

総積演算を実現する頑健な神経 回路モデルと、覚醒度との関係 に関する着想

産業技術総合研究所

一杉裕志

2006-08-18

概要

- 一般に神経回路でN入力の積演算（またはAND演算）を実現すると、細胞死に対して頑健ではなくなる。しかし中継細胞の自己死の機構を仮定すれば、頑健な総積演算回路が実現可能であることを示す。また、この回路が必要とする一定値の入力が、網様体賦活系により大脳皮質I層に入力する覚醒度を現す信号の性質と類似している点についても指摘する。

背景

ベイジアンネットと総積演算

- 大脳皮質はベイジアンネットでモデル化できるかもしれない。
 - 構造的類似性: 有向グラフ、双方向結合
 - 機能的類似性: ベイズ推定、リアルタイム性
- ベイジアンネットの確率伝播アルゴリズムは、 N 入力の総積演算を必要とする。どのような神経回路で総積演算が実現可能だろうか。その回路は大脳皮質に実在するだろうか。

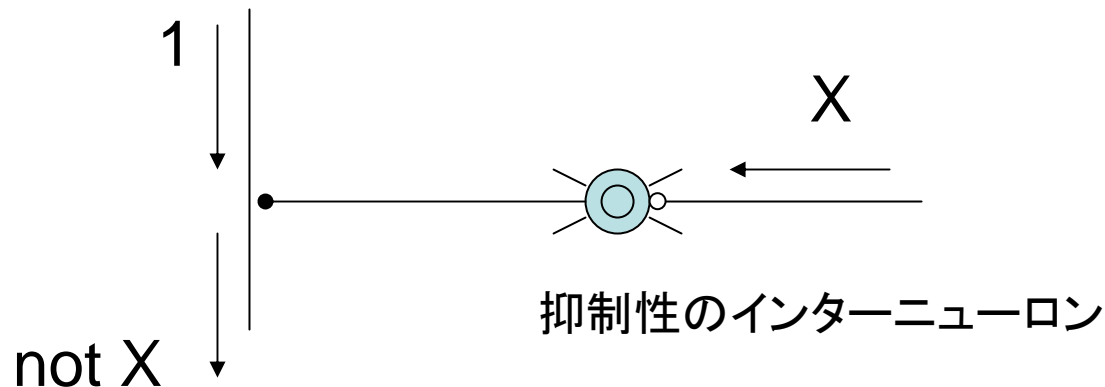
細胞死に対する頑健性の問題

- 一般に多数の正論理の入力を受け取る積演算 (AND演算) モジュールは、入力細胞の細胞死に対し頑健でない。
 - N 個の入力のうち1つでも故障して信号が来なくなると、他の N-1 個の入力に関わらず常に 0 を出力。故障率が N 倍になることを意味する。



頑健性の問題への対策

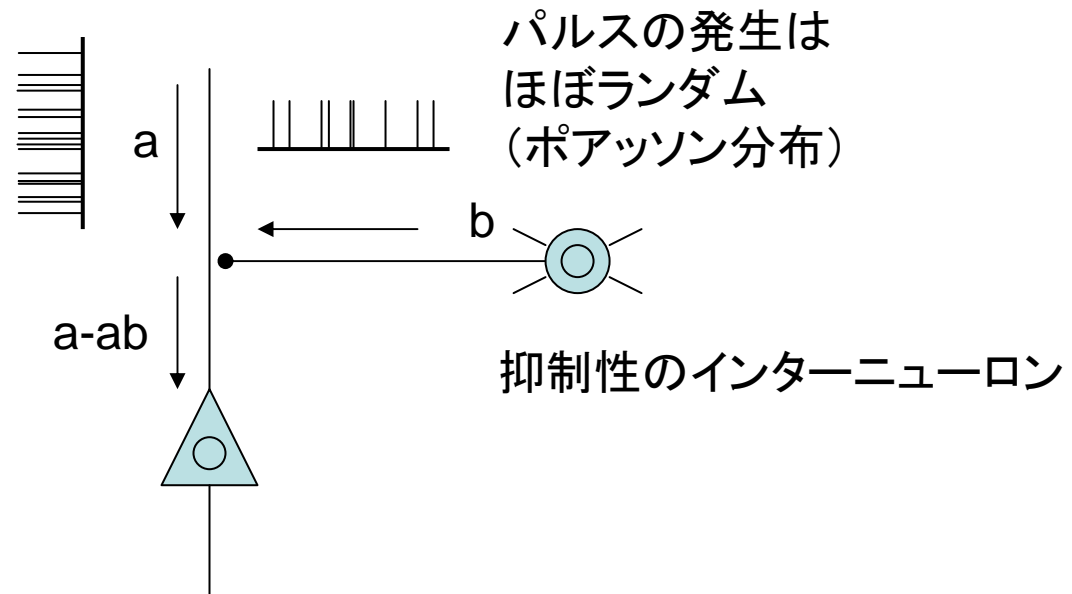
- 「負論理」の表現を用いてうまくいかないだろうか？
- ただし、神経細胞は電気回路と違い、単独でNOT演算はできない。下図のようにする。
- これを使って総積演算も行えることを示す。



提案モデル

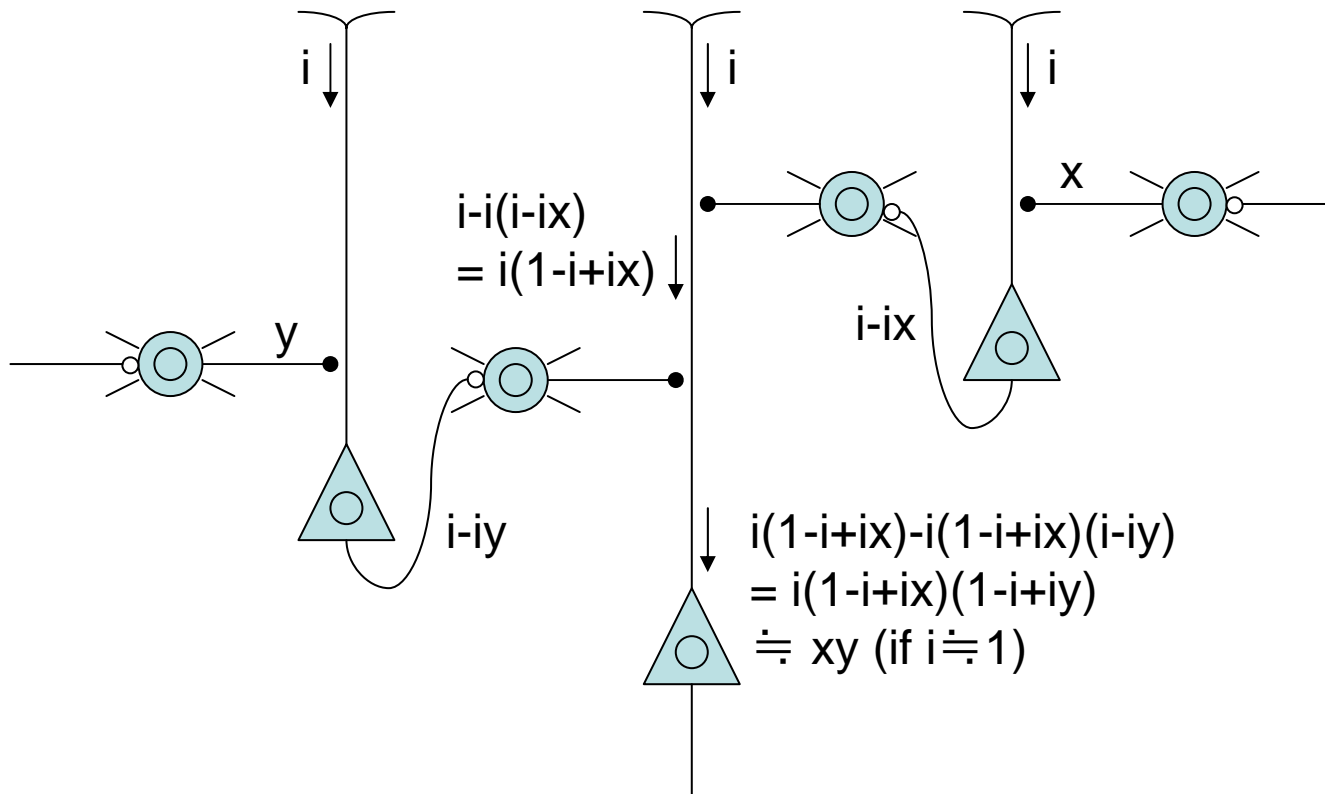
神経線維上の抑制性シナプス

- 神経線維を伝わるパルスの頻度を a 、抑制性シナプスに入力されるパルスの頻度を b とすると、パルスが抑制され消える確率は近似的に ab 。通り抜けるパルス頻度は $a-ab$ に。



掛け算の実現

- xy を近似的に計算する神経回路。
 - 同様にして n 個の入力の積も計算可能。



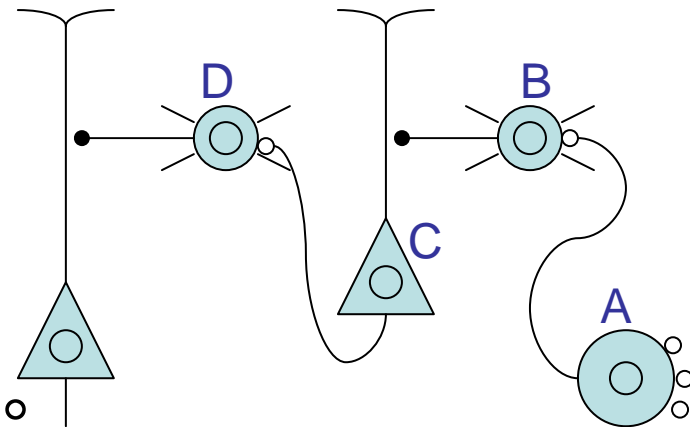
入力細胞の細胞死に対する頑 健性

耐故障機構

- 仮定：
 - 正常なニューロンは常に自発発火している。
 - 異常に高い発火頻度が続くと、ニューロンは自己死する。

- 故障の検出と回復：

1. 入力細胞 (AまたはB) が死ぬ。
2. 自発発火信号が来なくなる。
3. 負論理ニューロン (CとD) の発火が高頻度に。
4. 負論理ニューロンが自己死。
5. 掛け算モジュールは機能回復。



細胞の自己死の仮定の妥当性

- てんかん発作は神経細胞の過剰な興奮を引き起こすが、発作は通常数分でおさまる。
 - これは、異常に興奮する回路網を切断する機構の存在を示唆しているのでは？
- 神経細胞の不可逆的破壊実験に使われるイボテン酸は興奮作用を持つ。注入後、神経細胞は異常に興奮しやがて死滅する。
 - イボテン酸は自己死の機能を利用し効率的に相手にダメージを与えるように進化した神経毒なのではないだろうか？

問題点

- 自発発火の頻度は低いので、それが来ないことで負論理ニューロンが自己死するほどの発火頻度になるだろうか？
- いずれにせよ、入力が0であることと入力細胞が死んでいることを区別する方法は、自発発火以外にない。提案モデルとは別の機構で故障の検出・回復を行っているのかもしれない。

エネルギー消費に関する考察

i の値とエネルギー消費

- i の値を小さくすれば、計算精度は落ちるが消費エネルギー(発火率)を下げられる。
 - 栄養不足や酸素不足などの状況では i を下げる機構が脳にはあるのかもしれない。
 - 「意識がもうろうとした状態」
 - 選択的注意などにより大脳皮質のある領域の機能が不要なときに、その場所の i を 0 にしてしまえば、エネルギー消費を抑えられる。そのような機構もあるかもしれない。
 - 平常時には精度をそこそこにおさえ、緊張時には i を 1 に近づけて精度を上げるのかもしれない。

網様体賦活系との関係

網様体賦活系との関係

- 脳幹網様体は視床非特殊核を經由し大脳皮質I層に入力し、覚醒度を維持する。選択的注意や慣れにも関与する。I層には、他の層の錐体細胞の頂上樹状突起が入っている。
- 前述の i の役割は「覚醒度」ととても似ている
- 提案モデルの i を受け取るニューロンは頂上樹状突起をI層に伸ばす錐体細胞と似ている。
 - ただし、頂上樹状突起以外の樹状突起の役割については説明できない。

今後

今後

- ハイパーカラム単位あるいは領野単位で大脳皮質の機能をオン・オフする機構が、選択的注意や推論といった機能の実現に必要であろうと予想している。
- 大脳皮質I層への入力は、そのような機構の候補として注目している。今後も文献調査等を進める。
 - それにより、選択的注意・推論機構を再現するプログラムのアーキテクチャ設計のヒントを得る。