光遅延フィードバック系による物理リザバー・コンピューティング
Physical Reservoir Computing by Optical Delay Feedback Systems

○ 山根 敏志 [1]、武田 征士 [1]、中野 大樹 [1]
(1.IBM 東京基礎研究所)
○Toshiyuki Yamane[1], Seiji Takeda[1] and Daiju Nakano[1](1.IBM Research - Tokyo)
E-mail: {tyamane, seijitkd, hnumata, heroux, dnakano}@jp.ibm.com

1 まえがき

ニューラル・ネットワークの新たなアーキテクチャとしてリザバー・コンピューティングが注目されている [2]．リザバー・コンピューティングは入力層・リザバー層・出力層のリード・アウト層（出力層）からなる再帰型ニューラル・ネットワークの一種であり，リザバー内の結合ウェイトと入力結合ウェイトがランダム値に固定され，リザバー層とリード・アウト層の間の結合ウェイトのみが学習されるという点に特徴がある．このため，通常のニューラル・ネットワークに比較して，学習コストが著しく低い．さらに，リザバー・コンピューティングは物理系のダイナミクスによって実現することができる．特に，光遅延フィードバック系を用いた実装は，光通信の標準的な部品のみでシステムを構築できる上に，レーザー系の高速なダイナミクスを利用した高速な処理が可能である．本論文では，簡略化された Lang-Kobayashi 方程式を例に取り，物理系の非線形ダイナミクスの観点から，物理リザバーの動作原理を明らかにする．

2 光遅延フィードバック・リザバーの数理的解析

Echo State Network などの数理的なリザバー・コンピューティングのモデルにおいてはリザバー内の結合重み行列のスペクトル半径を 1 の近傍にセットすることが，高い性能をもたらすことが知られている．これは非線形物理系においては，系が安定性の切り替わる臨界点にあることを意味する．これを外部フィードバックをもつ半導体レーザーのダイナミクスを記述する次の簡略化された Lang-Kobayashi 方程式 [1] を例にとって説明する:

$$\dot{E}(t) = (1+i\alpha)(p-|E(t)|^2)E(t)+\eta e^{-i\Omega}E(t-1). \quad (1)$$

ここで，$\eta \geq 0$ はフィードバック強度である．まず，レーザ振幅 $|E|$ が十分小さいと仮定して３次の非線形項を無視すると，方程式 (1) は次の線形遅延微分方程式に帰着する: $\dot{E}(t) = \eta e^{-i\Omega}E(t-1)$ (2)．線形微分方程式の解法と同様に，この方程式の解を $E(t) = Ce^{\lambda t}$ の形に仮定し，(2) に代入することにより, 次の特性方程式を得る：$\lambda - \eta e^{-\lambda - i\Omega} = 0$. この特性方程式は可算無限個の複素数の固有値 $\lambda = \gamma + i\omega$ をもち，それぞれの複素固有値に対応する (2) の解を固有モードという．定常解 $E(t) = 0$ が安定であるためには，すべての固有モードに対し，γ の実部が負でなければならない．ここで η を十分小さい値から増加させると，ある γ の実部が負から正になり，対応する固有モードが一つづつ不安定化していく．ここで，元の方程式 (1) に戻ると，３次の非線形項の存在によって，不安定化した固有モードが無限大に発散することはなく，リミット・サイクルとよばれる有限振幅の安定な振動解を生じる．これらの各固有モードは物理系に内在するダイナミクスを通して互いに相互作用しており，この相互作用が従来のニューラル・ネットワークにおける結合ウェイトに相当し，固有モードを仮想的なニューロンとみなすことができる．

参考文献

[1] D. Pieroux and P. Mandel, PHYSICAL REVIEW E, volume.67, 2003,

[2] 中山丞真　他，レーザー研究，p.365-370, 2015