

令和 4 年度 【 学園研究費助成金 < B > 】 研究成果報告書

学部名 現代マネジメント

フリガナ イイ マサル
氏 名 石井 雅治

研究期間 令和 4 年度

研究課題名 自然擬座標を用いた深層学習のメカニズムの解析

研究組織

	氏 名	学 部	職 位
研究代表者	石井 雅治	現代マネジメント	教授

1. 本研究開始の背景や目的等 (200 字~300 字程度で記述)

近年における深層神経回路網の学習（“深層学習”）の広範囲の成功の核は、データから自律的に高い汎化性能を達成することにある。そのメカニズムの解明は、今日における機械学習の最も重要な課題の 1 つである。深層学習の基本の勾配降下法と甘利等の提唱する自然勾配法では、汎化能力を含めた挙動が大きく異なる。しかし、後者は関数空間において或る意味で等方的であり局所的な取り扱いが容易である。本研究は、勾配降下法と自然勾配法との擬似的な座標変換を考え、これを利用して基本の勾配降下法のメカニズムを解析する。

2. 研究の推進方策 (300 字程度で記述)

深層学習において、勾配降下法（以下では基本方法を指すとす）から、関数空間において或る意味で等方的である自然勾配法への変換を考える。この変換は通常可積分条件を満足しないので、適当な回数微分可能な関数で接続することによって、点列上の勾配のなす関数空間において勾配を適切に写すもの（以下、“自然擬似座標（変換）”）を構成する。

自然擬似座標の解析では、勾配降下法の特異値分解による特異値基底と、空間周波数でほぼ定められた複雑度との対応が有効である。そこで自然擬似座標と特異値基底-複雑度対応を用いて新たな地形を構成し、この上で、これまで理論的研究があまり進んでいなかった鞍点近傍での系の詳細なダイナミクスを解析する。

3. 研究成果の概要 (600字～800字程度で記述)

深層学習において、その特異値分解を利用して、特異値を等方化することによって、勾配降下法の関数空間を自然勾配法の関数空間へ写す変換を構成した。この変換は、通常の可微分な座標変換のように、勾配についての可積分条件を満足しないので、適当な回数の微分可能を与えて関数を接続することによって、点列上の勾配のなす関数空間において勾配を近似的に写すことによって構成した。ここではこの変換を“自然擬似座標(変換)”とよぶ。

自然擬似座標の解析では、勾配降下法の特異値分解による特異値基底と、空間周波数でほぼ定められた複雑度との対応が有効である。本研究では、以前我々が得た結果よりもこの対応を詳しく解析し、この対応が成立する条件を単に勾配の大きさの複雑度依存性だけでなく、勾配の関数ベクトル同士の内積の複雑度依存性に関わるものにまで精密化することに成功した。

深層学習の速度や汎化能力に大きな影響を与え得るのが力学的鞍点の近傍または流出を伴う高次元の固定多様体近傍のダイナミックスの構造であることは従来から知られていた。そこで自然擬似座標と精密化された特異値基底-複雑度対応を用いて新たな地形を構成し、これらの近傍のダイナミックスを解析した。この結果、最適点(極小点ではなく)からあまり遠くない領域では、流出を伴う固定点または固定集合からのパラメータの流出方向は、複雑度に依存し、相対的に高い複雑度を持つ方向に生じること、またその速度は遅いことが明らかになった。

これまで鞍点からのパラメータの流出のメカニズムは詳しく知られておらず、この結果は、理論的に基本的で重要であるだけでなく、今後、深層学習の高速化や汎化能力の解析等への応用が期待されるものである。

4. キーワード (本研究のキーワードを1項目以上8項目以内で記載)

①深層学習	②自然勾配法	③特異値分解	④勾配降下法
⑤メカニズム	⑥空間周波数分解	⑦鞍点近傍	⑧

5. 研究成果及び今後の展望 (公開した研究成果、今後の研究成果公開予定・方法等について記載すること。既に公開したものについては次の通り記載すること。著書は、著者名、書名、頁数、発行年月日、出版社名を記載。論文は、著書名、題名、掲載誌名、発行年、巻・号・頁を記載。学会発表は発表者名、発表標題、学会名、発表年月日を記載。著者名、発表者名が多い場合には主な者を記載し、他〇名等で省略可。発表数が多い場合には代表的なもののみ数件を記載。)

今後の研究成果公開予定・方法

自然擬似座標と精密化された特異値基底-複雑度対応を用いて構成した新たな地形の様子がもう少し詳しく解析できれば、汎化能力がある程度解析可能になる。この段階に至った時点で結果をまとめ、論文アーカイブに投稿し、また神経回路網の学会等に発表を申し込みたい。