

代表研究者 ダニロ ヴァスコンセロス ヴァルガス、 九州大学 大学院システム情報科学
学研究院 情報学部門 准教授

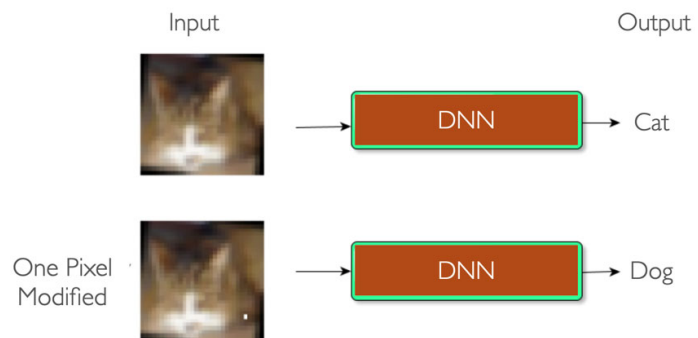
1 要旨

本研究では、AI セキュリティの向上を目的として、人間の視覚が有する高いロバスト性と継続的な適応能力に着目し、自己組織化ダイナミクスに基づく教師なし学習アルゴリズムの開発を行った。近年の画像認識システムは高精度を実現している一方で、ノイズや画像劣化、敵対的入力などの未知環境に対する脆弱性が大きな課題となっている。また、多くの手法は大量の教師データや再学習を必要とするため、変化し続ける実環境への適用には限界がある。

本研究では、まず従来の SyncMap を発展させ、個体間相互作用と時間記憶機構を導入した Decentralized SyncMap を提案することで、自己組織化学習の基盤理論を高度化した。さらに、この知見を画像処理へ展開し、ランダムネットワーク、自己組織化ダイナミクス、およびオンライン適応機構を統合した新しい教師なし画像セグメンテーション手法「SyncMapV2」を開発した。その結果、PASCAL VOC2012 および BSD500 ベンチマークにおいて高いセグメンテーション性能を達成するとともに、ノイズ、ぼかし、天候変化など複数の画像劣化環境においても従来手法を大きく上回るロバスト性を実証した。また、新しい入力に対して再初期化を必要としないオンライン適応能力を実現し、人間の視覚情報処理に近い継続的学習特性を示した。本研究成果は、AI セキュリティのみならず、自律ロボット、医療画像解析、光情報処理など幅広い情報通信分野への応用が期待される新たな自己組織化 AI パラダイムを提示するものである。

2 研究背景・目的

近年、人工知能（AI）は画像認識、自然言語処理、自動運転、医療診断など幅広い分野で飛躍的な発展を遂げている。特に深層学習の発展により、多数のベンチマークにおいて人間に匹敵、あるいはそれを上回る認識性能が報告されている。しかし、その一方で、現在の AI は学習データの分布から外れた未知環境や、ノイズ・ぼかし・照明変化・悪天候などの画像劣化に対して著しく性能が低下することが知られている。また、近年では敵対的攻撃（Adversarial Attack）によって人間には知覚できないわずかな入力変化のみで認識結果を大きく変化させられることが報告されており、AI システムの安全性および信頼性が社会的な課題となっている。



この問題は画像認識だけに留まらず、自動運転、ロボティクス、監視システム、医療画像解析、産業検査など、人命や社会インフラに関わる応用において極めて重要である。これらの分野では未知環境でも安定して動作する AI が求められるが、多くの既存手法は大量の教師データと長時間の学習を前提としているため、新しい環境に適応するたびに再学習が必要となる。このような再学習は膨大な計算資源を必要とするだけでなく、リアルタイム性を損ない、実運用上の大きな制約となっている。

近年ではロバスト学習（Robust Training）、データ拡張、自己教師あり学習など様々な対策が提案されて

いるものの、その多くは学習時にあらかじめ想定したノイズや攻撃に対する耐性を向上させるものであり、未知の環境変化に対して継続的に適応する能力は十分ではない。また、これらの手法は複雑な損失関数や大量の学習データに依存しており、人間の知覚が示すような柔軟性や適応性を本質的に説明するものではない。

一方、人間の視覚系は極めて高いロバスト性を有している。人間は強いノイズや照明変化、部分的な遮蔽、さらには初めて見る対象に対しても、ほとんど追加学習を行うことなく意味のある構造を認識できる。また、環境が連続的に変化しても、その都度システム全体を初期化することなく情報を統合しながら適応し続ける。このような知能の特性は現在の AI には十分取り入れられておらず、その実現には従来とは異なる学習原理が必要である。

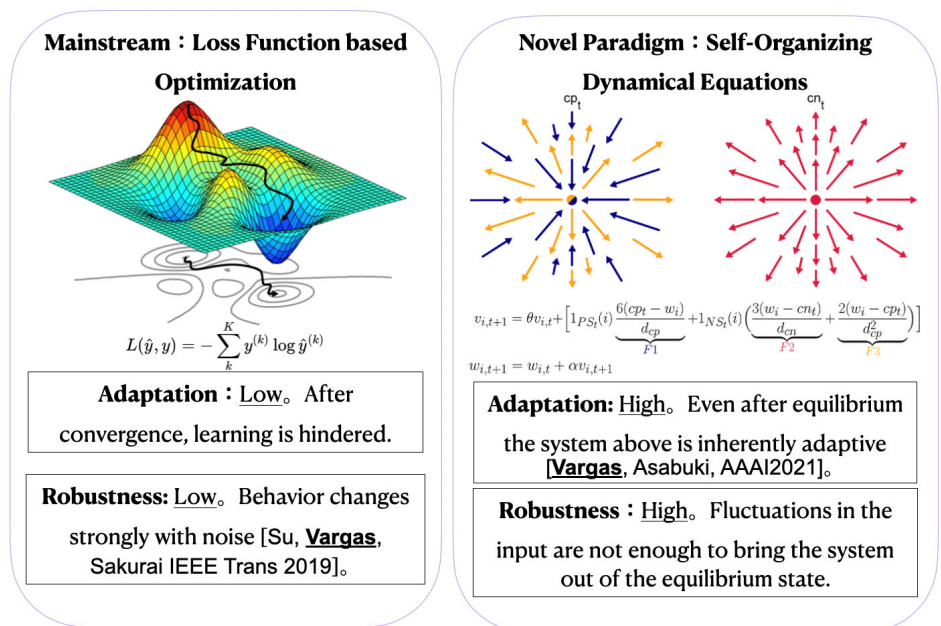
本研究では、この課題を解決するため、従来の誤差逆伝播法や損失関数中心の最適化とは異なる「自己組織化ダイナミクス」に基づく新しい AI パラダイムを提案した。具体的には、申請者らがこれまで開発してきた SyncMap を基盤として、その理論をさらに発展させ、自己組織化を利用して入力データの内部構造を自律的に獲得する学習方式を構築した。研究の過程では、従来のグループ重心に基づく更新則では局所構造の保持に限界があることを明らかにし、個体間相互作用を用いる Decentralized SyncMap および時間記憶機構を新たに提案した。さらに、この理論を画像処理へ応用し、ランダムネットワークと自己組織化ダイナミクスを統合した教師なし画像セグメンテーションアルゴリズム SyncMapV2 を開発した。

本研究の目的は、第一に、人間の視覚に近いロバスト性と適応性を有する教師なし学習アルゴリズムを実現することである。第二に、未知環境や画像劣化に対しても安定した認識性能を維持できる新しい画像セグメンテーション技術を確立することである。さらに、これらの成果を AI セキュリティへ展開し、敵対的環境や動的環境においても安全かつ継続的に動作する AI システムの基盤技術を構築することを最終的な目標とした。本研究を通して、従来の深層学習とは異なる自己組織化知能の可能性を示すとともに、画像処理のみならず、自律ロボット、光情報処理、医療画像解析、サイバーセキュリティなど幅広い情報通信分野への応用を目指した。

3 提案手法

本研究では、「ロバストで適応的な教師なし AI」を実現するため、自己組織化ダイナミクス (Self-organizing Dynamical Equations: SODE) を中核とした新しい情報処理パラダイムを提案した。従来の

の深層学習では、大量の教師データを用いて損失関数を最適化することによって知識を獲得する。一方、本研究では、入力データ間の関係性のみから情報構造を自己組織化によって形成し、その構造自体を知識表現として利用する。この考え方は、人間の脳が外界の情報を継続的に整理・再構成しながら知識を形成する過程に着想を得たものであり、AI セキュリティや未知環境への適応を可能とする新たな学習原理の確立を目的としている。



本研究で提案した手法は、大きく三つの要素から構成される。第一に、自己組織化学習アルゴリズム SyncMap の理論的拡張である Decentralized SyncMap、第二に、長期的な依存関係を学習するための時間記憶機構 (Temporal Memory)、第三に、これらの理論を画像処理へ応用した教師なし画像セグメンテーション手法 SyncMapV2 である。これら三つの要素は相互に補完し合うことで、従来手法では困難であったロバスト性とオンライン適応性を実現している。

3.1 自己組織化ダイナミクスに基づく学習原理

従来の機械学習では、入力と正解ラベルの対応関係を学習し、誤差を最小化するようにモデルを更新する。一方、本研究では、データ間の共起関係そのものが知識であると考え、入力系列から得られる関係性のみを利用して内部表現を構築する。

SyncMap では、各入力変数を低次元空間内の一点として表現し、その位置を時間とともに更新する。入力系列中で同時に観測される変数は互いに引き寄せられ (Attractor)、同時に現れない変数は互いに反発する (Repeller)。これら二つの力が自己組織化ダイナミクスを形成し、反復計算を通して類似する変数同士が自然にクラスタを形成する。

この更新は全て局所的な相互作用のみから構成されるため、複雑な最適化計算や勾配計算を必要としない。また、入力データが追加されても学習済みモデルを初期化する必要がなく、継続的に内部構造を更新できることが大きな特徴である。この性質は、人間の視覚や脳が新しい経験を既存の知識へ統合していく過程と類似しており、本研究ではこれを AI システムへ導入することを目指した。

3.2 Decentralized SyncMap

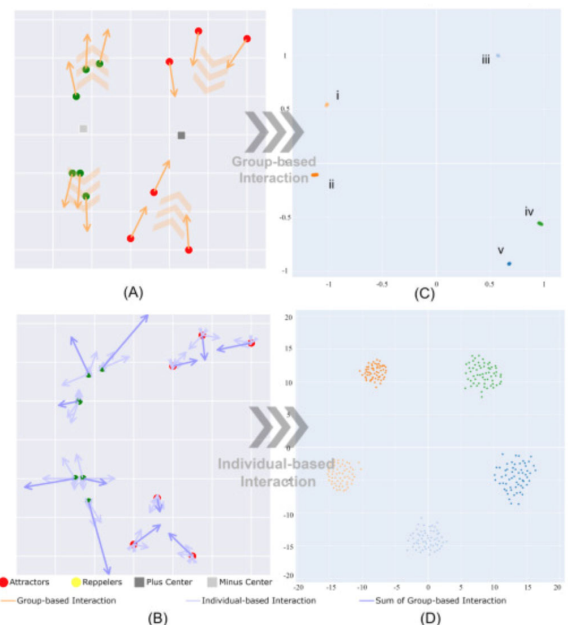
研究の初期段階では、従来の SyncMap に対する理論解析を行った。その結果、従来モデルではクラスタ全体の重心を用いて各変数を更新するため、局所的なデータ構造が平均化され、高次元データでは情報損失が生じることが明らかとなった。

この問題を解決するため、本研究では Decentralized SyncMap を提案した。

提案手法では、各変数はクラスタ全体ではなく、隣接する変数とのペアワイズ相互作用のみに基づいて更新される。すなわち、各変数は局所的な近傍情報だけを利用して位置を更新し、その結果として全体構造が自己組織化される。

この考え方は、生物集団の群れ行動や神経細胞ネットワークなど、多数の要素が局所相互作用のみから全体構造を形成する現象に対応している。分散型更新方式を導入することで、従来法よりも複雑なデータ分布や非線形構造を忠実に保持できるようになり、クラスタ境界の保存性能も大きく向上した。

さらに、距離に応じて引力および反発力を連続的に変化させる更新式を導入することで、自己組織化空間内の安定性が改善され、収束速度と表現能力の双方が向上した。



3.3 時間記憶機構 (Temporal Memory)

自己組織化アルゴリズムを長期間動作させる場合、現在の入力だけでは一時的なノイズや外乱によって内部構造が不安定になる可能性がある。この問題を解決するため、本研究では新たに時間記憶機構を導入した。

まず、アトラクタに対する時間記憶では、以前に強く関連していた変数同士が、その後一時的に異なる入力系列へ現れた場合でも、一定期間は引力を維持するよう設計した。これにより、希少イベントや出現頻度の低い特徴を保持できるようになり、時間的に離れた情報も統合できるようになった。

一方、リペラについても同様に時間記憶を導入した。長期間にわたり異なるクラスタへ属する変数同士は、反発力を徐々に増加させることでクラスタ境界を強化する。この機構によって、一時的な入力変動やノイズによってクラスタ構造が崩壊することを防ぎ、長期的な特徴を安定して保持できるようになった。

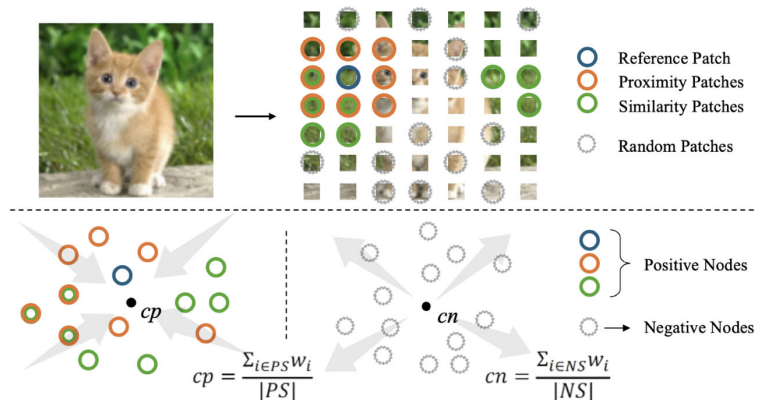
時間記憶は指数関数的な減衰を利用して実装されており、過去の情報を徐々に忘却しながらも重要な構造を保持する。この仕組みにより、生物の記憶に類似した継続学習能力が実現され、自己組織化アルゴリズムのロバスト性が大幅に向上した。

3.4 SyncMapV2 による教師なし画像セグメンテーション

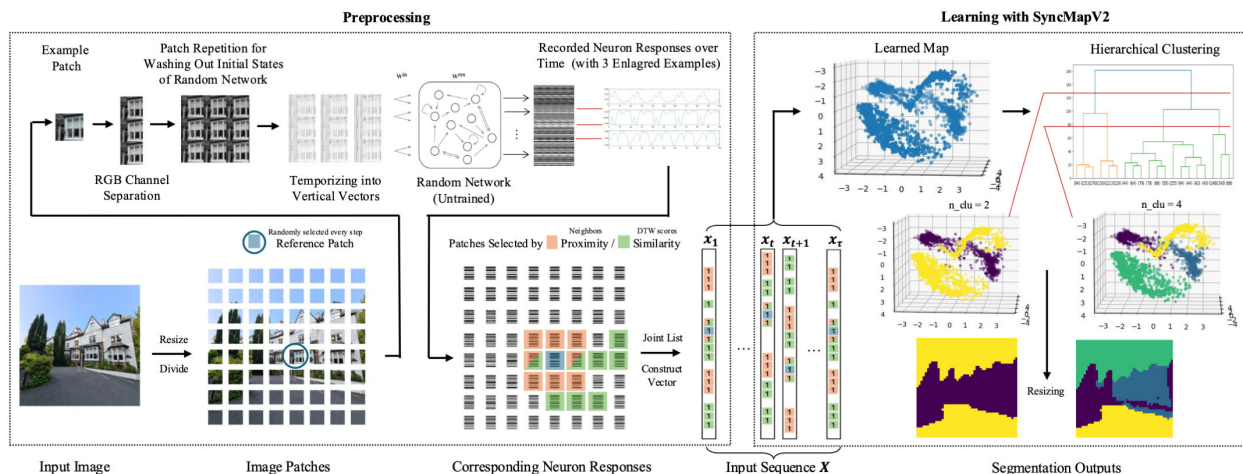
基礎理論を確立した後、本研究では画像セグメンテーションへの応用として SyncMapV2 を開発した。

まず入力画像を一定サイズの画像パッチへ分割し、各パッチを時系列データとして表現する。次に、各パッチを Echo State Network へ入力し、高次元の動的特徴表現を生成する。Echo State Network は内部結合のみを利用するランダムネットワークであり、重み学習を必要としないため、高速かつ安定した特徴抽出が可能である。

生成された特徴系列間の類似度は Dynamic Time Warping (DTW) によって評価される。DTW は時間軸方向の伸縮を考慮した類似度計算が可能であり、画像特徴の局所的な変化に対して高い頑健性を有する。本研究では、この DTW 類似度と画像中の空間的位置関係を統合し、類似するパッチ同士を自己組織化学習へ入力する系列として生成した。



その後、提案した自己組織化ダイナミクスを適用することで、意味的に類似したパッチが低次元空間上に自然に集まり、画像全体のセグメント構造が形成される。最後に階層型クラスタリングを適用してクラスタを統合し、画像空間へ再配置することで最終的なセグメンテーション結果を得る。



3.5 ロバスト性およびオンライン適応機構

SyncMapV2 では、単なるセグメンテーション精度の向上だけではなく、未知環境に対する適応能力の向上も重視した。そのため、アルゴリズムには適応学習率、対称更新則、空間正規化、リーク率、移動平均など複数の改良を導入した。

適応学習率により、学習初期では大きな更新を行い、収束に近づくにつれて更新量を自動的に減少させることで安定した収束を実現した。また、対称更新方式によって計算効率を向上させるとともに、空間正規化により低次元空間内での数値的不安定性を抑制した。さらに、リーク率と移動平均を導入することで、短期的な入力変動の影響を抑えながら、長期的な環境変化には徐々に適応できるよう設計した。

これらの改良により、SyncMapV2 は新しい入力データに対してモデル全体を再初期化することなく継続的に学習を続けることが可能となった。このオンライン適応能力は従来の教師なし画像セグメンテーション手法には見られない特徴であり、本研究が目指した「ロバストで適応的な教師なし AI」の実現において中核となる技術である。

以上のように、本研究で提案した手法は、自己組織化理論の発展、時間記憶による継続学習、画像処理への応用を統合した新しい AI パラダイムであり、AI セキュリティをはじめとする様々な情報通信分野への応用が期待される。

4 実験方法

本研究では、提案した自己組織化学習アルゴリズムの有効性を検証するため、基礎理論の評価と画像セグメンテーションへの応用の二段階に分けて実験を実施した。第一段階では、自己組織化ダイナミクスそのものの性能を評価し、第二段階では、実画像データセットを用いて教師なし画像セグメンテーションおよびロバスト性の評価を行った。さらに、AI セキュリティへの応用を想定し、画像劣化や未知環境に対する耐性についても詳細な検証を行った。

4.1 自己組織化ダイナミクスの評価

まず、Decentralized SyncMap および時間記憶機構の有効性を検証するため、人工データセットおよび実データセットを用いたクラスタリング実験を実施した。人工データでは、複数のクラスタ構造や複雑な非線形分布を持つデータを生成し、従来の SyncMap との比較を行った。また、実データでは公開ベンチマークデータセットを用い、高次元データに対するクラスタリング性能を評価した。

評価指標としては、Normalized Mutual Information (NMI) を採用した。NMI は推定されたクラスと正解ラベルとの一致度を定量的に評価する代表的な指標であり、値が 1 に近いほど真のクラス構造を正確に再現していることを意味する。また、クラスタの分離性や収束挙動についても可視化を行い、自己組織化空間の形成過程を解析した。

さらに、提案した時間記憶機構については、異なる記憶長や減衰係数を設定し、それらがクラスタ形成やノイズ耐性へ与える影響について詳細な比較実験を実施した。

4.2 教師なし画像セグメンテーションの評価

画像セグメンテーション実験では、広く利用されている PASCAL VOC2012 および BSD500 データセットを使用した。PASCAL VOC2012 は多様な物体カテゴリを含む代表的な画像認識ベンチマークであり、BSD500 は自然画像の境界検出およびセグメンテーション性能評価に広く利用されている。これら二つのデータセットを用いることで、異なる画像特性に対する提案手法の汎化性能を評価した。

入力画像は一定サイズの画像パッチへ分割し、それぞれを Echo State Network へ入力して特徴系列を生成した。得られた特徴系列に対して Dynamic Time Warping (DTW) を適用し、パッチ間の時系列類似度を算出した。その後、DTW による特徴類似度と画像中の空間的位置情報を統合して自己組織化学習を実施し、最終的に階層型クラスタリングによって画像全体のセグメントを生成した。

画像セグメンテーション性能の評価には、Mean Intersection over Union (mIoU) を採用した。mIoU は各カテゴリにおける予測領域と正解領域の重なりを評価する代表的な指標であり、教師なしセグメンテーション分野において広く利用されている。また、複数回の実験を行い、その平均値を報告することで評価の再現性を確認した。

4.3 ロバスト性評価

AI セキュリティへの応用を見据え、提案手法が画像劣化に対してどの程度ロバストであるかを評価した。具体的には、Gaussian Noise、Gaussian Blur、Motion Blur、Contrast 変化、Snow、Fog など、実環境で発生し得る代表的な画像劣化を人工的に付与し、それぞれの条件下でセグメンテーション性能を測定した。

これらの画像劣化は、自動運転や監視システムなどにおいて実際に発生する環境変化を模擬したものであり、未知環境に対する AI の頑健性を評価する上で重要である。各劣化条件について複数段階の強度を設定し、性能低下の推移を比較した。また、既存の教師なし画像セグメンテーション手法との比較を行い、提案手法の優位性を定量的に評価した。

さらに、新しい入力画像が連続して与えられる状況を想定し、モデルを再初期化することなく継続的に処理を行うオンライン適応実験も実施した。この評価では、時間とともに変化する画像系列に対して内部表現がどのように更新されるかを解析し、自己組織化ダイナミクスによる継続学習能力を検証した。

以上の実験を通して、提案手法の理論的有効性、画像セグメンテーション性能、ロバスト性、およびオンライン適応能力を多面的に評価し、AI セキュリティを支える新しい教師なし学習手法としての有効性を検証した。

5 実験結果

本研究では、提案した自己組織化学習アルゴリズムについて、①自己組織化ダイナミクスの基礎性能、②

教師なし画像セグメンテーション性能、③画像劣化環境に対するロバスト性、④オンライン適応能力の四つの観点から評価を行った。その結果、理論的改良と画像処理への応用の双方において、従来手法を上回る性能が確認された。

5.1 自己組織化アルゴリズムの性能評価

まず、Decentralized SyncMap および時間記憶機構の有効性を検証した。従来の SyncMap では、クラスタ全体の重心を利用した更新方式を採用していたため、高次元データや複雑な非線形分布では局所構造が失われる場合があった。

提案した Decentralized SyncMap では、各変数が近傍変数とのペアワイズ相互作用のみを利用して更新されるため、局所構造を保持したまま自己組織化が進行する。その結果、人工データセットでは平均 NMI 0.876、実データセットでは平均 NMI 0.840 を達成し、従来の SyncMap および他の自己組織化学習手法を上回る性能を示した。特に、高次元データやクラスタ境界が曖昧なデータセットにおいて性能向上が顕著であり、提案手法がより豊かな内部表現を獲得できることが確認された。

Type (600-Vars)	Original SyncMap	Symmetrical SyncMap	Decentralized SyncMap
Fixed	0.683 ± 0.011	0.648 ± 0.008	0.969 ± 0.031
Probabilistic	0.650 ± 0.062	0.657 ± 0.024	0.910 ± 0.015
Mixed	0.603 ± 0.059	0.589 ± 0.037	0.891 ± 0.020

また、クラスタ形成過程を可視化した結果、提案手法では初期段階から類似するデータが局所的に集まり、その後全体構造へ統合される様子が観察された。一方、従来法では重心方向への更新が支配的となるため、一部のクラスタが過度に収縮し、境界が不明瞭となる場合が確認された。これらの結果は、分散型相互作用による更新方式が自己組織化の表現能力を大きく向上させることを示している。

さらに、時間記憶機構を導入することで、一時的なノイズや入力系列の変動に対しても安定したクラスタ形成が可能となった。アトラクタの時間記憶は希少イベントの保持に寄与し、リペラの時間記憶はクラスタ境界を強化する効果を示した。これにより、従来法では不安定となる長期系列データに対しても、高い再現性を持つ内部構造が形成されることが確認された。

5.2 教師なし画像セグメンテーション性能

次に、提案した SyncMapV2 を PASCAL VOC2012 および BSD500 データセットで評価した。

PASCAL VOC2012 では、提案手法は平均 Intersection over Union (mIoU) 0.4566 を達成し、比較対象とした代表的な教師なし画像セグメンテーション手法を上回る性能を示した。特に、複数物体を含む複雑な画像や背景とのコントラストが低い画像においても、物体境界を比較的に正確に抽出できることが確認された。

BSD500 においても、画像境界を適切に保持したセグメンテーション結果が得られ、局所構造を維持したクラスタ形成が可能であることが示された。提案手法では、画像パッチ間の時間的類似性を Dynamic Time Warping によって評価することで、従来法では分離されやすい細かな領域も同一クラスタとして認識できる傾向が確認された。

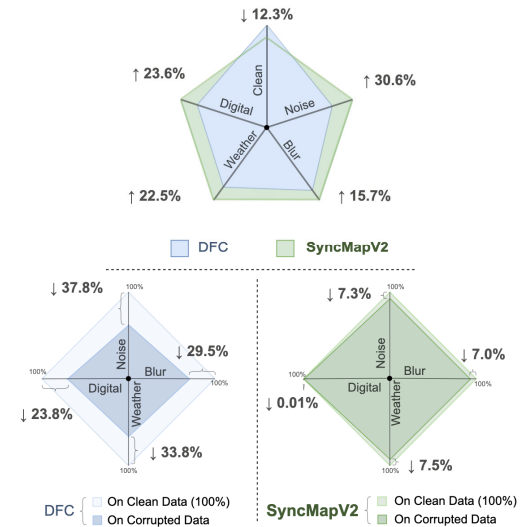
また、画像例を比較すると、提案手法では物体内部の一貫性が維持される一方で、背景との境界も比較的明瞭に抽出されており、自己組織化ダイナミクスが意味的な構造形成に寄与していることが示された。

5.3 ロバスト性評価

本研究で最も重要な評価項目の一つが、画像劣化環境におけるロバスト性である。

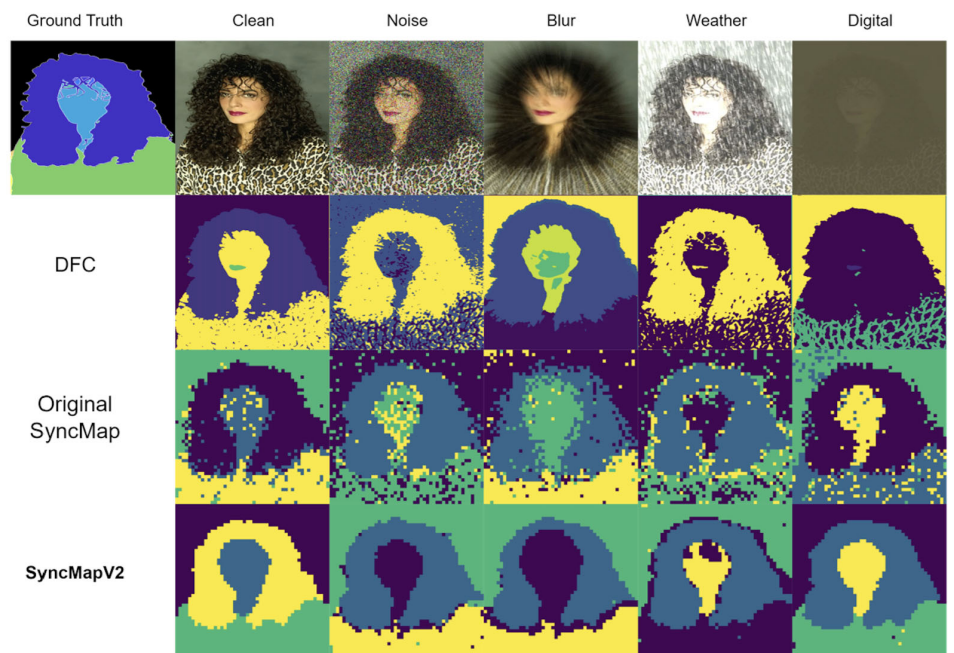
実験では、Gaussian Noise、Gaussian Blur、Motion Blur、Contrast 変化、Snow、Fog など複数の画像劣化を人工的に付与し、セグメンテーション性能を比較した。

Method	VOC2012	BSD500
Lower bound, n = 2	0.2530	0.1158
Lower bound, n = 5	0.1271	0.0683
k-means clustering, k = 2	0.3166	0.1972
k-means clustering, k = 17	0.2383	0.2648
IIC, k = 2	0.2729	0.1733
IIC, k = 20	0.2005	0.2071
Backprop	0.3082	0.3239
DFC, $\mu = 5$	0.3520	0.3739
Pixel-level*	<u>0.4103</u>	-
SyncMap*	-	0.2500
SyncMapV2, n = 2	0.3900	0.2191
SyncMapV2, n = 5	0.3539	0.2682
SyncMapV2*	0.4566	<u>0.3279</u>



その結果、既存の教師なし画像セグメンテーション手法では画像品質の低下に伴い性能が急激に低下したのに対し、SyncMapV2 では性能低下が比較的小さく、高いロバスト性を維持することが確認された。特に、ノイズやぼかしに対する耐性は顕著であり、画像特徴が部分的に失われた場合でも自己組織化によって画像全体の構造を維持できることが示された。

この結果は、提案手法が入力画素そのものではなく、パッチ間の相対的な関係性を利用して自己組織化を行うため、局所的な画像劣化の影響を受けにくいことを示している。また、Dynamic Time Warping による類似度評価が時間方向の変動を吸収し、ランダムネットワークによる特徴抽出が高次元表現を安定化していることもロバスト性向上に寄与していると考えられる。



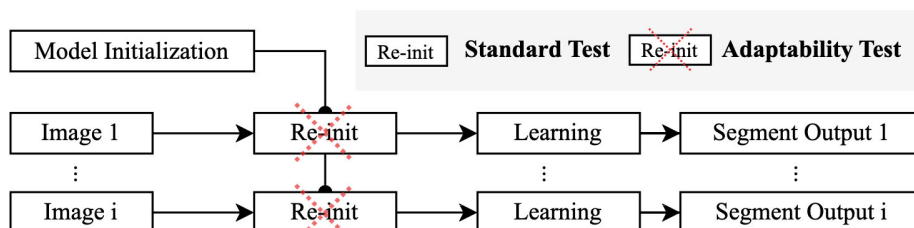
さらに、提案手法はロバスト学習や敵対的学習など特別な学習戦略を導入することなく、高い耐ノイズ性

能を実現しており、この点は従来研究との差別化要因となっている。

5.4 オンライン適応能力

従来の画像セグメンテーション手法では、新しい入力系列を処理するたびにモデル全体を再初期化することが一般的である。一方、SyncMapV2 では自己組織化空間を維持したまま、新しい入力を逐次統合できる。

オンライン適応実験では、画像系列が時間とともに変化する環境を想定し、連続入力に対する内部表現の変化を解析した。その結果、既存のクラスタ構造を保持しながら、新しい情報のみを徐々に統合する挙動が確認された。これにより、従来手法で問題となる破滅的忘却 (Catastrophic Forgetting) が大幅に抑制され、継続学習能力を有することが示された。



: We propose the first adaptability test pipeline, where model initialization occurs only once.

時間記憶機構は、このオンライン適応能力に大きく寄与している。過去の重要な構造を保持しながら、新しい情報を段階的に統合することで、環境変化に対しても安定した自己組織化を維持できた。この性質は、人間の視覚が環境変化へ自然に適応する仕組みに近いものであり、本研究が目指した生物学的知見に基づく AI 設計の有効性を示す結果となった。

5.5 総合評価

以上の結果より、本研究で提案した自己組織化学習アルゴリズムは、理論面・応用面の双方において当初の研究目標を達成したと考えられる。Decentralized SyncMap によって自己組織化理論そのものを発展させるとともに、SyncMapV2 では教師なし画像セグメンテーションにおいて高い性能と優れたロバスト性を実現した。また、オンライン適応能力を備えることで、未知環境や継続的に変化する環境においても安定して動作する AI システムの可能性を示した。

これらの成果は、画像認識だけでなく、自律移動ロボット、医療画像解析、光情報処理、さらには AI セキュリティを必要とする様々な情報通信システムへの応用が期待されるものであり、自己組織化ダイナミクスに基づく新しい AI パラダイムの有効性を実証する結果となった。

6 今後の展望・まとめ

本研究では、AI セキュリティの向上を目的として、自己組織化ダイナミクスに基づく教師なし学習アルゴリズムの開発を行い、その理論的基盤の構築と画像認識への応用を実現した。当初は、人間の視覚が有するロバスト性と適応能力を模倣した教師なし画像セグメンテーション手法の開発を目標として研究を開始したが、研究の過程において自己組織化学習そのものを発展させる新しい知見が得られた。その結果、基礎理論

から応用技術までを包含する新しい AI パラダイムを提案するに至った。

まず、従来の SyncMap に対する理論解析を通じて、クラスタ中心に基づく更新方式の限界を明らかにし、個体間相互作用を利用する Decentralized SyncMap を提案した。さらに、アトラクタおよびリペラ双方に対する時間記憶機構を導入することで、長期的な依存関係や希少イベントを保持しながら自己組織化を実現できることを示した。これらの成果は、自己組織化学習の表現能力を向上させるだけでなく、従来の教師なし学習では困難であった継続学習やオンライン適応を可能とする重要な基盤技術となった。

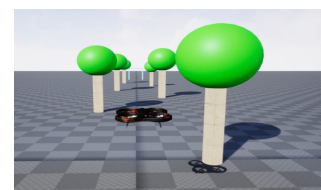
これらの理論を画像処理へ展開した SyncMapV2 では、ランダムネットワーク、Dynamic Time Warping、および自己組織化ダイナミクスを統合することで、教師データを用いることなく高品質な画像セグメンテーションを実現した。さらに、ノイズ、ぼかし、天候変化など様々な画像劣化環境においても安定した性能を維持し、既存手法と比較して優れたロバスト性を示した。加えて、新しい入力データに対してモデル全体を再学習・再初期化することなく内部表現を更新できることを確認し、人間の知覚に近い継続的な適応能力を備えた AI システムとしての可能性を示した。

本研究は、従来の深層学習が採用してきた「損失関数を最適化する」という学習原理とは異なり、「自己組織化によって情報構造そのものを形成する」という新しい学習パラダイムを提案した点に大きな意義がある。この考え方は、教師データへの依存を低減するとともに、未知環境や分布変化に対する高い適応性を実現するものであり、AI セキュリティの観点からも重要な成果である。今後、AI システムが社会インフラや医療、自動運転など安全性が強く要求される分野へ広く導入されることを考えると、環境変化や未知入力に対して継続的に適応できる学習原理の重要性はますます高まると考えられる。

今後の研究では、提案した自己組織化ダイナミクスをさらに発展させ、画像処理以外の多様な情報処理へ展開する予定である。特に、時系列解析、自然言語処理、グラフデータ解析などへの適用可能性を検討するとともに、大規模マルチモーダル AI への統合を目指す。また、本研究で得られた自己組織化学習の知見を光情報処理デバイスやリザバーコンピューティングと融合し、低消費電力かつリアルタイムで適応可能な次世代 AI ハードウェアへの応用も進める計画である。さらに、自律ロボットや医療画像解析など、継続学習が不可欠な実環境への適用を通じて、自己組織化 AI の有効性を実証していく予定である。

以上のように、本研究は自己組織化学習の理論的発展と画像認識への応用の双方において重要な成果を達成し、AI セキュリティを支える新たな教師なし学習技術の可能性を示した。これらの成果は、情報通信分野における AI の信頼性向上に寄与するだけでなく、環境変化に柔軟に適応する知能システムの実現に向けた新たな研究基盤を提供するものである。今後も自己組織化知能の理論と応用を発展させることで、人間の知覚や学習能力により近い次世代人工知能の実現を目指して研究を継続していく。

作成した手法に基づいて、農業ドローンへの応用を始めた。
シミュレーションの画像は右記の通りである。



【参考文献】

Li, X., Vargas, D.V., Individual vs. Group Dynamics: Impacts on Equilibrium States in Self-Organizing Systems, Neurocomputing, 2025.

Zhang, H., Wan, Z., Vargas, D.V., SyncMapV2: Robust and Adaptive Unsupervised Segmentation, arXiv (journal submission under review), 2025. (IEEE Trans 投稿済み)

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Knowledge graph embedding based on embedding permutation and high-frequency feature fusion for link prediction	Neurocomputing	2025 年 6 月
Robust and Adaptive Unsupervised Segmentation	arXiv (IEEE Trans 投稿済み)	2025 年 7 月
Individual vs. Group Dynamics: Impacts on Equilibrium States in Self-Organizing Systems	Neurocomputing	2025 年 10 月
Local Classifier Alignment for Continual Learning	ICLR	2026 年 4 月