費電力集積回路の物理とダイナミクスを活用して再現する、新しい脳型情報処理ハードウェアパラダイム「ブレインモルフィックコンピューティングハードウェアパラダイム」の基盤を構築する。特に、新機能脳型デバイスを用いて新規脳型アーキテクチャを直接的に実装し、脳に特異的な計算様式・機能の創発を目指す。これにより、ボトムアップ構成的に脳の情報処理様式に迫る。

## 研究内容の例

### #1 Future AI Hardware Paradigm

**[Private AI] [Human Centric AI]** **今、ここ、私のため**  
プライベートな、各個人に特定(必要)な、出しゃばらない、動的・柔軟なサービス

ユーザに近い Edge デバイス  
エッジでのリアルタイム学習  
エッジでのリアルタイム実行  
Body Attachable Devices  
Processing in Sensors

クラウド上のサーバー  
パッチ学習

IoT → IoE → Intelligent on Edge

### #2

現在のコンピュータパラダイムでは  
原理的にも技術的にも  
実現が非常に困難

### #3 計算原理・アーキテクチャ・デバイス

	計算原理	アーキテクチャ	テクノロジー
デジタルコンピュータ	2値ブール代数 (離散内部状態 Turing Machine)	イマン型 (プログラム内蔵方式 (デジタル))	OS デジタル
初期のニューロコンピュータ	ニューラルネットワーク	アン型	MOS デジタル/アナログ
近年のニューロコンピュータ	ニューラルネットワーク	イマン型?	CMOS デジタル/アナログ スパイクング
ブレインモルフィックコンピューティング	新しい計算原理 (脳型: 探索)	新しいアーキテクチャ	新しいデバイス (脳型) の活用

◎高速・大容量計算 × 低エネルギー効率 × 不得手な問題多数  
高エネルギー効率 より知的な(脳のような)処理 リアルタイム処理

### #4 AI Hardware Frameworks

パーソナルで、人に密着したAI パラダイム

①アーキテクチャと ②テクノロジーのブレイクスルー

研究のターゲット: 脳型 Edge AI HW

現在のAI HW paradigmの課題: Deep Learning

ビッグデータに依存 大型・大消費電力・高性能サーバが必要

Edge: サーバとの密な高速・大容量通信必須 通信量の爆発、データ量の増大 遅延によりリアルタイム処理不能 個人情報保護が難しい

パッチ学習 (学習と処理の分離) 柔軟な実行時間処理が困難

### #5 脳型計算原理・アーキテクチャに向けて

- 「プロセス」(複雑ダイナミクス)による情報処理
  - 物理化学ダイナミクスを直接使用
  - 非線形ダイナミクス(高次元カオス)
- 複雑システムによる複雑計算
  - 複雑なものはそのまま扱う 要素還元 × 全体論 ×
- 複雑システムのロバスト性を活用
  - 不確定性、変動、ノイズの利用による性能向上
  - 普遍性、個別性 Consistency, chaotic itinerancy, .....
- 合成による解析: 設計論として拡張

ブレインモルフィックコンピューティングパラダイム

### #6 ブレインモルフィック(Brainmorphic)計算とハードウェア

- 脳神経系の解剖学的、生理学的な「構造」や仕組みを模倣
- 「プロセス」「ダイナミクス」による情報処理
  - デバイスや回路の物理的・動力学的性質を直接利用 (特にアナログデバイス、回路)
  - 生物物理をデバイス物理で模倣・再現
  - 複雑性・複雑ダイナミクスを活用
  - 情報表現の多様性・豊かさや統一性を同時に実現
  - 不確実性、変動、ノイズなどを積極的に利用
- 最新の脳神経科学の知見、特に高次機能の知見を反映
  - 意識・無意識、情動、感情なども含めて
- 進化(構造・機能)や、身体的・環境的制約を積極的に活用
  - Embodiment(身体性) 脳・身体総合体コンピューティング

### #7 脳科学的アプローチ vs 情報科学的アプローチ

脳科学的アプローチ: 物理的に有限なリソース (有限データ、有限メモリ、有限空間、有限エネルギー、有限時間:リアルタイム、有限コミュニケーション)

情報科学的アプローチ: 巨大リソース (ビッグデータ、(ほぼ)無限メモリ、ブロードバンドコミュニケーション、膨大なエネルギー、パッチ処理も可:過去も利用可能、仮想空間、ネットワーク空間)

協働: 脳型 Edge AI HW (このような状況を利用活用)

注意の機構、捨てる処理、並列分散(多様性:複雑性)と統合、経験的予測・推論・学習・記憶、意識処理と無意識処理の協調、働きかけ(運動)による情報補完、複雑ダイナミクスの活用、物理プロセスによる処理、自律性・自己完結性: Standalone

### #8 ブレインモルフィック計算に向けた我々の研究例

- ナノスケール抵抗変化シナプスとニューロンへのSpin-Orbit Torque (SOT)デバイスの応用
  - デバイス物理で生物物理を直接的に模倣
- ダイナミクス/アルゴリズム(無意識/意識)ハイブリッド計算 HW システム
  - 物理「プロセス」(ダイナミクス)を用いた情報処理
  - 情報の多様性と統合のための複雑性・複雑ダイナミクスの活用
  - 不確実性、変動、ノイズの積極的活用
- 脳・身体総合体(Whole Organism)コンピューティングシステム

### #9 1. スピントロニクスデバイスの活用

Spin Orbit Torque アナログメモリデバイスを開発

SOTシナプスを用いて連想記憶回路を実現

反強磁性体を用いた不揮発性SOT素子(人工シナプス)

### #10 ニューロンLIF特性 シナプスSTDP特性

Leaky Integrate-and-Fire (LIF) Spiking neuron

Spike-timing-dependent plasticity (STDP)

### #11 Spin Orbit Torque (SOT) ニューロン特性

urenkov et al. Adv. Mater. 31, 1900636 (2019).

### #12 身体性の導入・活用

Cyber Physical SystemのSelf-Aware Systemとも関連

User Dependent, Personalized Computerの実現を目指す

脳・身体総合体(Whole Organism)コンピューティング

脳単体を実現するのではなく、環境や自身の状態を身体性として統合することにより、いわゆる「動的参照自己」としての内部状態を持つ、より高性能な脳型コンピュータの実現を目指す。

身体性(Embodiment)導入の効果: 直接的、物理的なインターフェイスが可能(操作性の向上)、センサ・アクチュエータと処理が一体化、マルチモーダルな情報の統合で学習・記憶性能が向上、能動的な情報取得による能動的学習が可能、自分と自分以外の区別が可能(参照自己の活用、情動の生成)

自ら環境に働きかけて学習できるので、応用範囲が格段に拡大

モバイルデバイス、ロボット、遠隔地(宇宙や深海など)探査、自動運転車、センサネットワーク、IoT、サイバーフィジカルシステム、見守りシステムなど。

Edge応用: 小型・低消費電力なハードウェア実装が必須

### #13 Chaotic Reservoir

①「自己」(内部状態)、②「対象」、③「変化」、にそれぞれ対するニューラルパターン構築

参照自己システム

①基礎内部状態NN-IC: 拡張積分発火(I/F)ニューロン

②対象表家NN-IC: カオスバイキングニューロン

③状態変化検出NN-IC: カオスバイキングニューロン

### #14 Chaotic Neural Network Reservoir

Input layer, Reservoir Network, Output layer

Learning algorithm:  $W_{oh}$

### #15 まとめ

①計算原理・アーキテクチャ ②デバイス・テクノロジー

ブレインモルフィックコンピューティングパラダイム

Edge AI ハードウェア

身体性: 脳に創発するような情報処理様式を規定

「プロセス」による情報処理が重要

東北大学電気通信研究所における共同プロジェクト研究[H29/A21]による