

# 視覚刺激の座標変換を行う神経回路を独立成分分析により自己組織化するモデルの構想

産業技術総合研究所

一杉裕志

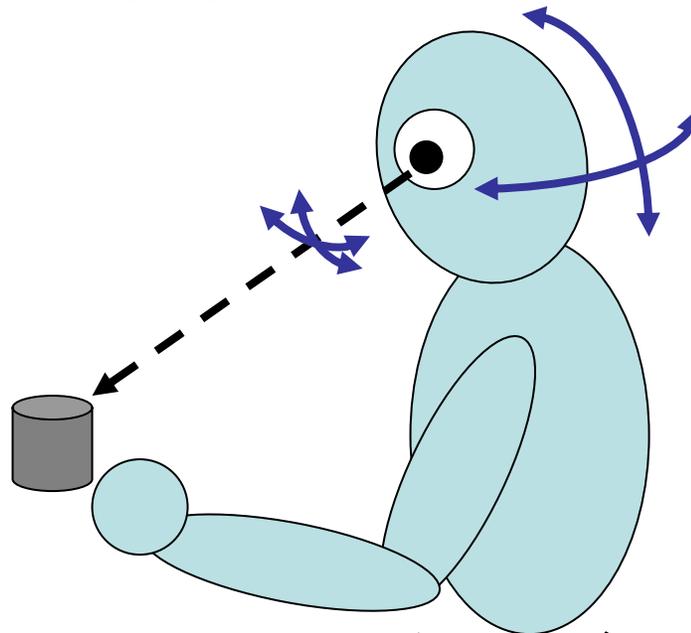
2007-04-03

# 概要

- 「大脳皮質は同一階層内の領野間の結合を用いて独立成分分析(ICA)を行う」という仮説を提案する。
- この仮説を用いて、視覚刺激を網膜座標から身体座標へ変換する神経回路を自己組織化するモデルを構築できる。
- このモデルは視覚系領野間の結線に関する解剖学的知見、視覚系領野の生理学的知見と整合性が高い。
- 大脳皮質の **BESOM** モデルを支持する証拠。

# 座標変換の問題

- 顔も眼球も自由に動くのに、脳はなぜ網膜上の視覚刺激から物体の位置を知ることができるのか？



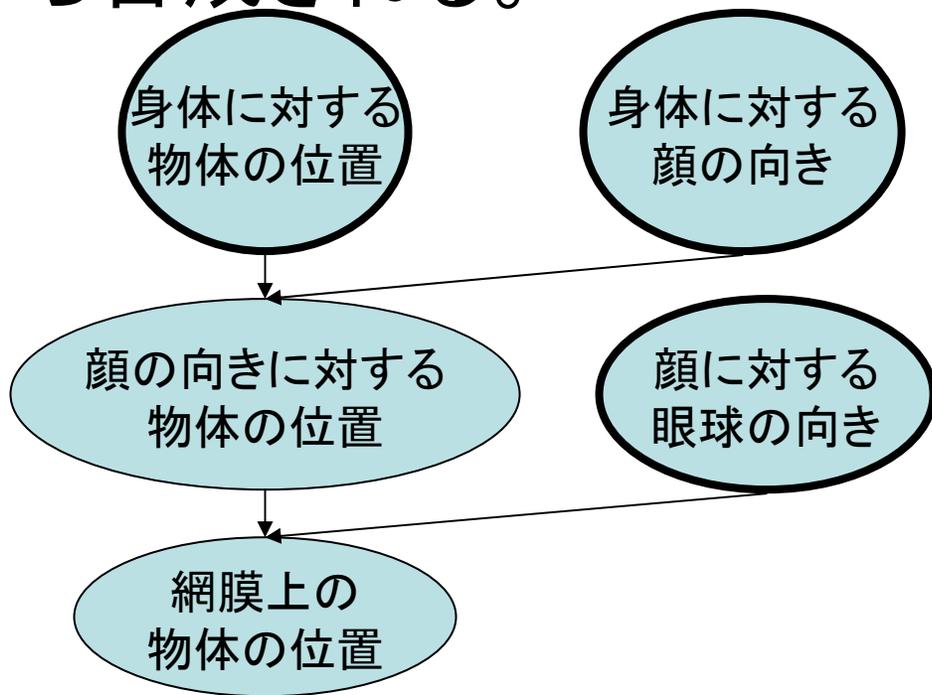
- 答え：顔の向きと眼球の向きが分かれば、網膜上の視覚刺激から身体座標で表現された物体の位置が当然分かる。

# 座標変換の自己組織化の問題

- 脳は「最低限の遺伝的に決定された構造」と「最大限の自己組織化」によって、座標変換を行う神経回路を実現しているはずである。では具体的にはどうやっているか？

# 網膜に映る映像の生成モデル

- 網膜座標で表現された視覚刺激は、「身体に対する物体の位置」、「身体に対する顔の向き」、「顔に対する眼球の向き」という3つの独立成分から合成される。



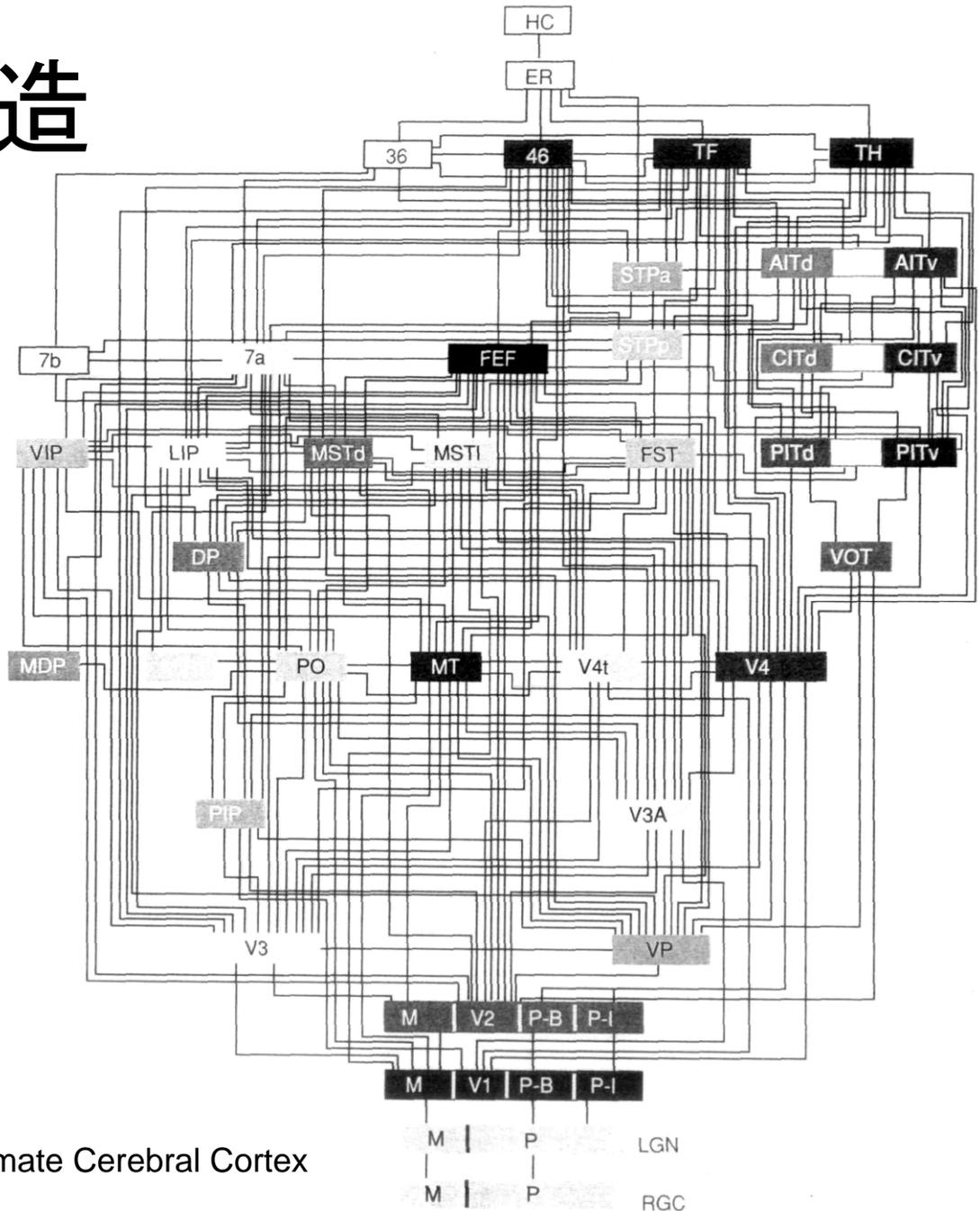
# ICAによる生成モデル獲得

- 網膜上の視覚刺激、顔の向き知るための体性感覚、眼球の向きを知るための感覚の情報をICAすれば、前述の生成モデルを自己組織化できるはず。
  - 生成モデルは認識モデルとしても使えるので、認識時の座標変換に利用可能。
- そのような自己組織化を行う神経回路モデルを、神経科学的知見と矛盾しないように構築したい。

# 神經科学的知見

# 解剖学的構造

- 階層間の上下方向の結合と、同一階層内の横方向の結合がある。



# 物体の形と動き

- V4, PIT, CIT, AIT: 物体の形
- MT, MST: 物体の動き
  - 「MST 野の出力は動いている物体を目で滑らかに追跡する円滑性追跡眼球運動に用いられることが知られている。」(川人「脳の計算理論」p.370)  
ということはMST野は頭部座標における物体の動きを表現？

# 7野、LIP

- fixation neuron
  - 視線の方向
- passive visual neuron
  - 頭部中心座標での視覚刺激の位置
- (脳科学大事典 p.124)

# 7a, 7b

- Responses in 7a are primarily visual and motor related, as compared with 7b, which is largely somatosensory.

<http://keck.ucsf.edu/~sabes/Sensorimotor%20areas%20and%20Connections%20Overview/Actual%20Page/7a.htm>

# MIP

- 網膜座標におけるターゲットの位置

Dorsal premotor neurons encode the relative position of the hand, eye, and goal during reach planning.

Neuron. 2006 Jul 6;51(1):125-34

Pesaran B, Nelson MJ, Andersen RA

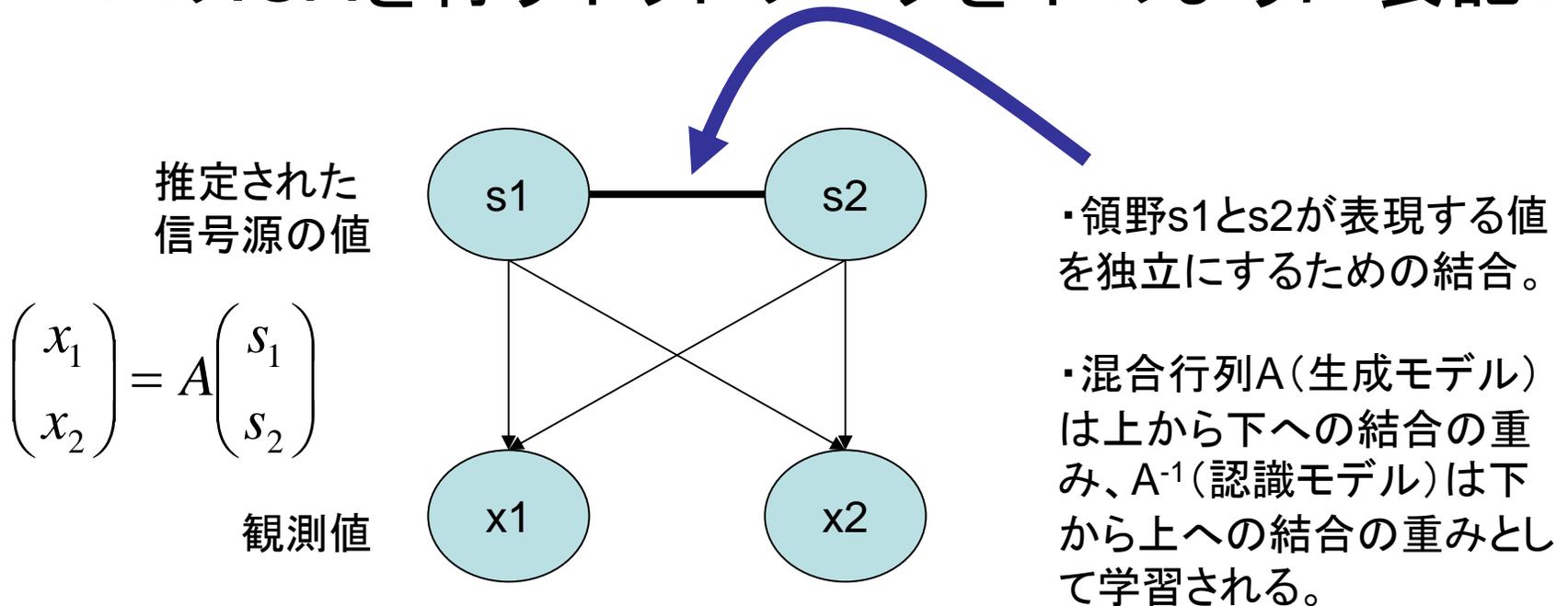
# 仮説と提案モデル

# 仮説

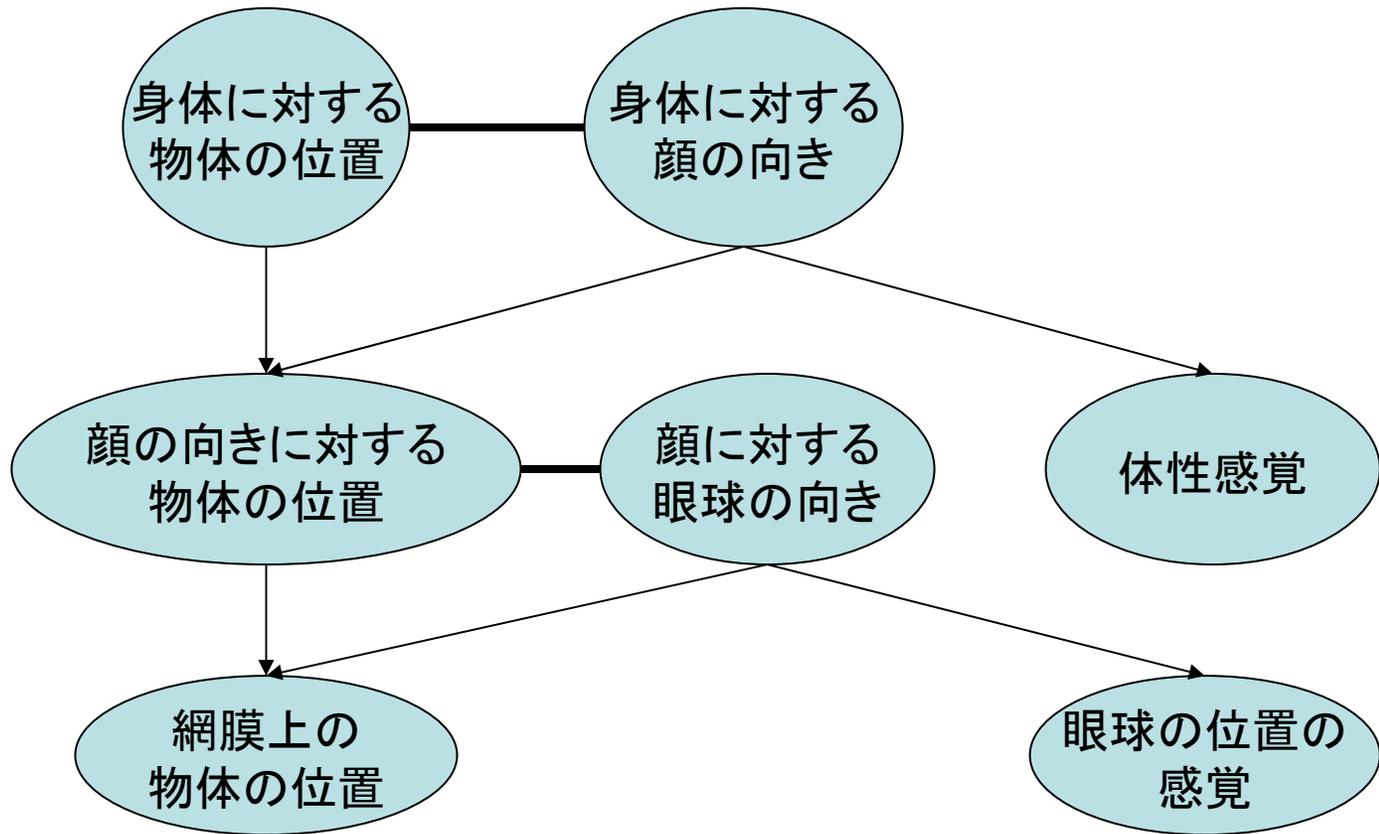
- 仮説:「大脳皮質は同一階層内の領野間の結合を用いて独立成分分析(ICA)を行う。」
- だとすれば、領野間の上下方向のおおまかな結合と、同一階層内の領野どうしを独立にする横方向の結合があれば、座標変換をする神経回路が自己組織化されるだろう。

# ICAを行うネットワークの例

- 独立な信号源  $s_1, s_2$  が行列  $A$  で混合され  $x_1, x_2$  になるとする。ICAにより、観測値  $x_1, x_2$  のみから  $A$  と  $s_1, s_2$  を推測できる。
- このICAを行うネットワークを下のよう表記：



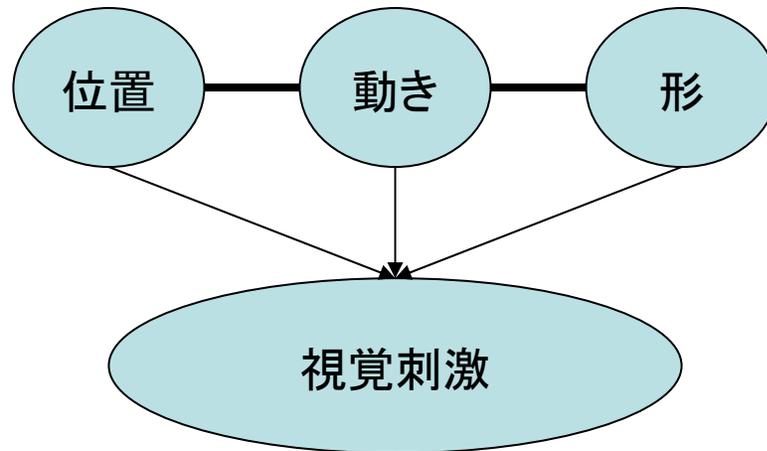
# 座標変換をするネットワーク



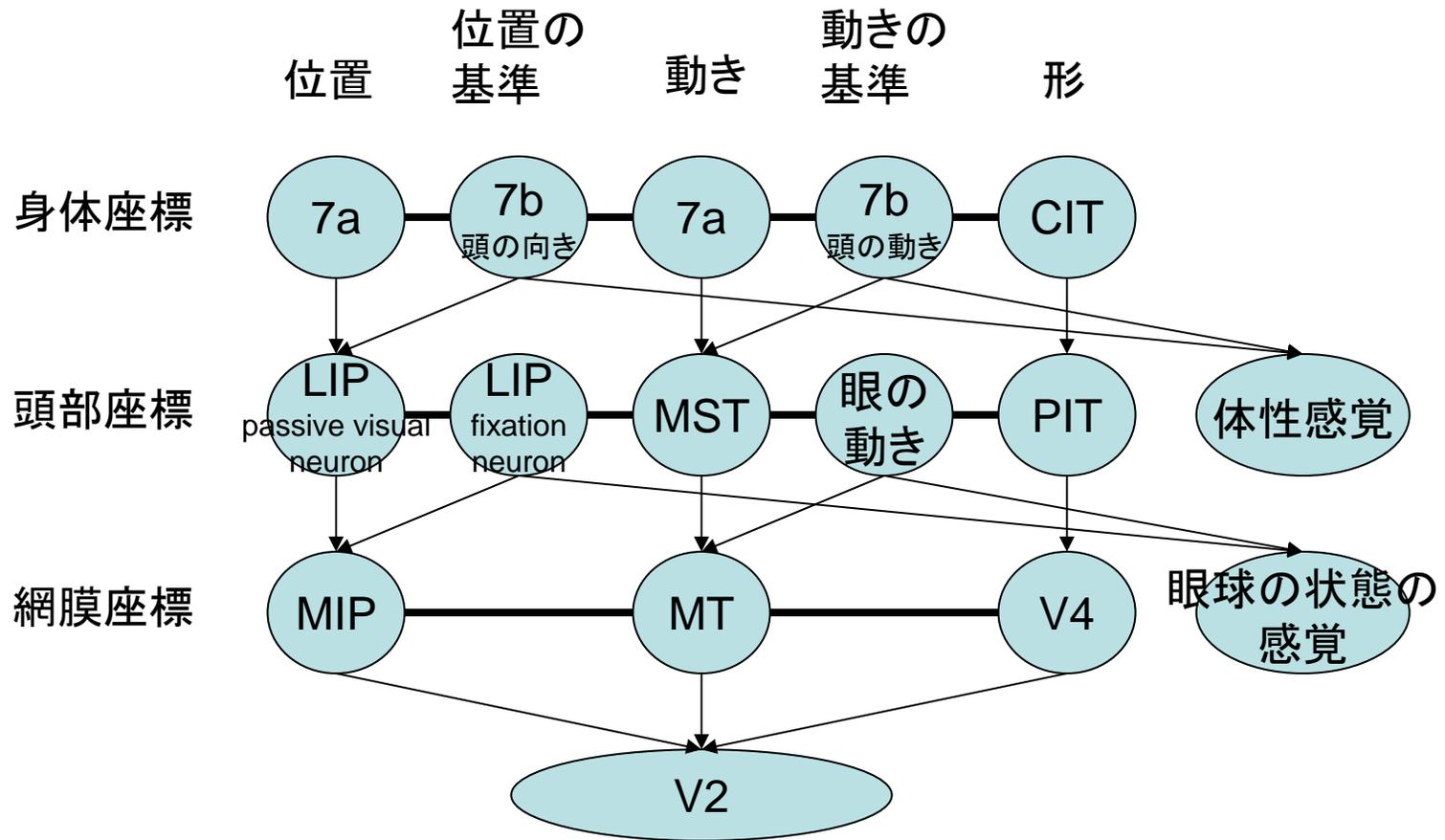
動きに関しても、位置と同様のネットワークがあるだろう。

# 視覚刺激を位置と動きと形に分解するネットワーク

- 物体の位置と動きと形は、お互いに独立である。視覚刺激をICAすれば、この3つの情報に分解されるだろう。



# 以上をまとめた提案モデル



# モデルからの予言

- MSTは頭部の動きに対する相対的な物体の動きを表現する。
- 7a には身体座標における物体の動きを表現するニューロンがある。
- 7b には身体座標における頭部の向き、頭部の動きを表現するニューロンがある。
- LIP fixation neuron から 7a への結合は弱い。
- 他にもいろいろ。

# 自己組織化の機構の生物学的利点

- 領野の役割分担が遺伝的に完全に固定されていないので、ある領野が損傷したときに、自己組織化によって、近傍の領野が機能を補える。
- 環境の性質に応じて割り当てる領野の面積を調整できる。(例えば動きの認識が重要となる環境で育てば、それに多くの面積が割り当てられるはず。)

# この神経回路の計算論的利点

- 物体の位置の認識が、ベイジアンネットで表現された生成モデルを用いて行われる。
  - 体性感覚、視覚刺激、筋肉や眼球への運動指令の全ての情報を総合して、身体の状態と外界の物体の状態を同時にベイズ推定できる。  
→ 非常にロバストな認識機構。
- 自己組織化により認識モデルが教師なしで常時キャリブレーションされるので、体の成長や筋力の変化があっても追隨できる。

# 現時点で分からないこと

- POは網膜座標？頭部座標？身体座標？
- FEFが7a,7bと独立である意味は？
- STP, VIP, SFT, DP, VOT, MDP, PO, PIP, V3, VP の役割は？
- 頭の向きを表現するのは本当に 7b ？それとも 7a ？

# BESOMモデルとの関係

- BESOMモデル[一杉2006]は、ベイジアンネットとSOMとICAを用いて、外界のモデルの自己組織化と外界の状態のベイズ推定を行う大脳皮質の神経回路モデル。
- ICAによりハイパーコラムどうしが独立な変数を表現するよう自己組織化される。
- 領野全体を1つの変数とみなしてもよい。同一階層に属する領野どうしは独立でなければならない。  
→ 提案した仮説と一致。

# 結論

- 同一階層内の領野どうしの結合がICAを行っているとは仮定することで、座標変換に関係する視覚系領野の機能を自己組織化する機構について、説明することができた。
- この機構は筆者が提案する BESOM モデルの機能と一致しており、**BESOM モデルの妥当性を強く支持する証拠**であると考えられる。
- 同様の考察によって大脳皮質の他の領野についても理解が進み、計算機上での脳の機能の再現が可能になると思われる。

# 今後

- 計算機シミュレーション。
- さらなる文献調査。
- 7b は運動前野の下位領野であり、興味深い領野である。頭部に限らず、手など体の一部分の身体に対する相対位置と動きを表現しているかもしれない。そのような表現の計算論的利点や生理学的根拠については別途論じることにする。