**【話題１】　波長多重変調器アレイＮＮ**

今のところ我々が了解している光ＮＮの最大のメリットは積和演算を光速でできることですが、この点に関してスライド３のような波長多重変調器アレイ(WDMM)を用いれば、さらにかなり簡単に積和演算ができることに気づきました。

これはスライド２に示した90年代に活発に研究されていた空間伝播光と2次元SLMを用いた光積和演算器と基本的にほぼ同じ機能を、光平面回路上で実現できます。一つの次元を波長チャネルに置き換えたもので、100チャンネル程度なら実現可能だと思います。サイズはほぼ波長選択型の光スイッチの大きさで決まりますが、既存技術でも10-20um程度にできると思うので、全長は20波長でも500um以下。

スライド２の空間伝播光によるSLM-ＮＮの機能をおさらいしておくと、空間光変調器(SLM)を使って光強度を変調して重みw\_ijを変えて、最後にＰＤで受けて和を電気信号として取り出します。このSLM-NNとMIT型のMZI回路をベースとしたNNの違いは

(i) サイズが違う（SLM-NNをナノフォト集積するのは困難）

(ii) 1層ごとに光電変換する（実質的に光化されるのはニューロン内部のシナプス部分のみ）

(iii) 光の強度信号しか用いない（正値のみ）

という点です。

このうち(i)の問題点はWDMM-NNでは解決されて、小型集積化が可能となります。

しかも、サイズはMZI-NNよりも小さくできるので、積和演算の低遅延化という点ではかなり有利です。共振器を使いますが、共振器が複数個あっても遅延を受けるのは該当波長の共振器1個分だけなので、大きな問題にはなりません。N=20でも6.5ピコ秒程度の超低遅延にすることができそうです。

(ii)に関しては、層間に光電変換を入れたMZI-NNと比べた場合にはデメリットにはなりません。スライド４に示すようにＰＤの非線形性や電気回路による非線形関数を活性化関数として使うことができるので、その点はむしろメリットになります。ただし、全光MZI-NNと比べると(ii)は何らかのデメリットになる可能性はあります。

(iii)に関しては、磯部さんの結果では問題となっていますが、かつてSLM-NNが活発に研究されていたことを考えると解決可能なのではないかと思っています。特にWDMM-NNでは活性化関数にSA以外を用いることが自然なので、適当な活性化関数を用いれば、正値のみでも有効なＮＮ計算が可能ではないでしょうか（→素人考えですが）。

ということなので、光電変換を内包する光ＮＮとしては、このタイプも検討してみたいと思っています。

狙いとしては、隠れ層が1層のもので、一層あたりのニューロン数が比較的大きいものが狙い目だと思います。

この方法は本質的に光電融合型で光に関してはインコヒーレントであることが特徴で、その意味で電気処理に対する優位性をちゃんと定量的に確認していかないといけないです。前述のようにこの方法と同等のものがSLM-NNとしてかつて検討されていて、うまくいかなかったという結論になっているようなので、かつての問題点が小型集積化することで本当に解決するのかを示さないといけないと思います。ただ、結局、積和を光化するとどれだけご利益があるかにつきるので、比較的簡単に定量的な比較ができるのではないかと期待しています。

**以上に関して九大チームへのお願いは以下の通りです。**

**・正値のみを用いるWDMM-NNで、意味のあるＮＮ計算が可能だと思うか？**

**・電気ＮＮに比べた時の積和のみを光化することによるメリットを定量的に出すことは可能でしょうか？**

**【話題2】ＭＺＩ－ＮＮについて**

今検討しているMZIをベースにしたＮＮは、コヒーレントな光学系を使うという点が本質的に新しく、そのような光ＮＮはたぶんこれまで検討されていなかったのだろうと思います。

ただ、MZI-NNの積和部分はUΣＶという3段構成になり、かなり大規模な干渉系を二つ実装する必要があります。同じ干渉系を用いた量子計算と比べてもさらに回路が複雑になっており、個人的には当初からＮＮの演算にこの複雑な構成はオーバースペックではないか、という点が気になっています。実際、磯部さんのシミュレーションでわかったように、活性化関数にＳＡを使い実数正値だけを用いた回路ではうまく性能を引き出せていないように思います。MZI-NNに関しては、その特徴をよく理解して、性能をフルに引き出す構成を狙っていくことが大事な気がしています。

話題1で出したインコヒーレント型光ＮＮはそれなりに良い性能が出そうなので、このコヒーレント型で内部に光電変換を使ってしまうとコヒーレント型の優位性がほぼ消えてしまいそうに思えます。そこで、コヒーレント型で行く限り「全光」ということが重要な気がしています（この点に関してはまだ議論があるかと思いますが）。

以上の立場に立つと、MZI-NNの利点は

(i) 全光で通すことが可能（OE/EO変換不要）

(ii) 積和演算を負値、複素数を含めて行うことができる

と言う2点に尽きるように思います。

■全光多層化

全光多層化とは入力層から出力層まで光電変換せずに信号を通すという方式です。

(i)のメリットを引き出すには、できるだけ層数の大きなNNを狙うべきだと思います。なぜならどちらにしても最後の出力層には光電変換を入れざるを得ないだろうと考えるからです。しかも、隠れ層1層ではご利益は小さいのではないかと危惧しています（MITの論文のタイトルがDeep learningになっているのもこの点を意識しているように思います）。

そのため、今後明らかにしないといけないのは、例えば層数がいくつになれば全光ＮＮにメリットが出るかという点だと思っています。90年代の光ＮＮ研究では全光のＮＮは検討されていなかったようなので、構成自体が新しく研究すべき点は色々あると思います。

全光にすれば遅延は圧倒的に小さくできそうですが、ニューロンの数は限られるので、それがどの程度インパクトを持つのかについて、よくよく考えないといけないと思います。川上さんの原稿では結局スループットでしか比べておられないようだったので、そうすると結局メリットを出せないような懸念があります。

■複素数ＮＮ

(ii)に関しては、先日の打合せでも出た問題ですが、複素数で積和が計算できるという能力は光ならではなので、やはり複素数自由度を使いこなしてこそ、MZI-NNの特徴がフルに出せるのではないかと思っています。ネットで検索すると複素数ＮＮの理論提案はいくつかあるようで、それぞれメリットが主張されているようです（私はフォローできていません）。ただ、勾配降下法だけを考えても複数空間で行った方が効率的なように直感的には思われます。

先日の打合せではつっこんで議論できませんでしたが、ＳＡは強度（振幅絶対値）に対してしか使えないとしても、積和演算自体は完全に複素数でやってしまうことは可能ですよね？

私のイメージはスライド６のような感じです（素人考えなので間違っている可能性大ですが）

重みw\_ijとしては複素数を使い、X, Y, Z等の電場変数は複素電場Ｅを使いながら、活性化関数は|E|の関数を使い、位相は不変という仮定を置きます。

コヒーレントに多層化することを狙うとターゲット値は位相も含めて確定させないといけないですが、とりあえずターゲット値の位相は必ずゼロになるようにするのがよいと思います。

誤差関数は複素電場の差の絶対値の二乗として計算することになります。ここで複素空間内でw-α(dL/dw)を求められれば確率的勾配降下法をつかうことができますよね？

教師付き学習としてターゲット値への回帰を狙うのであれば、上記の考えで複素数化できそうに思っているのですが、磯部さんの例のように最終出力でクラス分類をターゲットにした場合（つまりsoftmaxを活性化関数として用いる場合）に複素数化できるのかどうかは私にはよくわかりません。

ただ、いずれにしても我々としてはあらゆるＮＮ処理を複素数化する必要はないわけで、むしろ複素数化のご利益がある演算処理をなにか一つでも見つけて、それにMZI-NNを適用するというのが基本方針になるのだろうと思います。そして、複素数ＮＮが何に向いているかを世の中に向けて提案できればベストだと思っています。

こちらに関しては、MITと同じようなＭＺＩ干渉計はＮＴＴにあるので、早期に面白い実験が考え付けばばすぐにでも（？）実行可能だという点が大事な点です。

**こちらの話題に関して、私からの九大チームへのお願いは次の通りです。**

**・MZI-NNを全光で多層化する構成は狙う価値があるか、と言う点に関して九大チームの意見を伺いたい。**

**・Noでなければ、層数としてどのくらいを狙うべきかシミュレーションで確認できないだろうか。**

**・ＮＮを複素数化する可能性について、九大チームの意見を伺いたい。**

**・MZI-NNをベースにして、複素数ＮＮの優位性を定量的に実証する実験を考案できないか？**

**また、**

**・OE/EO変換を含むMZI-NNに関しては、私はWDMM-NNに対して優位性が少ないと思っているのですが、この判断についてはどう考えるか？**

**■最後に**

話題1インコヒーレント型と話題2コヒーレント型と二つの方式を紹介しましたが、デバイス的には両方面白そうなので、両者がそれぞれ向いている分野、アプリケーションがあるという結論になるとハッピーです。ただ、私の本音としては話題2の方が根本的に新しい方式のように見えるので、学問的にも調べることがいろいろありより面白そうに思えています。ただ、技術的な困難度はあがるので本当にやる価値があるのかという心配があります。

その意味でも、コヒーレント型ＮＮの持つポテンシャルを早めに明らかにしたい（全光のメリットと複素数化の可能性）というのが私の考えているところです。ＭＩＴの論文が出て注目を浴びていることは必至なので、早期にその特徴をあぶりだした実験をできれば意義があると思っています。ただ結局光電変換を使うことになるのであれば、インコヒーレント型の方法がはるかに簡単に実現できそうなので、そちらを先にやるべきだと思っています。

光電変換を入れるかどうかに関しては、メモリにデータを一時収納するかどうかに密接に絡んでいると思いますが、そこは九大チームに判断をまかせます。