

リザーバーコンピューティング

- IoT時代に繋がる新しい情報処理技術 -

工学研究科 精密科学・応用物理学専攻 M2

@理工学図書館 LS講習会

2019年12月9日, 12日

本日の講演内容

◆背景 —新世代に必要な情報処理技術とは？—

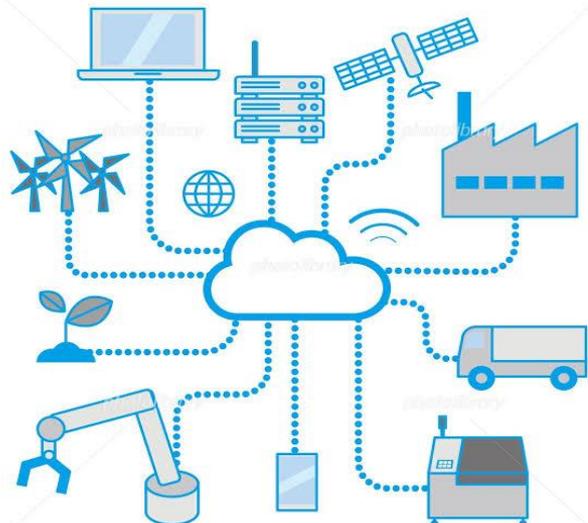
◆原理 —リザーバーコンピューティングの仕組み—

◆応用例 —IoT端末からロボットまで—

◆まとめ

IoTの時代の到来

モノとインターネットが繋がるIoTの時代がすぐそこまで迫っている.....



パソコンやスマホなどの情報端末だけでなく、

- ・家具や家電製品（スマートハウス）
- ・工場内の装置・設備（スマートファクトリー）
- ・農業現場（スマート農業）

などあらゆるもの同士がインターネットで繋がり、AIによって分析・処理される.....

IoTの仕組みはどうなっているのか？

センサー

で生データを取得

通信技術

でデータを安全
かつ高速に送受信

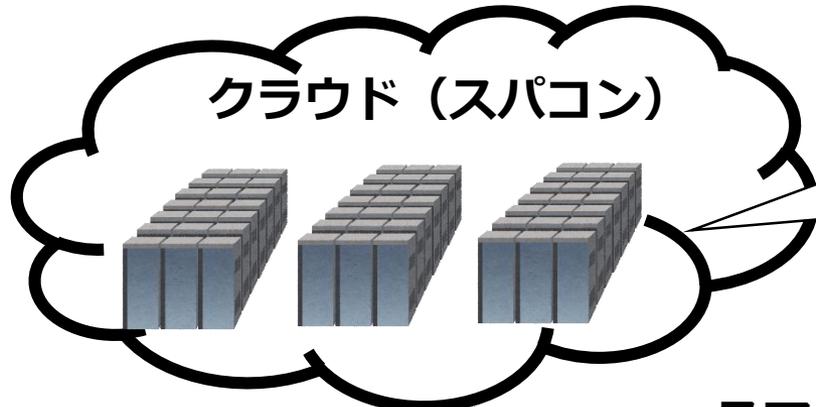
人工知能

を活用してデータ
を分析

クラウドコンピューティング

IoTではセンサーなどから集まったデータはクラウドとよばれるサーバーに送信されてスーパーコンピュータによって、情報処理を行っている

※スマートハウスを例に考える



③クラウド内のスパコンで情報を処理
→分析結果をフィードバック

スマートフォンなどの端末で
モニター・操作可能！

ゲートウェイ

②ゲートウェイにデータが中継され、
クラウドと送受信

家電

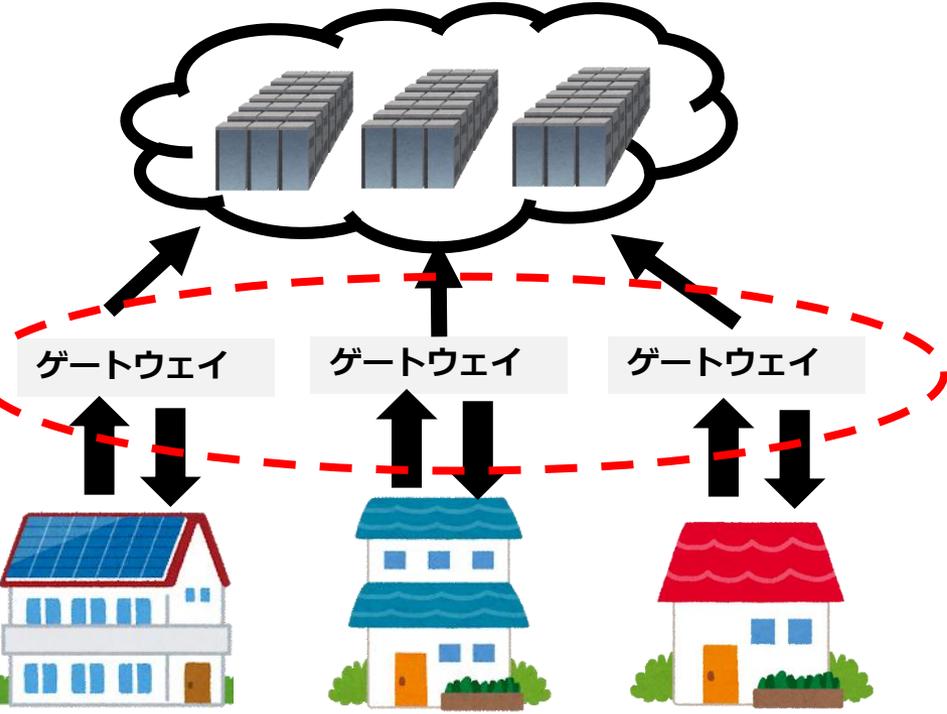
①各家電内のセンサーから様々な
データが送信される
(消費電力、温度、空調etc...)

大量のデータをどう処理すればいいか？

センサーの安価化による普及、IoT対応機器の爆発的な増大などから今後ますますデータの総量は増えていく・・・

→サーバーの負担は増えていくけど、大量のデータを高速で処理しなければならない！

エッジコンピューティング (端末でも情報の処理を行う)



対策法

- コンピュータの高性能化
- 情報通信の高速化(5G)
- **情報処理の分担**

etc...

データの処理を分散させることで、
負荷を少なくしたりより高速に情報を
分析できる利点がある！

限られた性能のエッジ端末でデータの
処理・処理を行わねばならない.....

エッジコンピューティングに用いる端末では、次々と入ってくる時系列データをリアルタイムで処理・分析するための工夫が必要！

人工知能によるデータの分析

IoTにおいて、集めたデータの分析には人工知能による機械学習が用いられている！

機械学習

ニューラルネットワーク (NN)

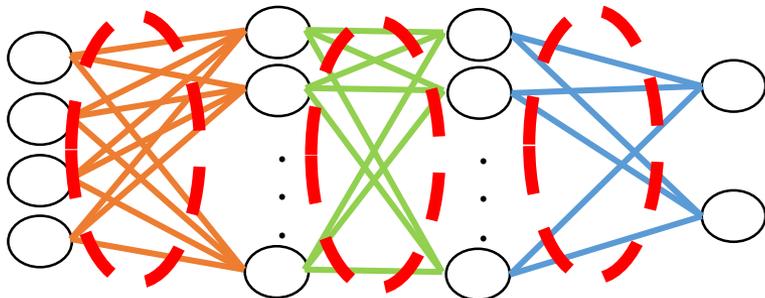
階層的NN

再帰的NN

リザーブ
コンピューティング

ニューラルネットワークとは？

→人間の脳をもとにした機械学習手法。



データを繰り返し入力して**重み**を変化させ、
入出力間の関係を関数として近似・学習

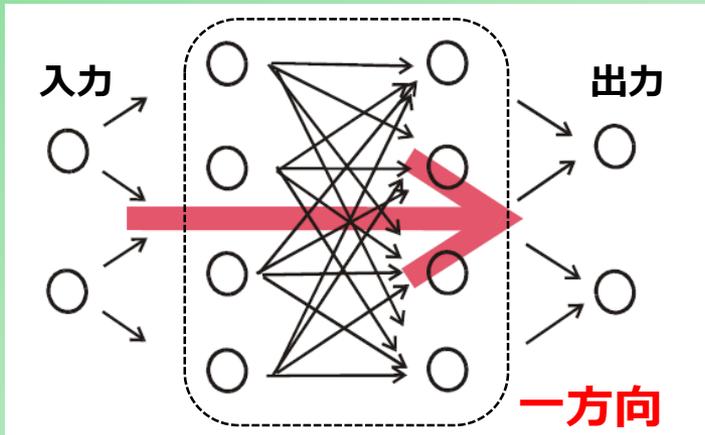
→入力されたデータの分類、予測などが可能

階層的NNと再帰的NN

※1 H. Jeager, "Tutorial on training recurrent network", GMD report, 159(2002)
 ※2 C. Szegedy et al., arXiv:1409.4842 v2 (2014)
 ※3 O. Vinyals et al., arXiv:1506.05869v3(2015)

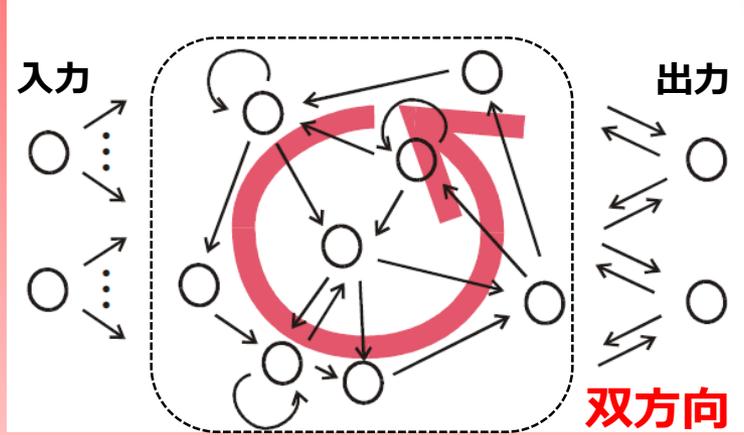
NNは構造によって大きく二種類に分類される。

階層的NN



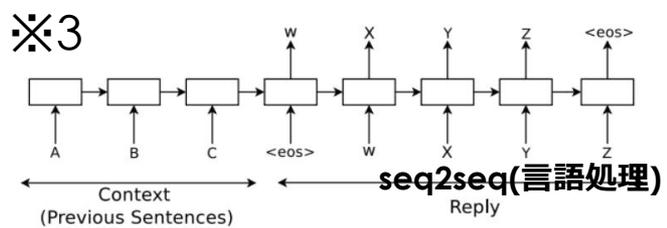
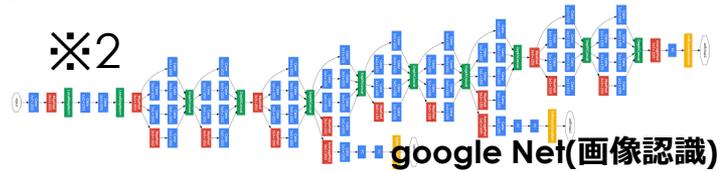
- ・ ノード同士が相互に結合しない。
→ 前の入力に関係なく一方向に情報を変換。
- ・ 時間に依存しないデータを取り扱う。

再帰的NN



- ・ フィードバック結合を持っている。
→ ノードの状態は前の入力情報を反映。
- ・ 時間に依存するデータも取り扱える！

二種類のNNを複合的に組み合わせることで、深層学習が行われている



深層学習 精度◎ だけど

- ・ 大量にデータが必要
- ・ 学習に時間がかかる
- ・ 消費電力が大きい

リザーバーコンピューティングのイメージ

Reservoir Computing(RC)……………比較的新しく誕生した再帰的NNの一種

脳科学による研究

情報科学による研究

Liquid State Machine

※4 W. Maass et al., *Neural Comput.*
Vol.14 no.11, pp.2531-2560, (2002)

W. Maass博士

小脳の計算モデルとして提唱！

Echo State Network

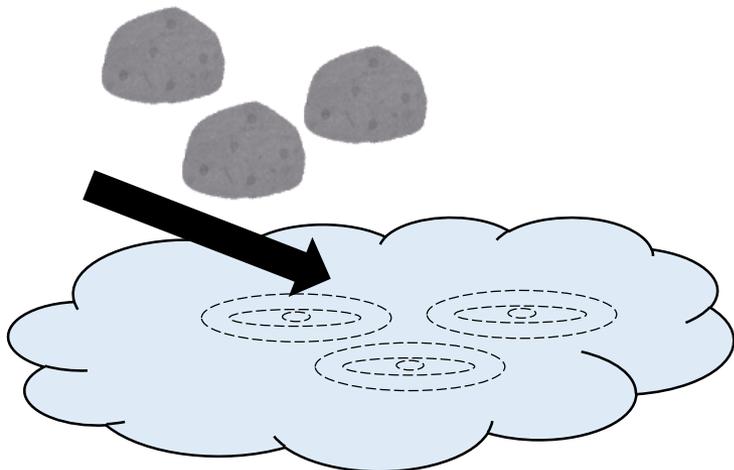
※5 H. Jaeger et al., *Science*,
Vol.304. no.5667, pp.78-80, (2004)

H. Jaeger博士

新しい再帰的NNモデルとして提唱！

→リザーバーコンピューティングとして統一された！

リザーバーとは【ため池】という意味がある。

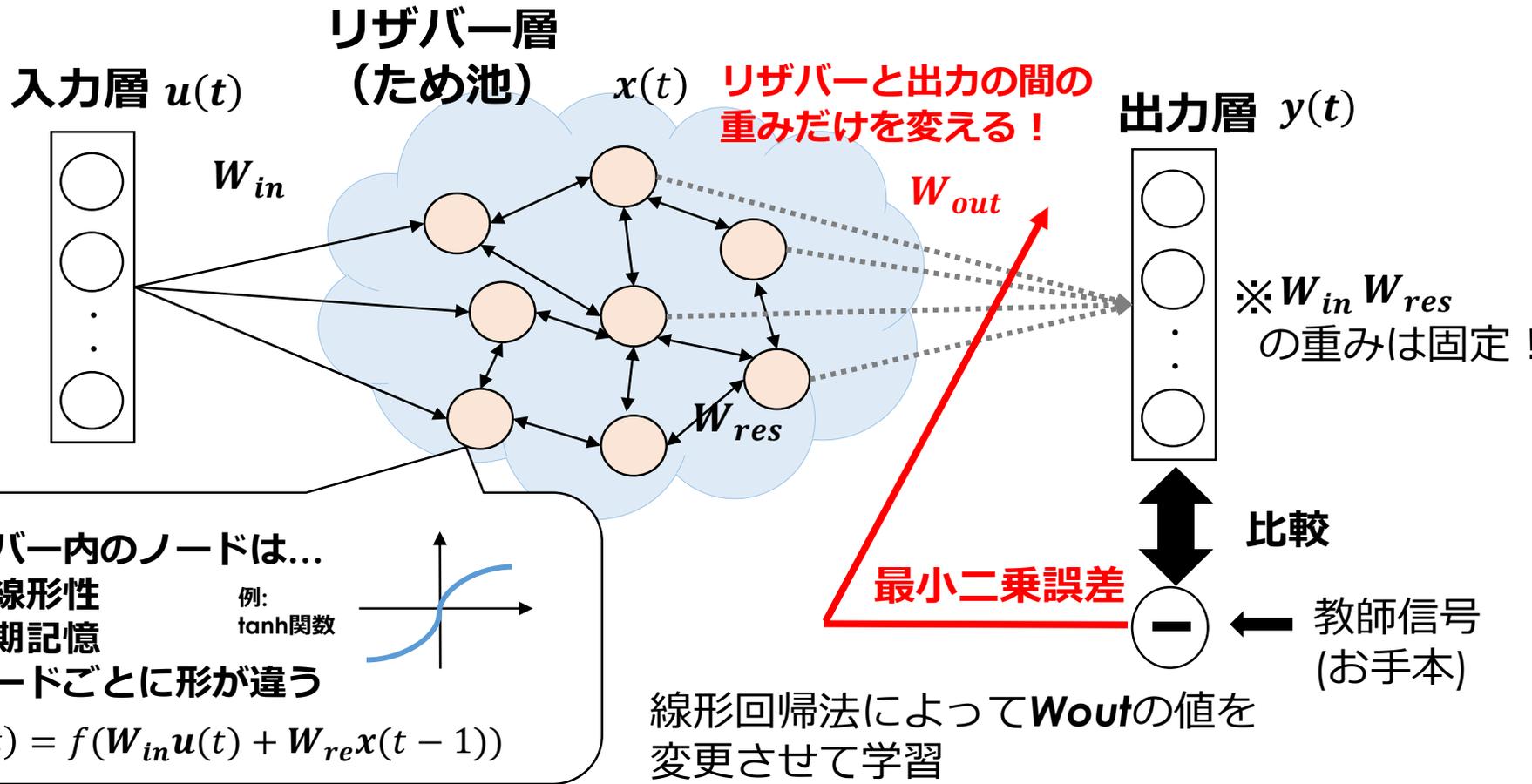


池に石(入力)を入れると、波紋が生じる……………
→石を投げ入れる順番によって波紋は異なる！

波紋を見ればそこから入力情報について分析
できる(※)！

**※これは比喻ではなく、実際水槽の波紋を利用して
計算を行った論文も出ている！**

※6 Fernando C. et al., *Advances in Artificial
Life* p588-597(2003)



リザーバー内のノードは...

- ・ 非線形性
- ・ 短期記憶
- ・ ノードごとに形が違う

例: tanh関数

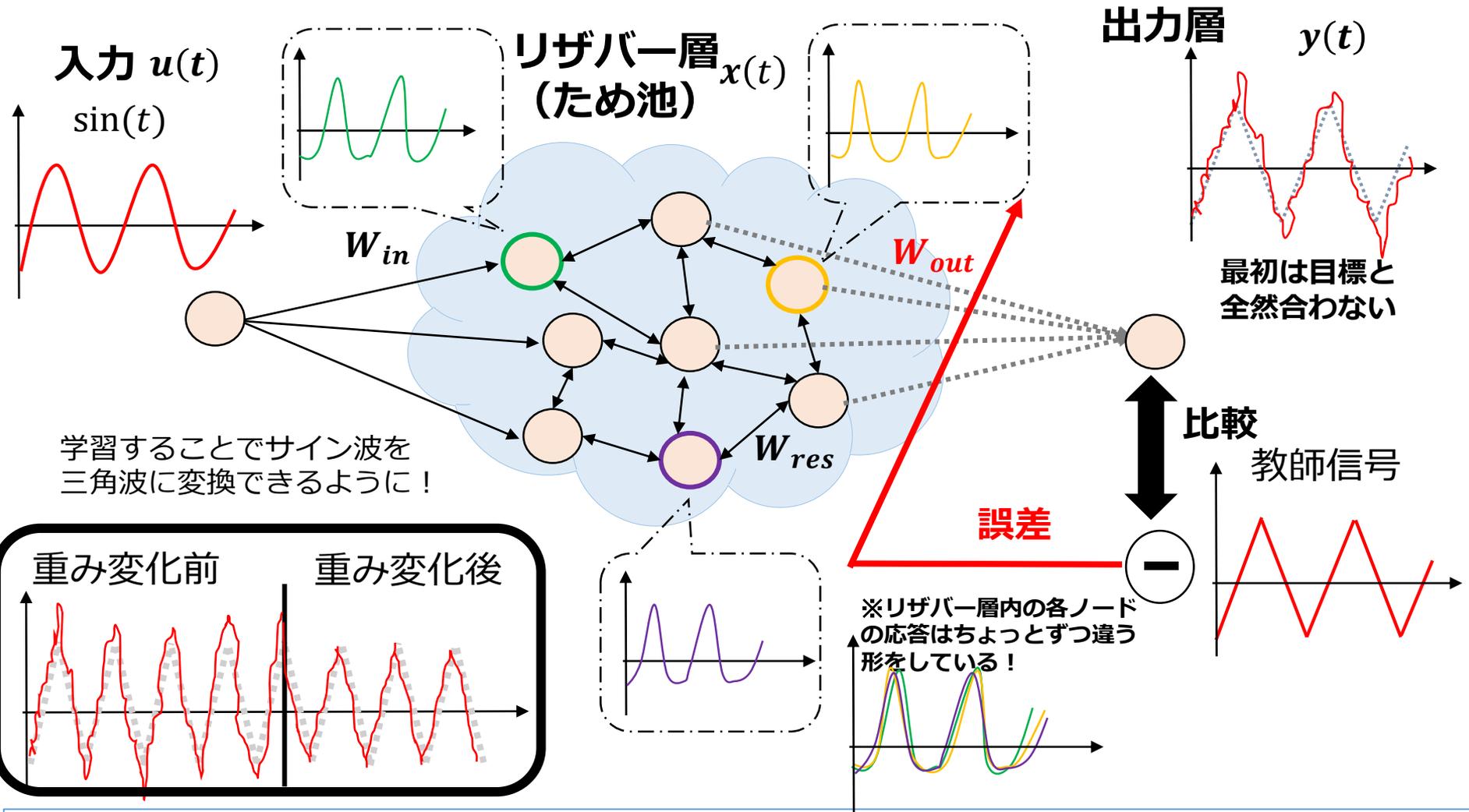
$x(t) = f(W_{in}u(t) + W_{res}x(t-1))$

メリット

- ① 重みを調整する箇所が少ないから学習が高速! → **リアルタイム情報処理**
- ② シンプルな構造なので、専用デバイス化がしやすい! → **省電力・高速化**
- ③ 非線形・短期記憶という条件があればどんな関数でもいい → **物理的な実装**

リザーバーコンピューティングの学習例

1入力1出力のリザーバーコンピューティング (サイン波⇒三角波)



出力と教師信号との誤差をもとに重みを調整することで、リアルタイムで学習を行うことができる！

→基本構造がシンプルながら、様々な学習に応用が可能！

リザーバーコンピューティングの応用先

RCの持つ様々なメリットを踏まえて、様々な応用先が期待されている

①高速で②シンプルな構造であることから、

・IoT時代に向けたリザーバーコンピューティングの活用・研究例

- ソフトウェアの観点から
- ハードウェアの観点から

③非線形関数の自由度が高いことから、

・色々な物理現象を応用した新型RC用デバイスの提案

- 光を用いたリザーバーコンピューティング
- ナノマテリアルを用いたリザーバーコンピューティング

②シンプルな構造で③非線形関数の自由度が高いことから、

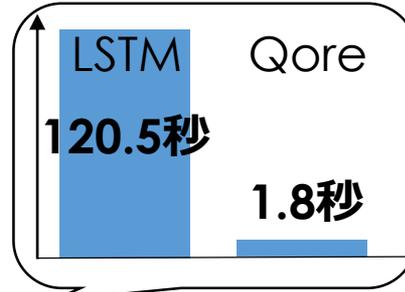
・省電力・非線形演算を利用したロボット制御への応用

- やわらかいタコ足ロボット

ソフトウェアの観点から

(例) リザバーコンピューティングを用いたソリューションを提案するベンチャー企業

株式会社Quantum Core HP
<https://www.qcore.co.jp/>



従来の深層学習と比較して、**1/100**の学習時間！

ヘルスケア

工場自動化

市場予測



ハードウェアの観点から

FPGA・アナログ回路によるリザバーコンピューティングに特化したハードウェアの開発

光やスピントロニクスを利用した高速・省電力RC特化デバイスの研究開発
(NTT, 東京大学など 後述)

リザバーコンピューティングの応用先 (※)

カテゴリー	対象
生物・医療	EEG, fMRI, 心拍等
画像	手書き文字、動画像
音声	発話、音楽・音響
機械	ロボット、車両、センサ等
工業	プラント、送電管理等
通信	電波、ネット通信等
環境	風力、地震、降雨等
安全	暗号
経済・金融	株価、為替相場等
語学	言語・文法など

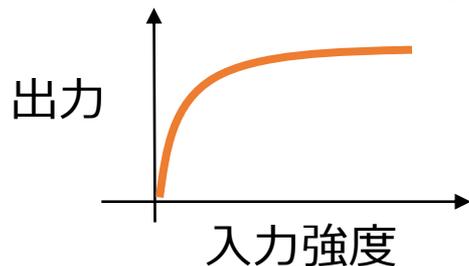
※田中剛平, 電子情報通信学会誌 vol.102, No.2 108-113(2019)

応用:光を利用したRC用デバイス

非線形な応答を示すような物理現象はリザーバーコンピューティングに応用することができる！

→光を利用すれば**電気回路よりも遥かに高速かつ消費電力の少ない**端末が作れる！

(例) 光集積回路 (NTT)



半導体光増幅器の飽和を利用！

光集積回路内でナノ秒スケールで高速に計算可能！
(理論上は電気回路よりも遥かに高速・省電力)

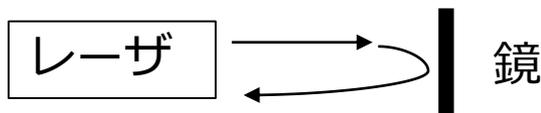
※NTT先端集積デバイス研究所HP

https://www.ntt.co.jp/dtl/technology/pe_product-photonic-reservoir.html

※ビジネスコミュニケーションvol.55 No.6 p2-p3(2018)

(例) 遅延レーザー系 (埼玉大学)

レーザーに戻り光を合わせることに
よるナノ秒オーダーのカオスな出力
を利用！



※埼玉大学内田研究室HPより

<http://www.au.ics.saitama-u.ac.jp/project/detail1/?lang=ja>

**低消費電力かつ
超高速(ナノ秒オーダー)で
計算ができる次世代の
情報処理端末として期待！**

(例) スピンを利用したリザーバーコンピューティング

スピントルク振動子

磁場をかけて電圧を入力した際の電子のスピントルク発振を利用！

※7 J. Torrejon et al., nature vol.547, 27, p428-431(2017)

スピン波デバイス

入力に対する磁性体薄膜内のスピン波の干渉を利用！

※東京大学 プレスリリース (2018/02/23)

[http://www.t.u-](http://www.t.u-tokyo.ac.jp/soe/press/setnws_201802231415194061626317.html)

[tokyo.ac.jp/soe/press/setnws_201802231415194061626317.html](http://www.t.u-tokyo.ac.jp/soe/press/setnws_201802231415194061626317.html)

(例) 銀ナノワイヤによる原子スイッチネットワーク

電圧によってONOFFを取る原子スイッチによる非線形性を利用！

※8 CDemis et al *Jpn. J. Appl. Phys.* 55, 1102B2, 2016. .

カテゴリ	例 (※9)
カ学系モデル	遅延カ学系、セルオートマトン、結合振動子系等
電気・電子系	ASIC, FPGA, VLSI, アナログ回路等
光学系	半導体光増幅器、戻り光を有するレーザ等
スピン系	スピントルク振動子、スピン波等
機械系	ソフトロボット、ばね質点系等
生物系	脳部位、培養細胞
その他	ナノスケール材料、量子系

本発表で述べた以外にも非常に様々な材料・物理現象によるリザーバーコンピューティングが提案されている！以下のレビュー論文が非常に詳しい。

※9 G. Tanaka, T. Yamane, B.J. Héroux, R. Nakane, N. Kanazawa, S. Takeda, H. Numata, D. Nakano, and A. Hirose, "Recent advances in physical reservoir computing : A review," arXiv : 1808.04962, 2018.

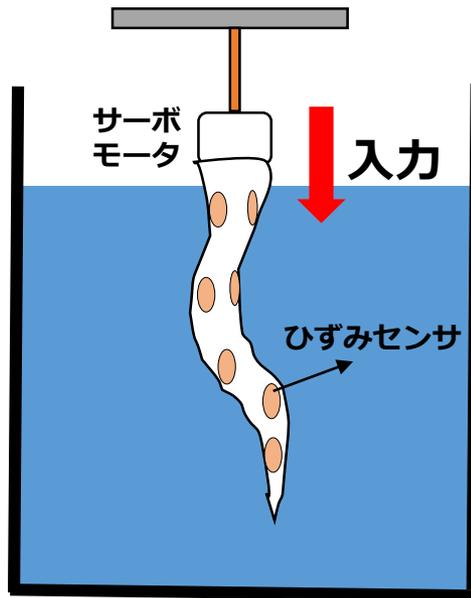
応用:やわらかいロボットの制御

ロボットやドローンなどに積める情報処理デバイスの性能には限界がある.....

→リザーバーコンピューティングを利用すれば**省電力・少ない計算コスト**で制御可能

(例) タコ足ロボットのモーション制御

やわらかな足の節々にひずみセンサーをつけて、モーションを制御する。



**センサの歪みから
出力を計算**

ベンチマークテストにより複雑な計算を行う性能があることを実証！ (※10)

センサーの情報から次に足がどのように歪むかも予測可能！ (※11)

→歪みをもとに自分の次の行動を予測して制御できる自立したロボットができる可能性も

※日経新聞web記事 2018/08/30

<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO32049350R20C18A6000000/>

※10 K. Nakajima et al., *Scientific reports*, 5 10487, (2015)

※11 K. Nakajima et al., *Soft Robotics*, 3 vol5. pp,339-347 (2018)

- ◆ 時系列データから高速で学習できるリザバーコンピューティングはIoTの次世代技術として注目されている。
- ◆ 様々な物理現象を利用したリザバーコンピューティングに特化したデバイスが提案されたり、ロボットの制御などにも応用が期待されている。
- ◆ リザバーコンピューティングが実用化まで至っているケースはまだまだ少なく、これから性能の検証や導入が進んでいくと思われる。

参考文献

日本語文献・HP

- 田中剛平, 電子情報通信学会誌 vol.102, No.2 p108-113(2019) http://eeip.t.u-tokyo.ac.jp/gtanaka/siryu/tanaka201902_jeice.pdf
- 山根敏志, PROVISION no.95 p61-65(2019) <https://www.ibm.com/downloads/cas/8MZNZZGX>
- ビジネスコミュニケーションvol.55 No.6 p2-p3(2018)
- NTT先端集積デバイス研究所HP https://www.ntt.co.jp/dtl/technology/pe_product-photonic-reservoir.html
- 東京大学プレスリリース (2018/02/23) http://www.t.u-tokyo.ac.jp/soe/press/setnws_201802231415194061626317.html
- 埼玉大学 内田研究室 <http://www.au.ics.saitama-u.ac.jp/project/detail1/?lang=ja>
- 株式会社Quantum Core HP <https://www.qcore.co.jp/>
- 日経新聞web記事 2018/08/30 <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO32049350R20C18A6000000>

学術論文

- ※1 H. Jaeger, “Tutorial on training recurrent network”, GMD report, 159(2002)
- ※2 C. Szegedy et al., arXiv:1409.4842 v2 (2014)
- ※3 O. Vinyals et al., arXiv:1506.05869v3(2015)
- ※4 W. Maass et al., *Neural Comput.* Vol.14 No.11, pp.2531-2560, (2002)
- ※5 H. Jaeger et al., *Science*, Vol.304. No.5667, pp.78-80, (2004)
- ※6 Fernando C. et al., *Advances in Artificial Life* p588-597(2003)
- ※7 J. Torrejon et al., *nature* vol.547, No.27, p428-431(2017)
- ※8 C. Demis et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* No.55, 1102B2, (2016)
- ※9 G. Tanaka et al, “Recent advances in physical reservoir computing : A review,”
arXiv : 1808.04962, (2018)
- ※10 K. Nakajima et al., *Scientific reports*, 5 10487, (2015)
- ※11 K. Nakajima et al., *Soft Robotics*, 3 vol5. pp,339-347 (2018)