

LSI の製造ばらつきをリザーバーコンピューティングに利用した 先天的個性を持つ AI ロボットの実現に向けて —チップごとにふるまいが異なる AI ロボットの実現に向けて—

1. 背景

現在の AI 技術はエッジデバイス、クラウドサービス問わず、様々な場所への実装、サービスの提供が行われている。しかし、現在の技術では、同じ学習条件・モデルであれば画一的な応答を返すものが多い。Google 社などが、学習条件を変更させ、個性の付与を試みている[1]が、それは後天的に与えられた疑似的な個性に過ぎず、ドラえもんのような個体として独立した本質的な個性を持つロボットは実現されていない。また、少子高齢化に伴い、2040 年には約 69 万人の介護職員が不足するとされている[2]。高齢者一人あたりのケア時間が減少し、特に独居高齢者の心理的ストレスの増大やコミュニケーション不足が懸念されている。既存のコミュニケーションロボットでは、応答が単調で飽きられやすく、長期的なパートナーになるには応答多様性の面で課題が残されている。

2. 目的

LSI 製造時に生じるばらつきをリザーバーコンピューティングモデルの重みとして利用することで、ハードウェアレベルでの「先天的個性」を持つ AI モデルの開発を行う。

LSI 製造時に生じるばらつきとは、LSI チップが工場で製造される際、製造環境や個体差によって生じる微細な電気特性の違いによるものである。これは製造時確定され、個体によって異なるため、唯一無二の特性である。これを利用することで、学習データや学習プロセスが同じで合ってもチップごとの特性に応じて異なる振る舞いが発現する。リザーバーコンピューティングはリードアウトの重みを更新し、それ以外の重みについては更新を行わない。そのため、更新を行わない重みに LSI のばらつき値を用いることで、唯一無二のモデルを作成することができる。

画一的な応答しかできない従来のシステムに対して、本技術は個体ごとに異なる「性格」を付与できる。将来的にロボットが広く普及した際、ユーザーが親しみを感じ、飽きずに継続的な関係を気づくことができるパートナーとするための基礎技術を提案し、その概念実証を行う。

3. ソフトウェア開発内容

本プロジェクトでは、すべて FPGA 上での実装を行った。開発内容としては主に 2 つのものの開発を行った。1 つ目はチップ(FPGA)が持つ固有のばらつきを抽出する回路を持つ三値連想メモリである Ternary Content Addressable Memory with Individuality (ITCAM)の構築を行った。ITCAM の概要図を図 1 に示す。

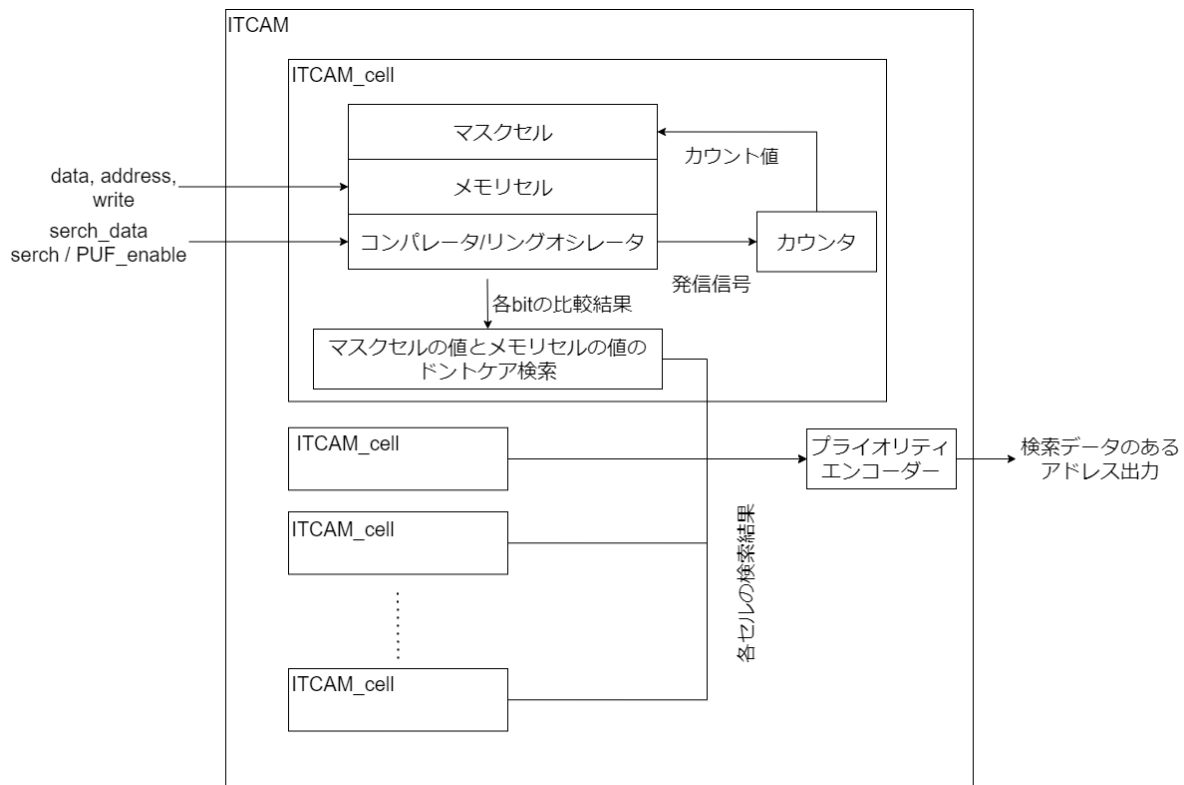


図 1 ITCAM の概要図

ITCAM はマスクセル、メモリセルの 2 つのセルとコンパレータとリングオシレータ兼用する部分、カウンタから構成され、これを 1 セルとしている。これは従来のメモリと同様、Read、Write のほかにばらつき取得モードがある。ばらつき取得モードでは通常コンパレータとして使用する部分がリングオシレータとして動作し、カウンタによってカウントが行わればらつき値が取得される。リングオシレータは各セルで微妙に異なる周波数の矩形波が出力される。この信号を用いて、カウントを行うことで、カウントされる値が異なり、取得される値がチップごと、セルごとに異なる。これは、配線された際に、配線が持つ抵抗や配線長、遅延等により発振周波数が異なるためである。

次にこの ITCAM をリザーブコンピューティングに組み込んだ ITCAM-based Reservoir Computing (IRC) の開発を行った。概要を図 2 に示す。

IRC は ITCAM で取得したばらつきを初期重みとして利用するアーキテクチャである。リザーブ層への入力やリザーブ層内で使用される重みはばらつきに由来する値がそのまま使用される。また、リードアウトの初期重みの値も異なるため、学習結果の収束具合もチップによって異なる。そのため、チップごとに異なるモデルを実現することができる。本プロジェクトでは動的 XOR タスクにて性能評価を行い、正解は $(6BD6BD6B)_{16}$ とした。ただし、遅延の関係上「6」「B」「D」が続くような出力は正解とした。Xilinx 社の Spartan7 が搭載されたボードと Altera 社の Cyclone IV が搭載されたボード 4 枚ずつで差異を調べた。

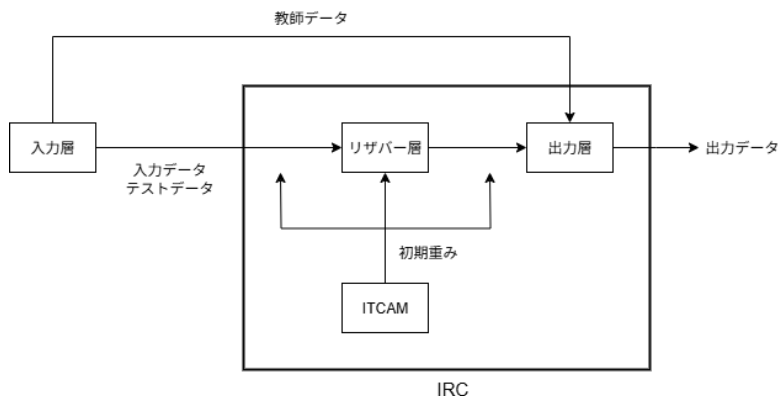


図 2 IRC の概要図

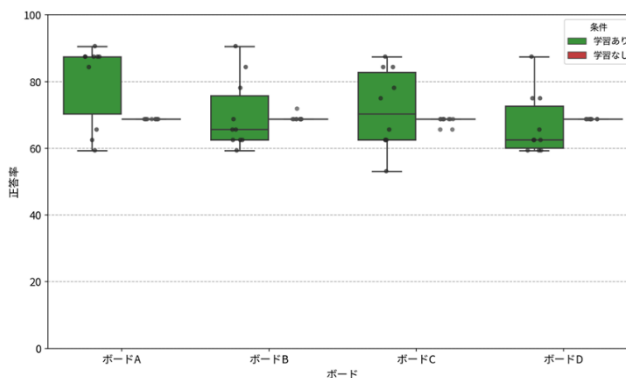


図 3 Spartan7 の学習結果

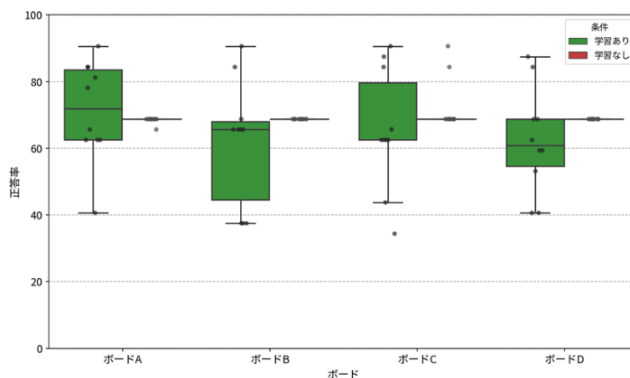


図 4 Cyclone IV の学習結果

表 1 Spartan7 の出力結果

	ボードA	ボードB	ボードC	ボードD
1回目	6BD6BDE0	6BD6BDF	6BD6E7A1	42942391
2回目	6BD6BDE0	942942D0	42940881	42942120
3回目	94294200	D6BD6B50	6BD6BDF1	BD6BDCA0
4回目	6BD6BFE0	94294281	FFFFFF721	6BD67391
5回目	6BD6BDE1	94294231	FFFFFF31	FFFFFFB0
6回目	FFFFFFB1	94294210	BD6BDE60	BD6BDE20
7回目	6BD6BD31	BD6B50B1	BD6BDEF0	42942C90
8回目	942942C1	94294291	FFFFFF70	29429CB1
9回目	BD6BDE91	FFFFFFF1	94294291	6BD6BDE0
10回目	D6BD6B51	42942940	BD6BD680	FFFFFF7A0

表 2 Cyclone IV の出力結果

	ボードA	ボードB	ボードC	ボードD
1回目	294294A0	6BD6BD60	FFFFFFF91	BD6BD671
2回目	FFFFFFF91	D6BD6B60	6BD6BD61	FFFFF390
3回目	FFFFFF660	FFFFFFF30	FFFFFFF30	FFFFFFFB0
4回目	6BD6F761	FFFFFFF0	FFFFFF000	94294201
5回目	000000B0	94294210	000000D0	429429C1
6回目	FFFFFFFB0	FFFFFFF1	D6BD6F91	294211F1
7回目	FFFFFFD60	29429431	000002F1	FFFFFFF71
8回目	D6BD6B30	FFFFFFF41	6BD6BD61	D6BD6090
9回目	00000090	000002D1	2BD6BC70	D6BD60E1
10回目	FFFFFFB0	29429440	42942910	00000D51

図 3, 4 に正答率の箱ひげ図、表 1, 2 に出力内容を示す。図 3, 4 より両者とも正答率の上限は 90~95%程度であるが、下限は Spartan7 が約 55%、CycloneIV は約 35%と大きな違いが見られた。また、同じボード内でも、正答率に差が出現しており、Spartan7 ではボード A が最も安定して高スコアとなっている。一方で、ボード C は正答率の幅が大きくなっている。Cyclone IV ではボード B, D が比較的スコアが低くなりやすい傾向が見られた。表 1, 2 に示す出力内容では、Spartan7 がミスをするときは「9」、「4」、「2」が連続したような結果となり、Cyclone IV では「FFF…」や「000…」といったミスをしている。これにより Spartan7 はビット反転をする処理を行うような局所解に陥り、Cyclone IV は発

散していることが示される。これらから LSI の種類、個体ごとに振る舞いやミスの仕方に違いが見られ、チップごとの特性が学習結果に反映されていることが確認できた。

4. 新規性・優位性

従来はソフトウェア調整によりニューラルネットワークモデルの振る舞いを変えてきたが、本プロジェクトはハードウェア由来の違いによるニューラルネットワークモデルの異なるふるまいを実現することができた。また、すべてのシステムを FPGA 上で実装することができたため、電子回路としての実装も可能である。そのため、今後より精度向上、大規模化が達成された際、ロボットの意思決定回路として System-on-a-chip (SoC) としてシステムに搭載することも可能であるといえる。

5. 期待されるユーザー価値と社会へのインパクト

LSI のばらつきを利用することで AI モデルに先天的個性を付与することができた。これにより、同じ製品であっても搭載チップによってことなる唯一無二の個性を持つ AI ロボットのベースとなる技術を提供できる。また、ばらつきは物理特性に依存するため、同じ個体であれば、ある程度固定された応答となる。これはいわゆる個性に似た一貫性をロボットに持たすことができ、先天的個性を活かした非画一的コミュニケーションが可能になると考えられる。

加えて、従来のニューラルネットワークの強化にも使用できると考えている。ロボットの動作を学習したモデルと併用することで先天的個性を活かした高度な応答が可能であると考えられる。また、従来の学習データ調整にばらつきを活かすことで、より学習データのパターン数を増やすことも可能であると思われる。

このように、AI ロボットの基幹的なシステムを担うだけでなく、既存モデルの強化・拡張といった新たな産業価値も提示できる。

6. 氏名 (所属)

小川将広 (立命館大学 理工学研究科 電子システム専攻)

(参考) 関連 URL

[1] United States Patent : US8996429B1 “Methods and systems for robot personality development”, 2012

[2] 厚生労働省, “第 8 期介護保険事業計画に基づく介護職員の必要数について”, 2021.7