

情報工学序説

第12回 生体情報システム：脳とコンピュータ

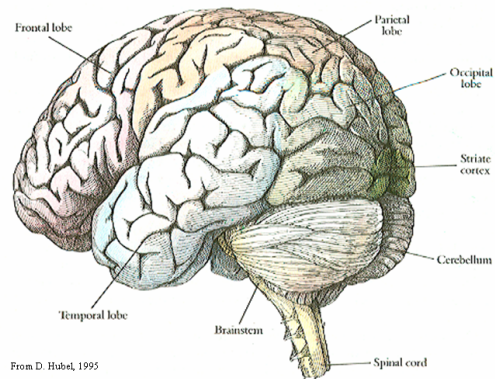
伊達 章

2005年6月27日

講義のテーマ

- 脳は情報処理をする素晴らしい装置！
- コンピュータと脳の比較
特に情報表現と計算の観点から
- 神経回路モデルのダイナミクス
- 自己組織化とは

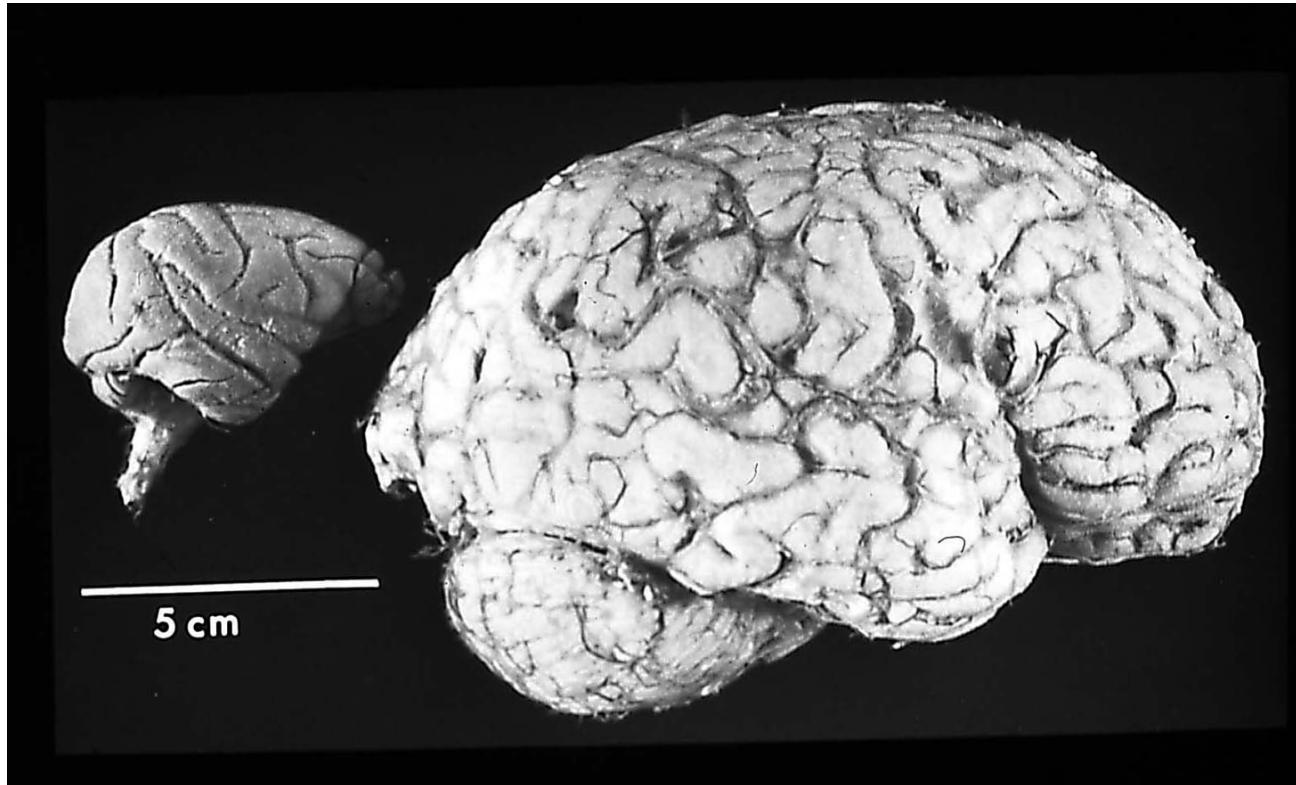
脳とコンピュータ



- コンピュータ：仕組みがよくわかっている
- 脳：仕組みがよくわかっていない。例：記憶，思考，...

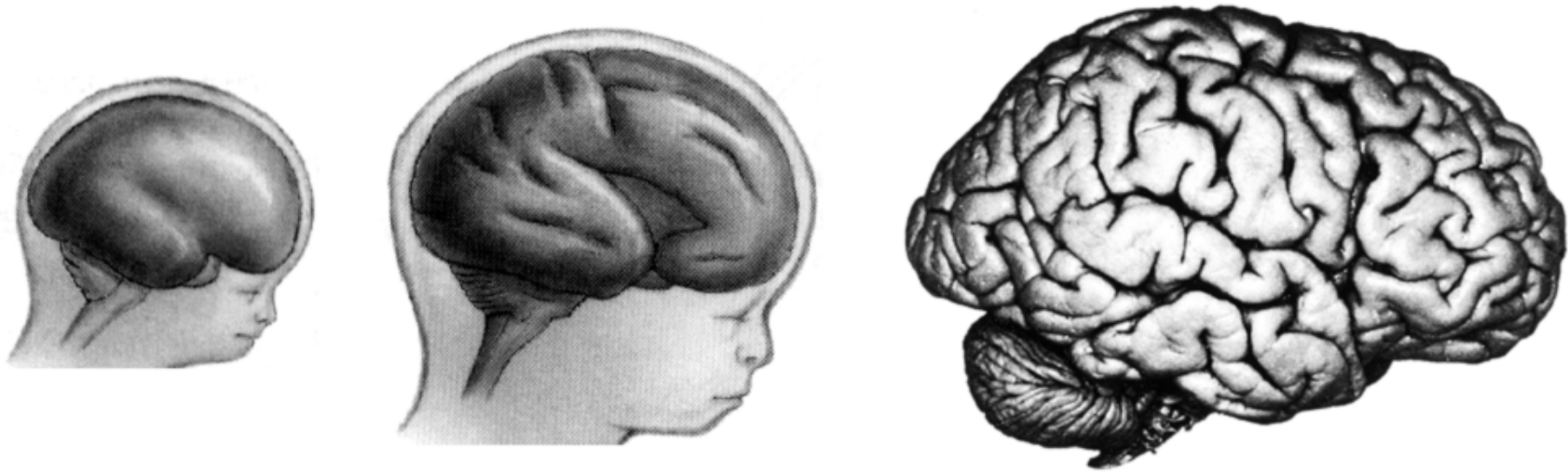
脳を動かしている原理を工学の力で実現できれば
もっとすばらしい情報処理機械が作れる

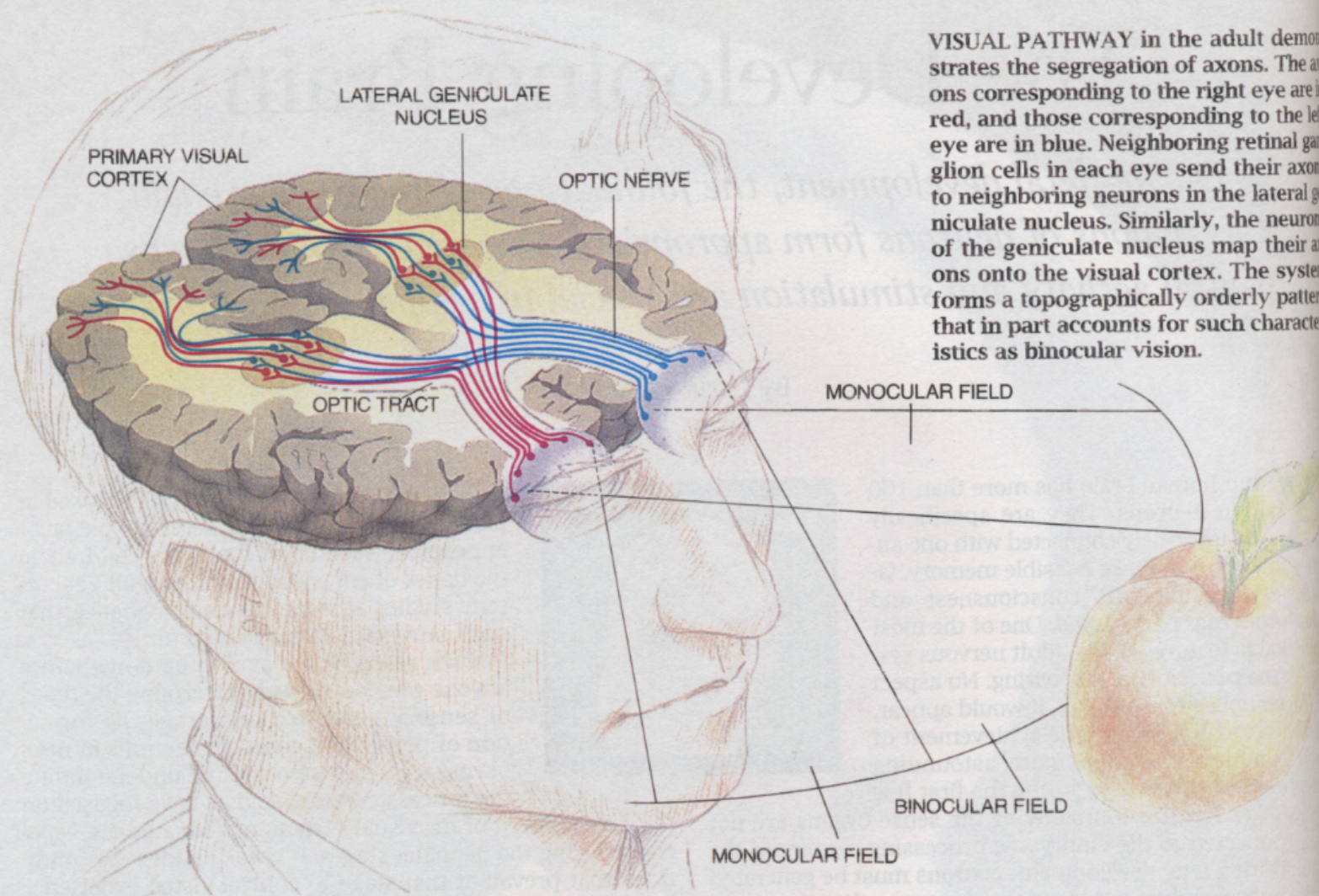
脳



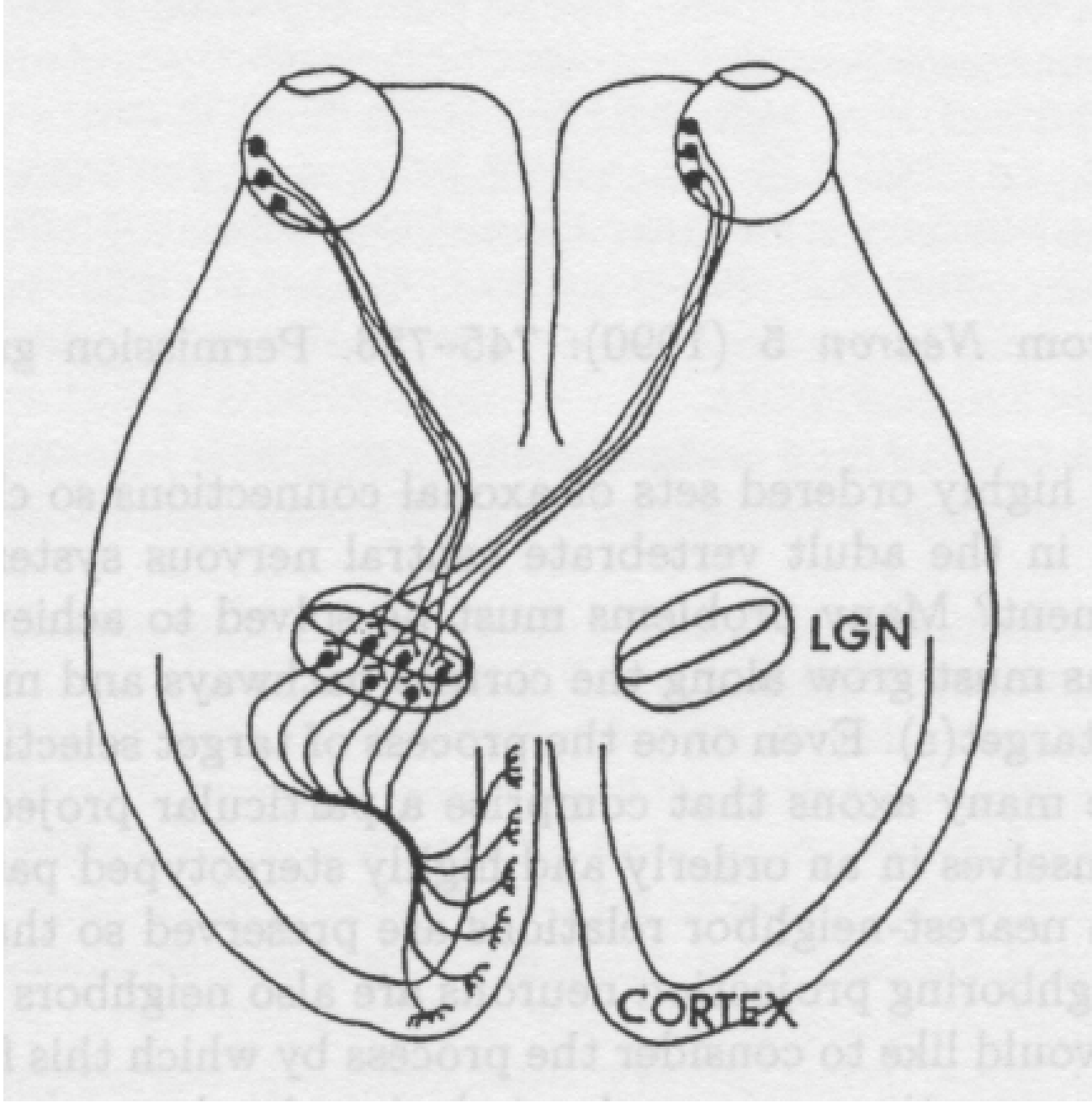
しわくちゃ, 厚さは 2-3mm, 広げると新聞紙1枚

腦

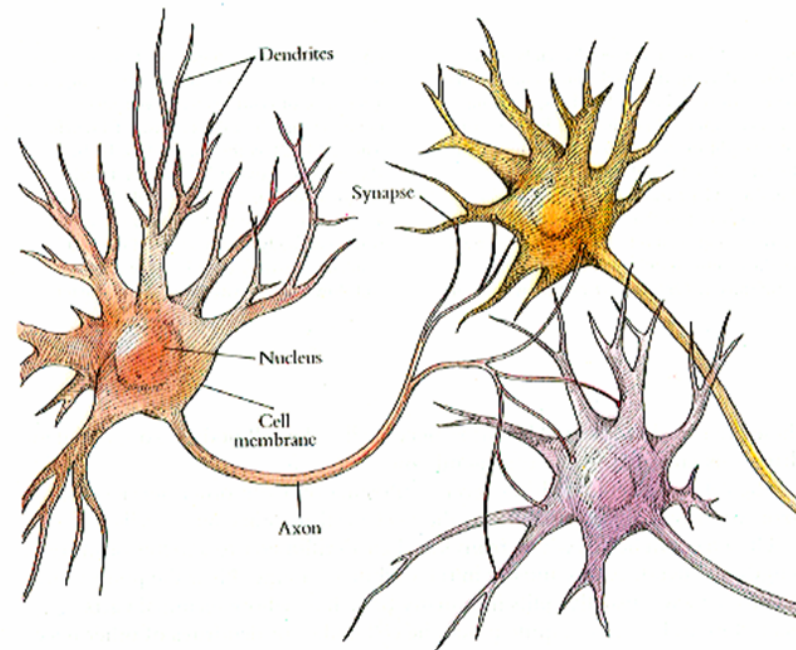




VISUAL PATHWAY in the adult demonstrates the segregation of axons. The axons corresponding to the right eye are in red, and those corresponding to the left eye are in blue. Neighboring retinal ganglion cells in each eye send their axons to neighboring neurons in the lateral geniculate nucleus. Similarly, the neurons of the geniculate nucleus map their axons onto the visual cortex. The system forms a topographically orderly pattern that in part accounts for such characteristics as binocular vision.

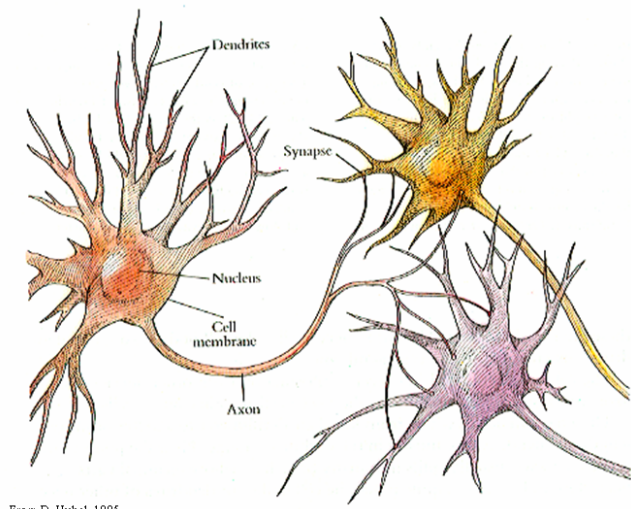


ニューロン，神経細胞

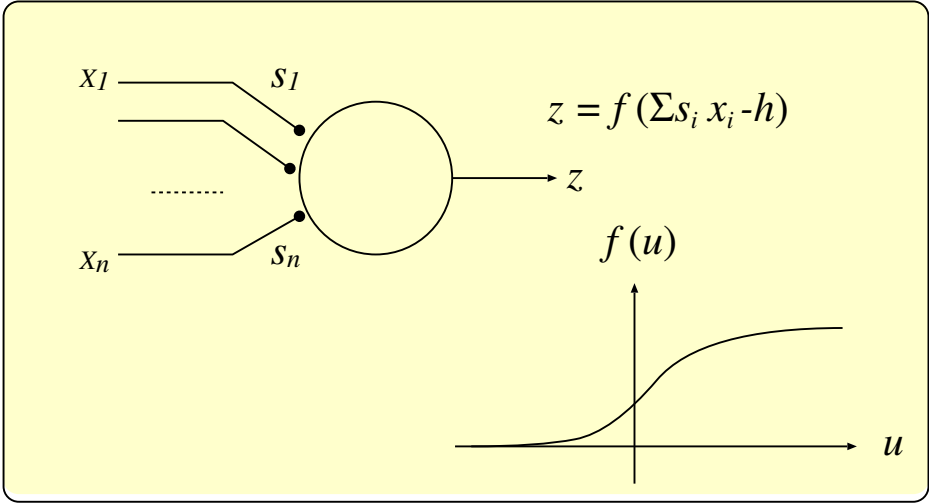


From D. Hubel, 1995

ニューロンとそのモデル

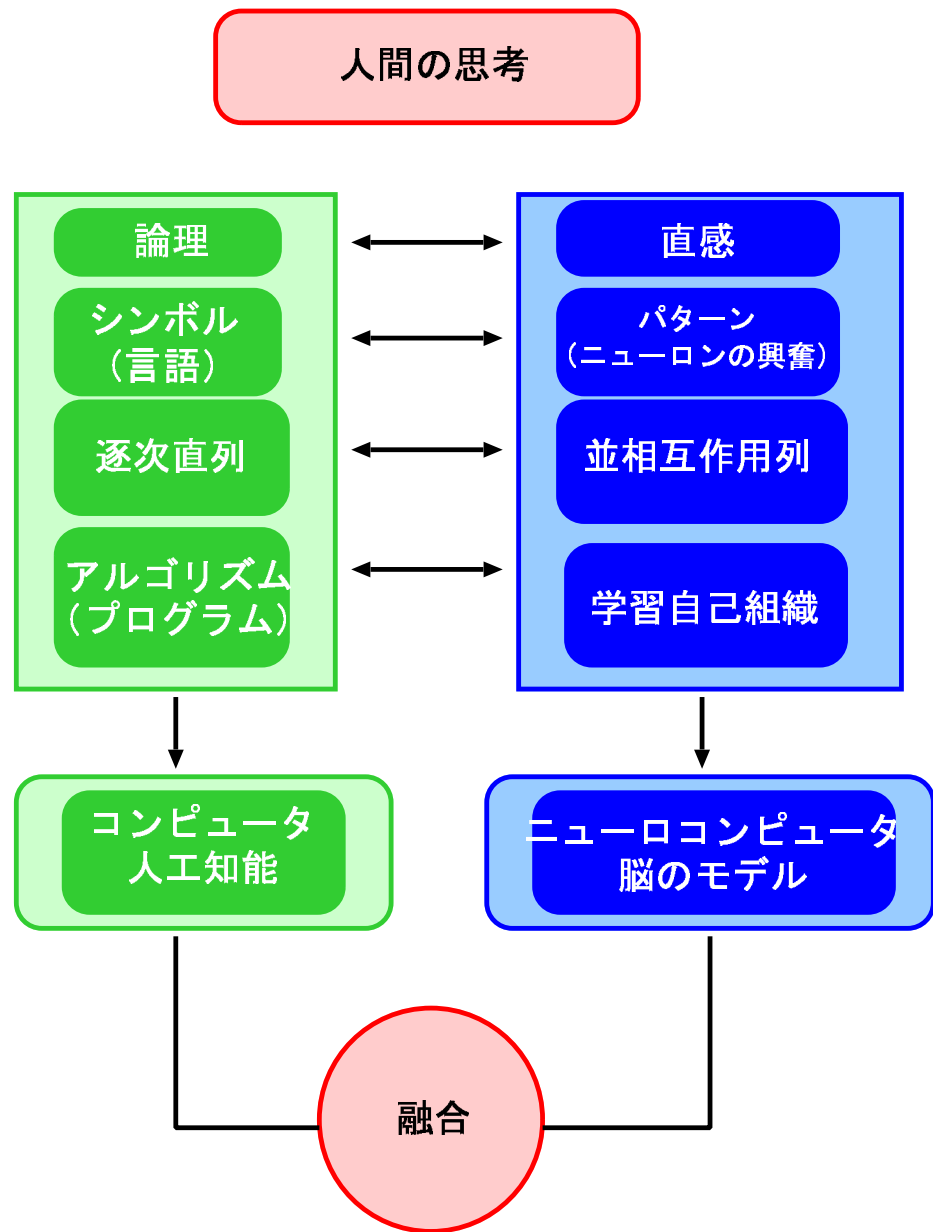


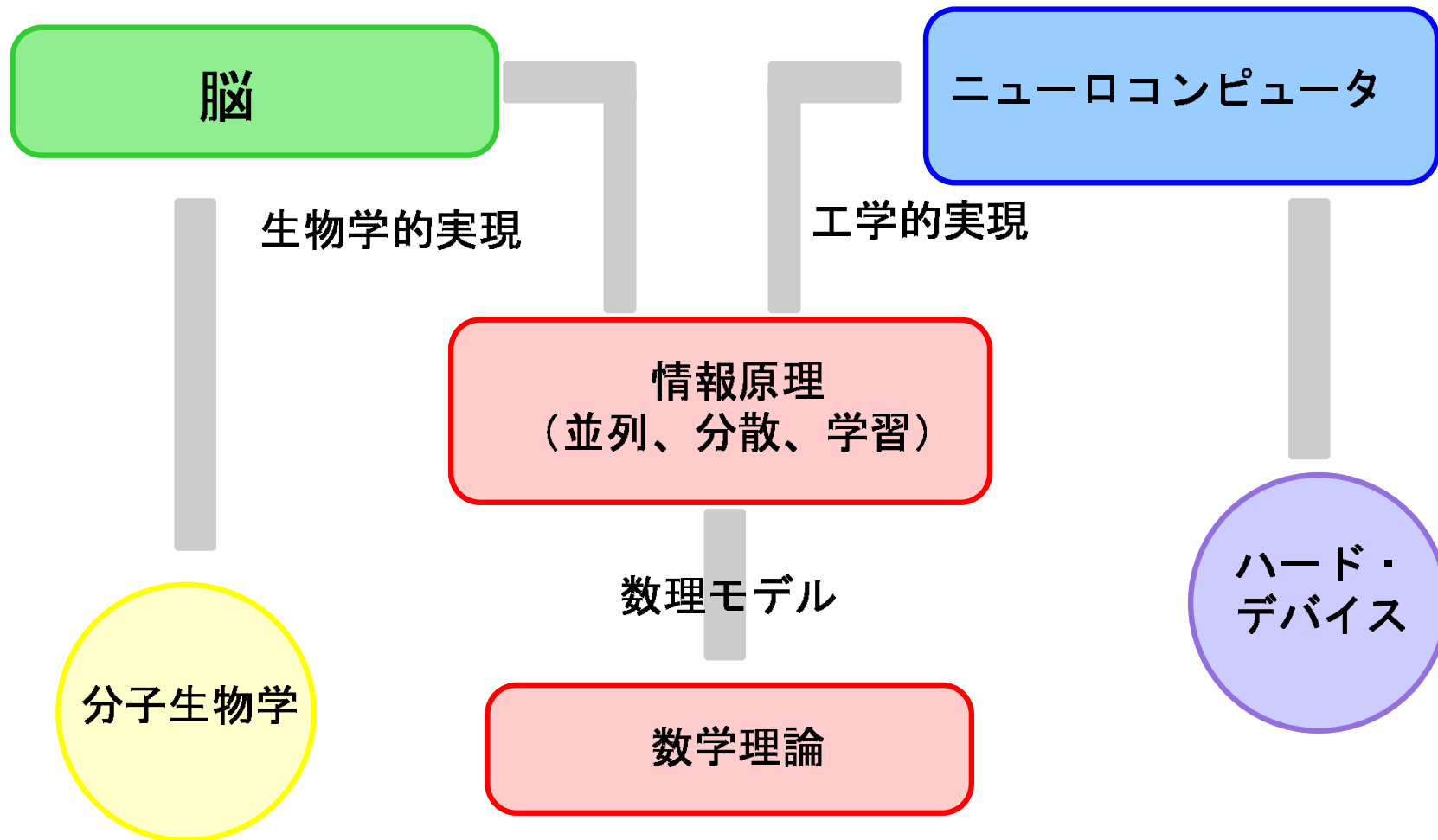
From D. Hubel, 1995



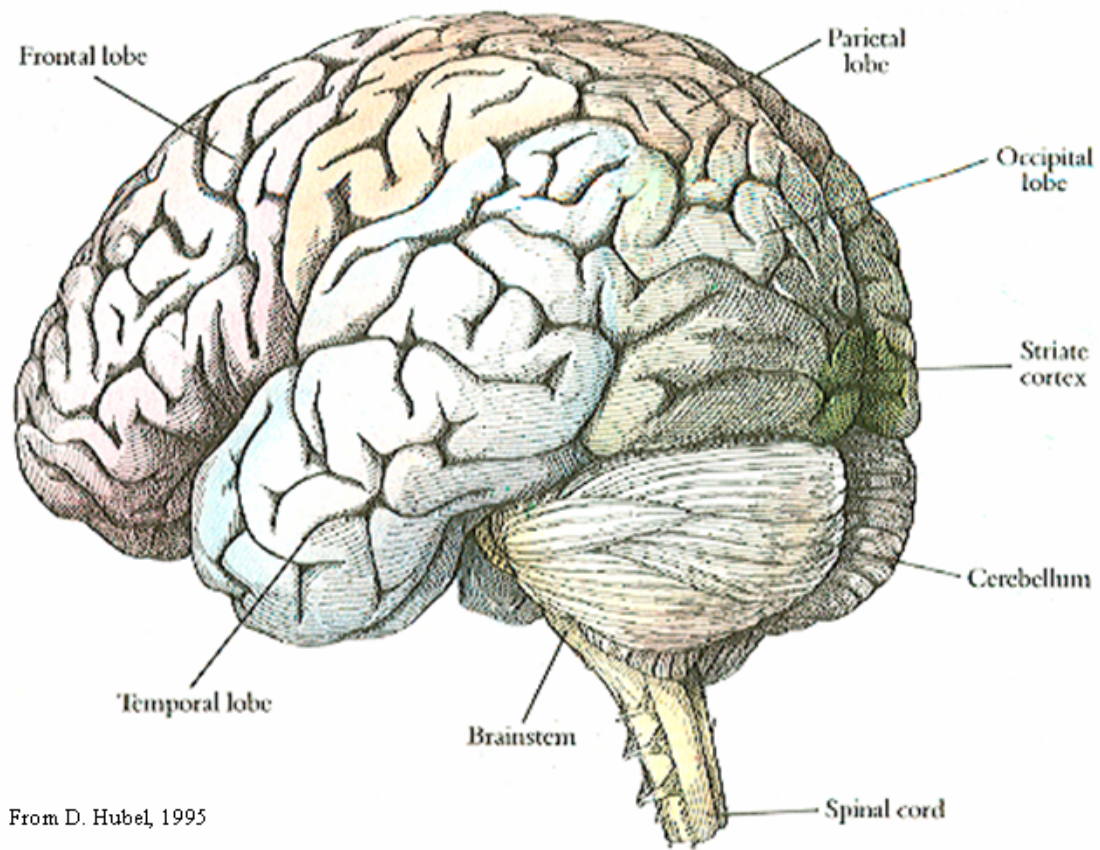
コンピュータと脳の比較

	コンピュータ	脳
基本素子	半導体	ニューロン
素子数	$10^5 \sim 10^7$	$10^{10} \sim 10^{11}$
動作速度 (秒)	10^{-9}	10^{-3}
信号	電気パルス	活動電位
記憶容量	10^{10}	$10^{13} \sim 10^{20}$
一素子あたりの発熱量 (erg)	4×10^{-6}	3×10^{-3}
故障率	5×10^{-22}	5×10^{-21}
情報表現	デジタル・集中	アナログ・分散
得意な情報処理	高速、正確な数値計算	パターン認識、総合的判断
処理形式	直列処理	並列処理
記憶方式	線形番地	連想・内容番地
製作様式	設計図+ソフト	遺伝子+自己組織
性能向上	ソフト	学習+機能代償
睡眠	不要	不可欠
耐ノイズ性	弱い	強い
耐故障率	弱い	強い
再現性	完全	不完全



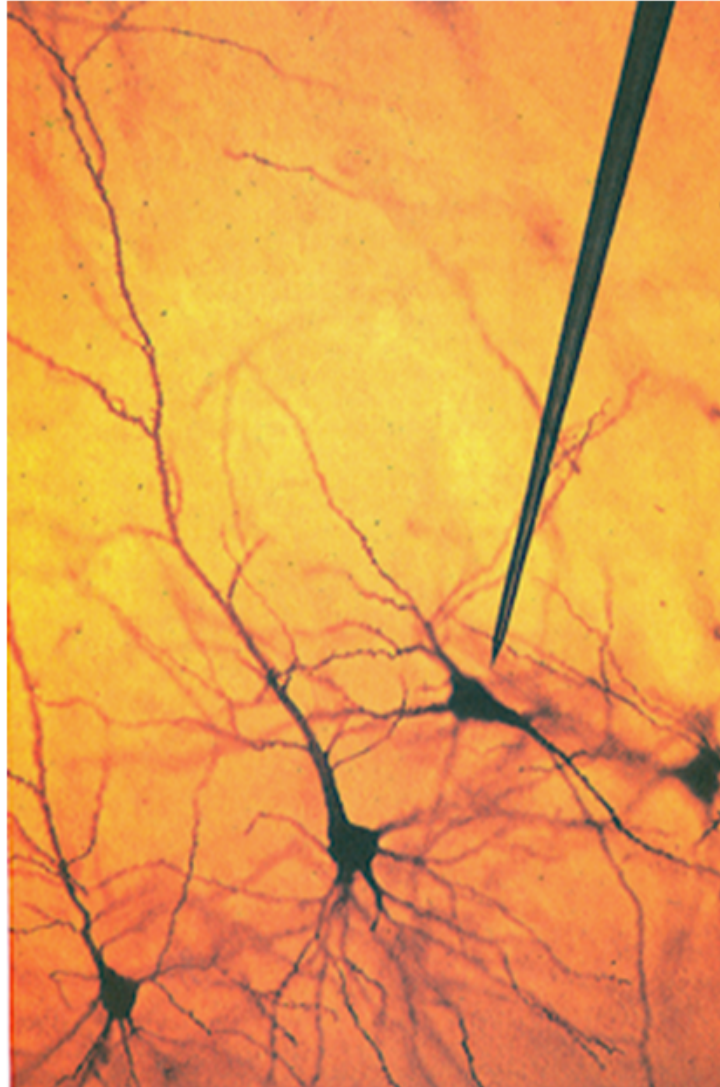


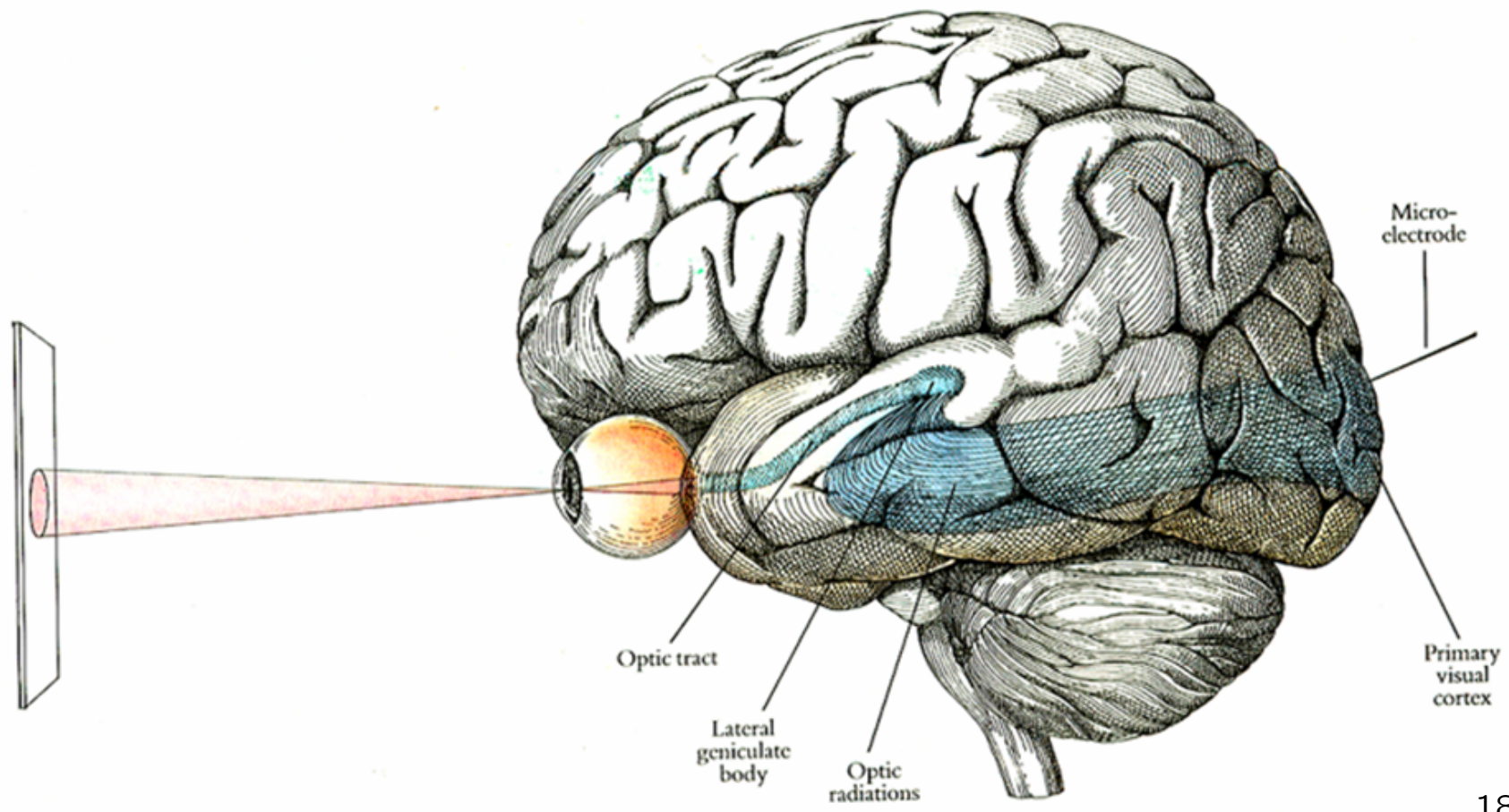
脳：生理学的な性質

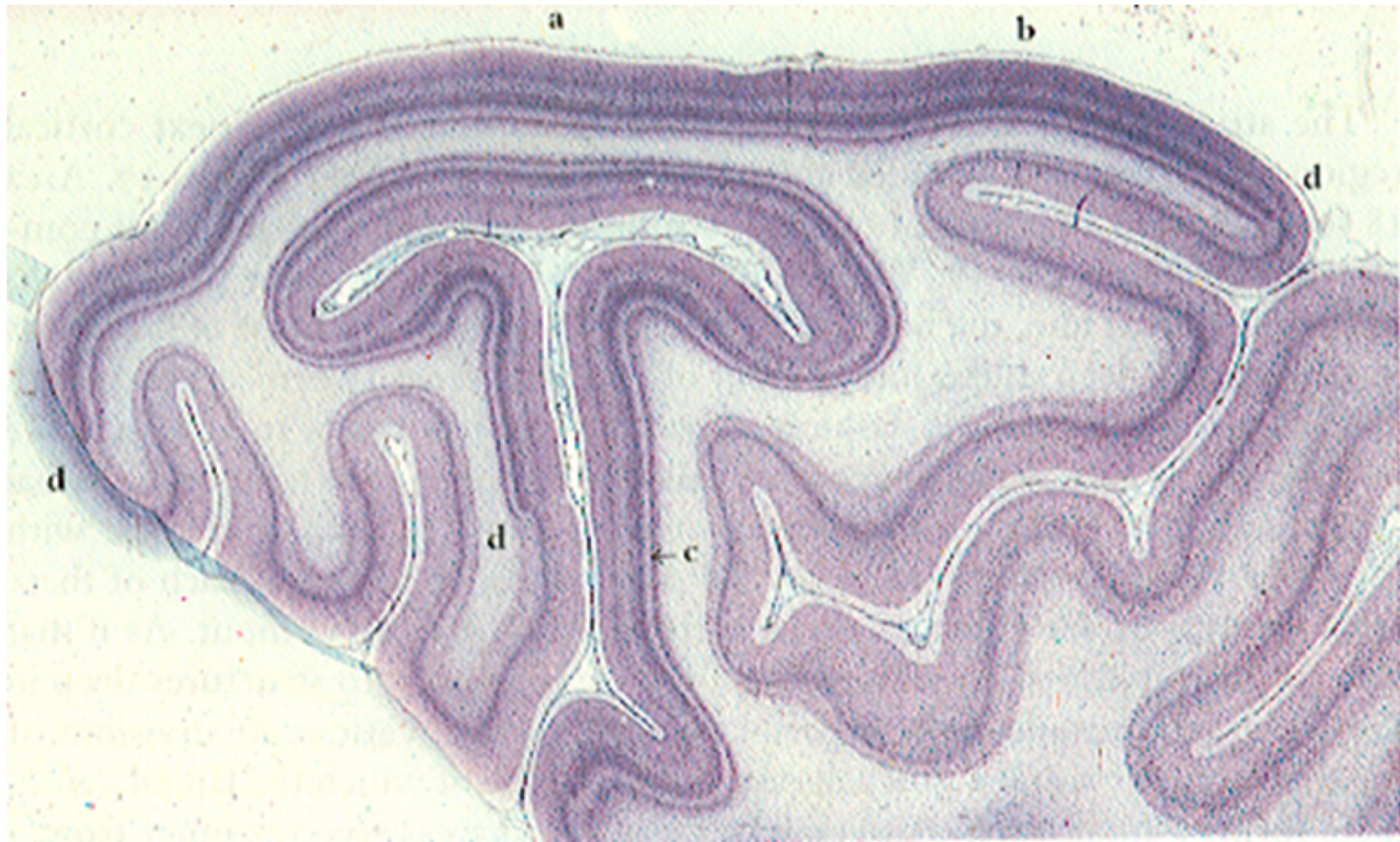


From D. Hubel, 1995

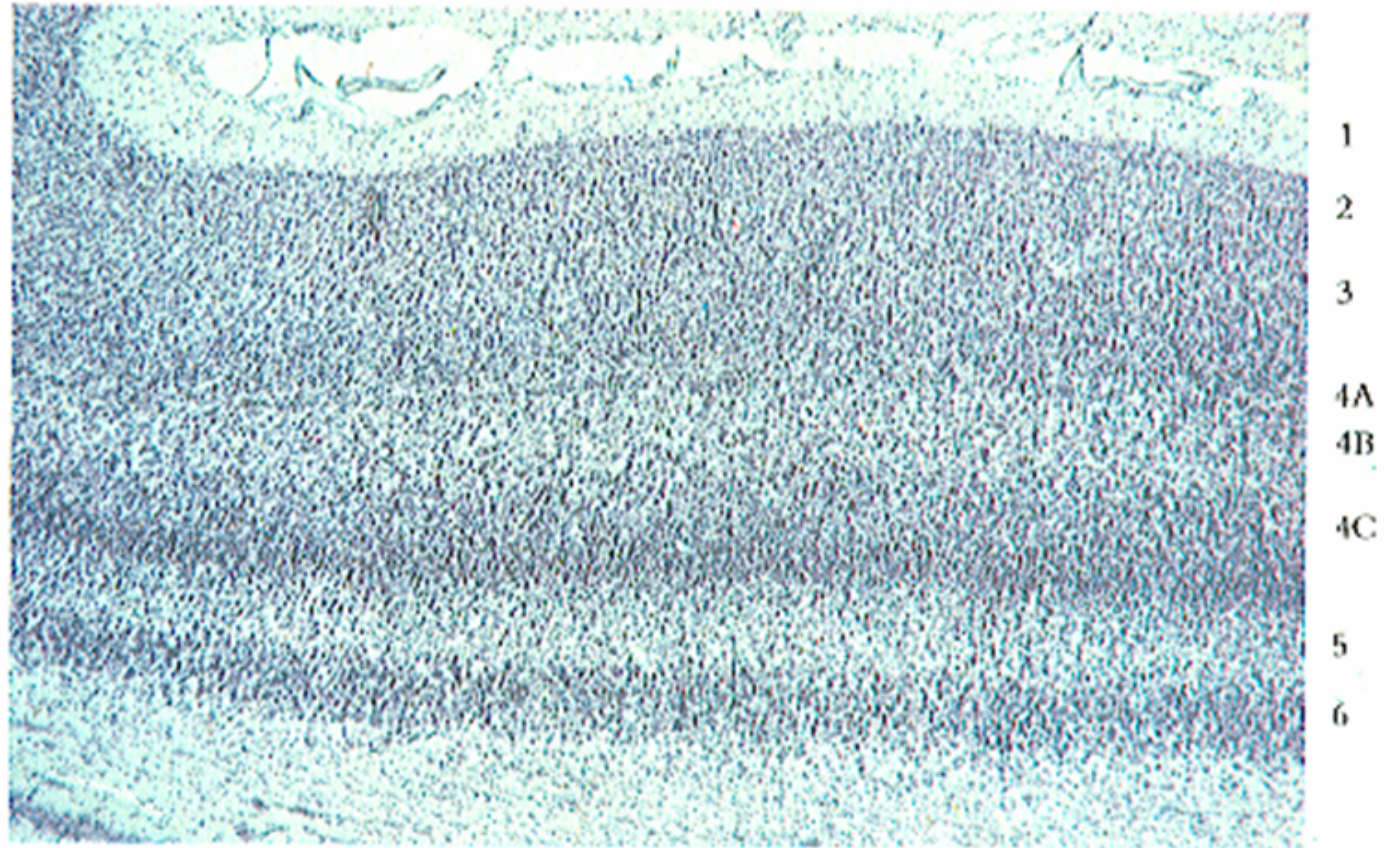
From D. Hubel, 1995





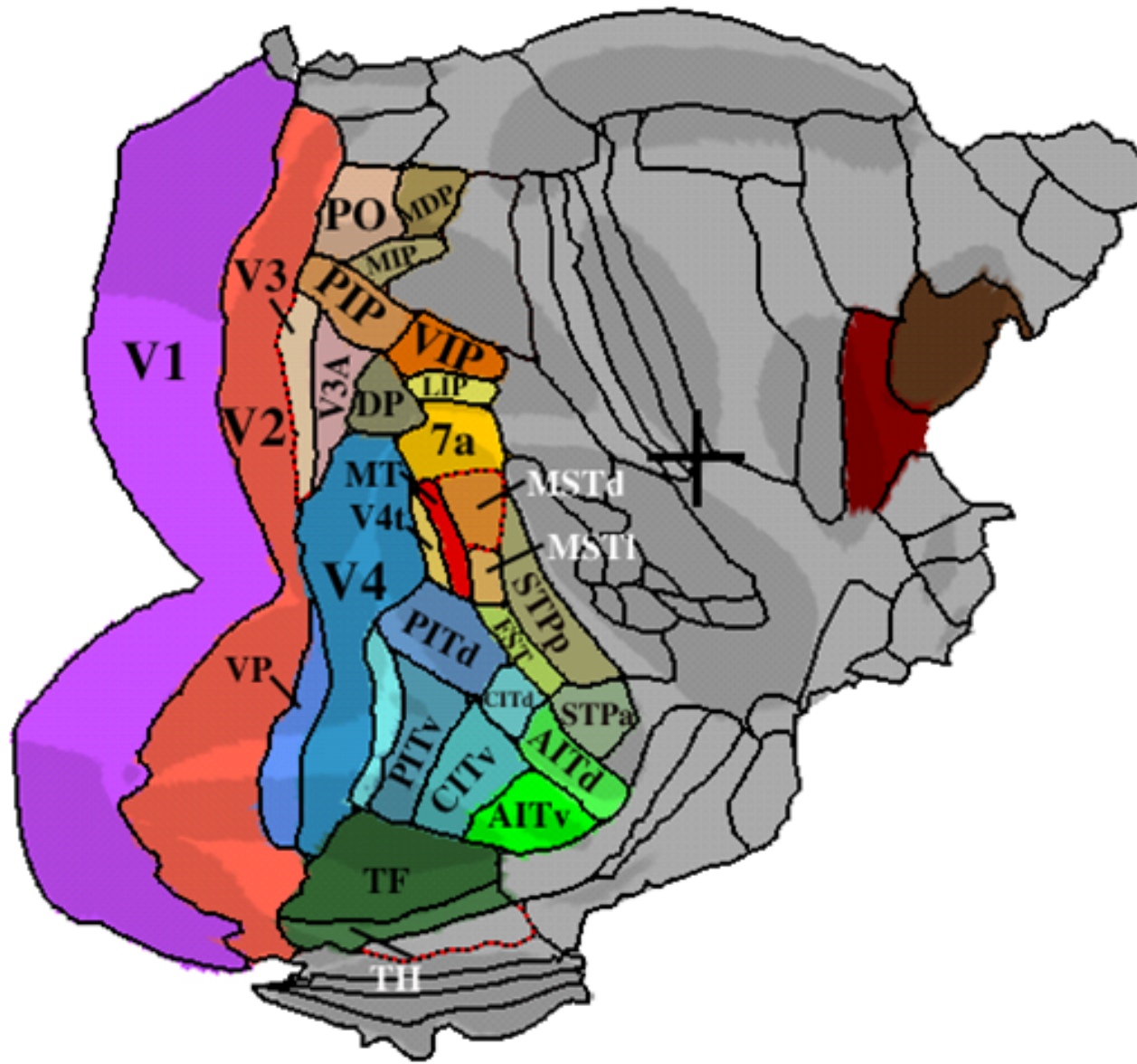


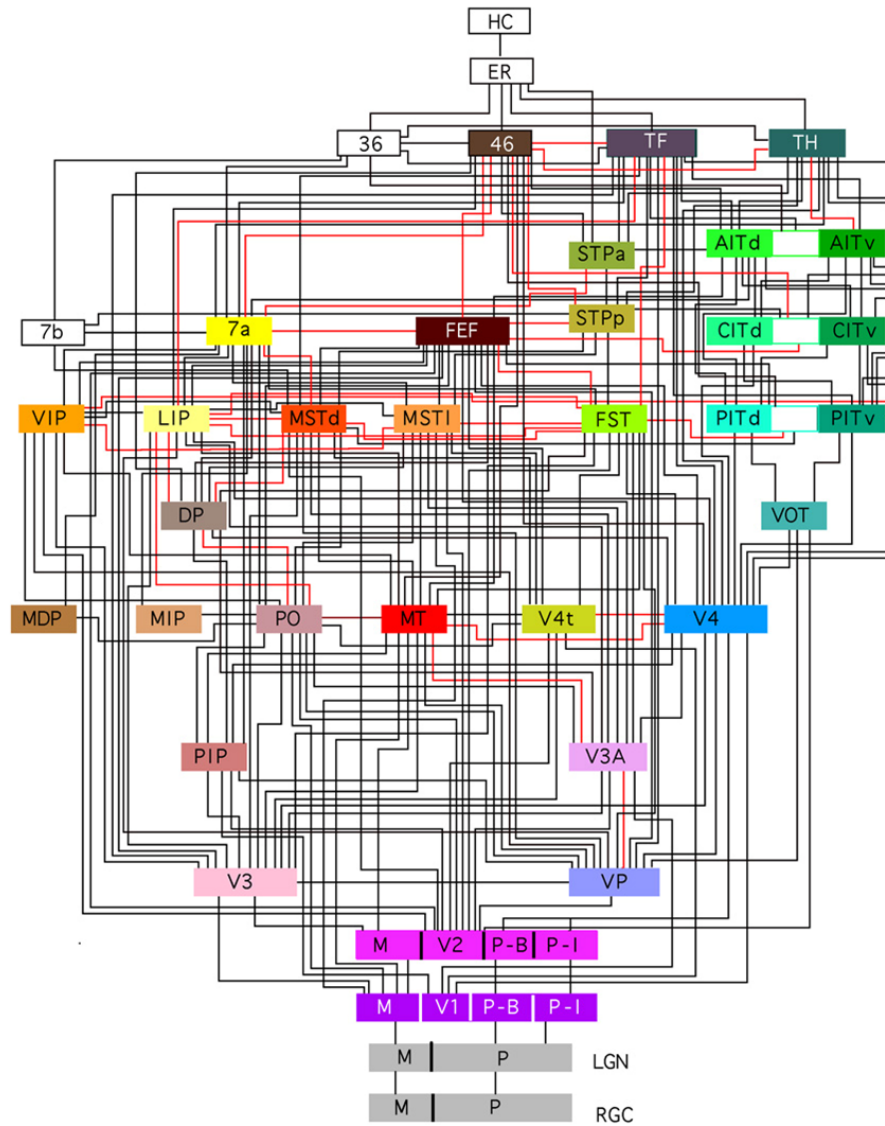
From D. Hubel, 1995

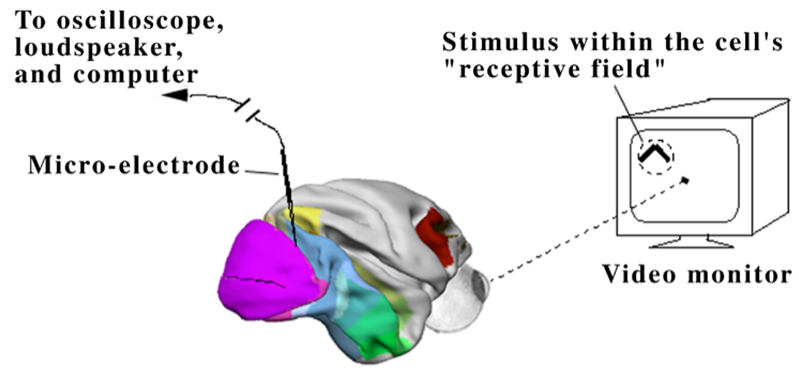


1 mm

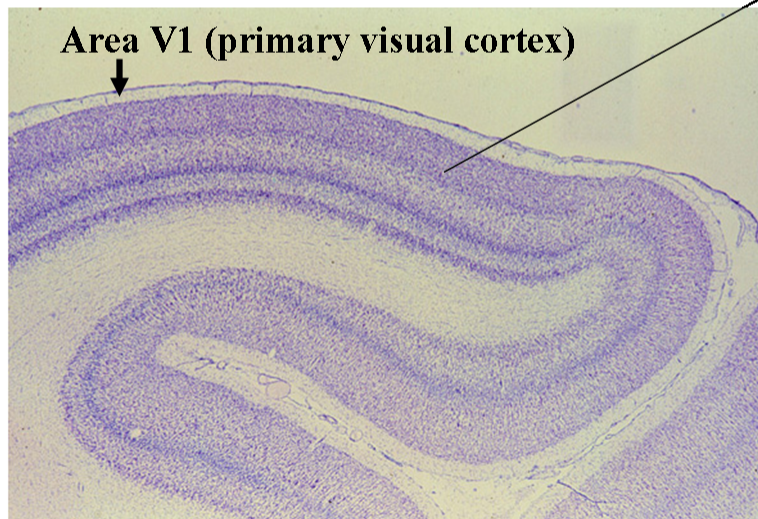
From D. Hubel, 1995



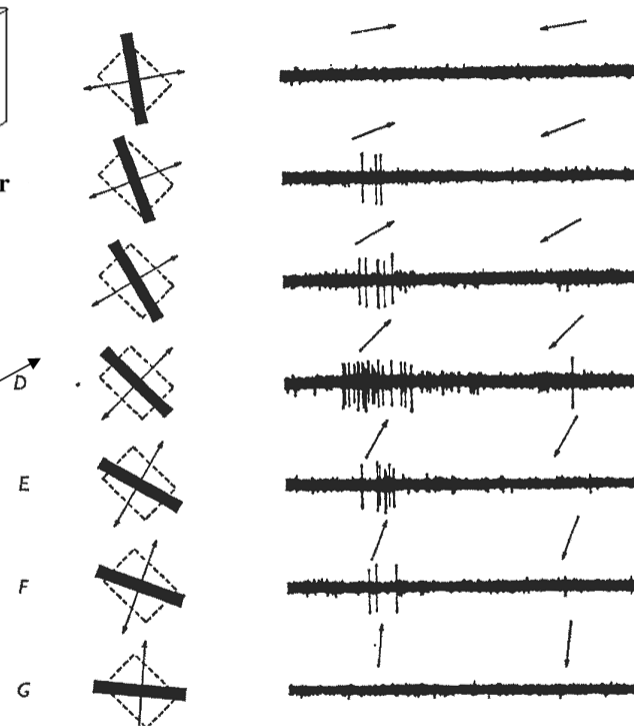




Recording from single nerve cells in the visual cortex

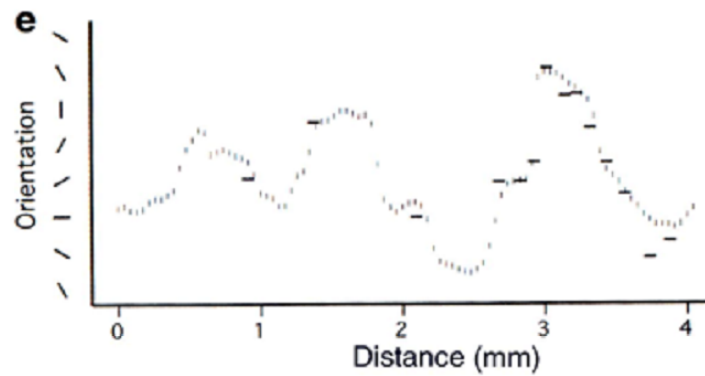
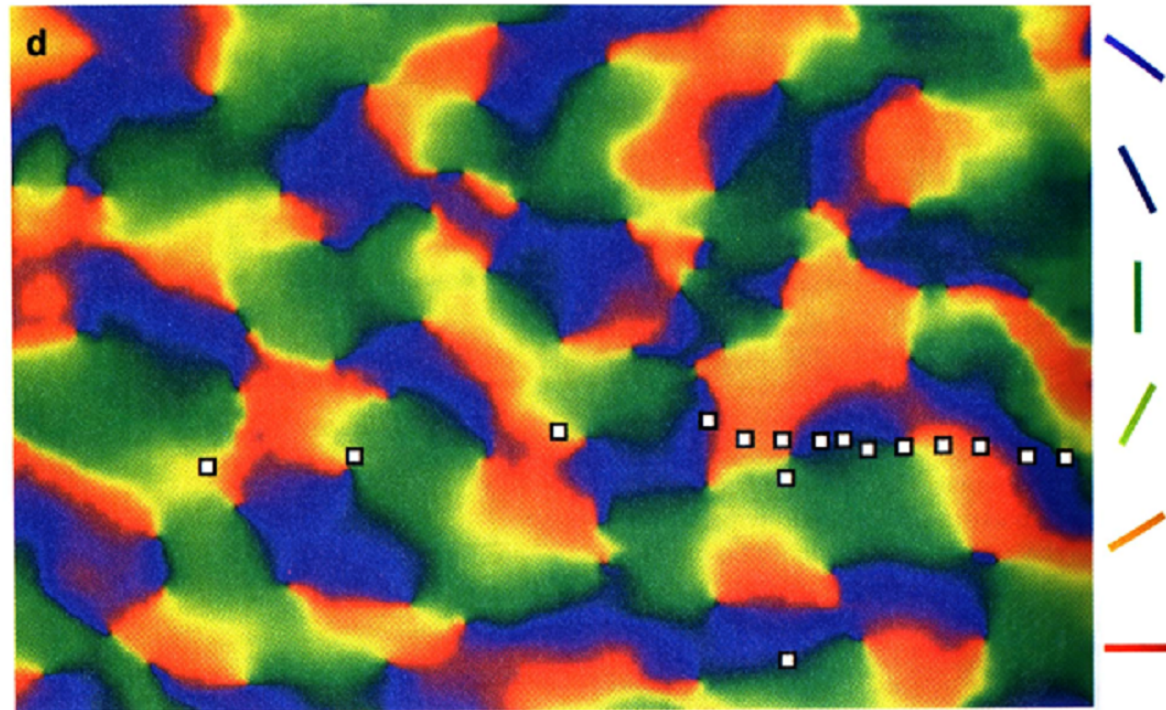


Orientation selectivity in area V1



Hubel and Wiesel, J. Physiol. 1968

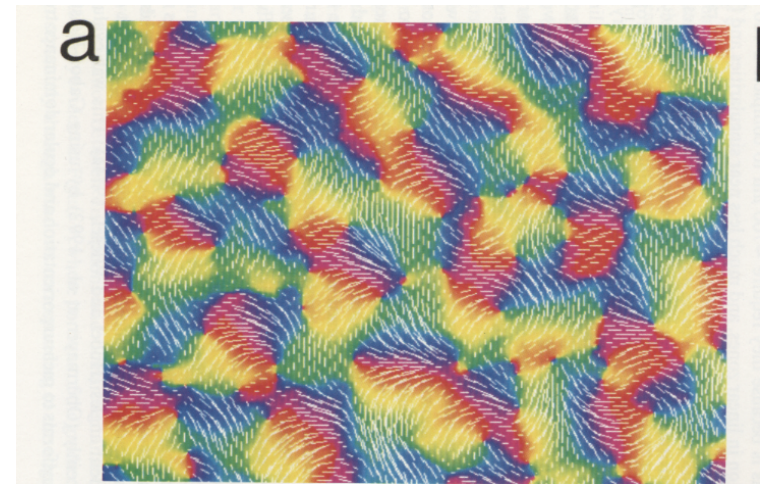
Orderly 2-D map of preferred orientations (optical imaging)



Blasdel et al.

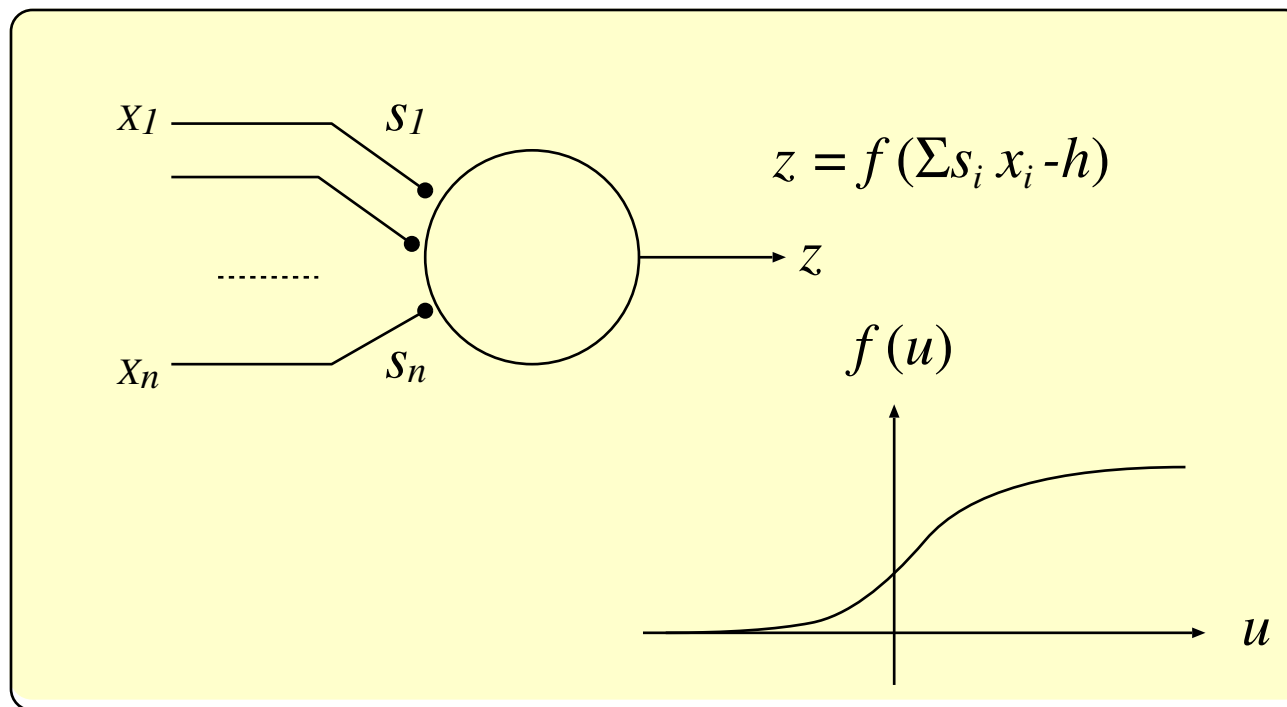
大脳皮質の機能地図（一次視覚野の情報表現）

- 受容野の位置（視野内のどの位置）
- 方向選択性（線分の方向）
- 眼優位性（左右どちらか）

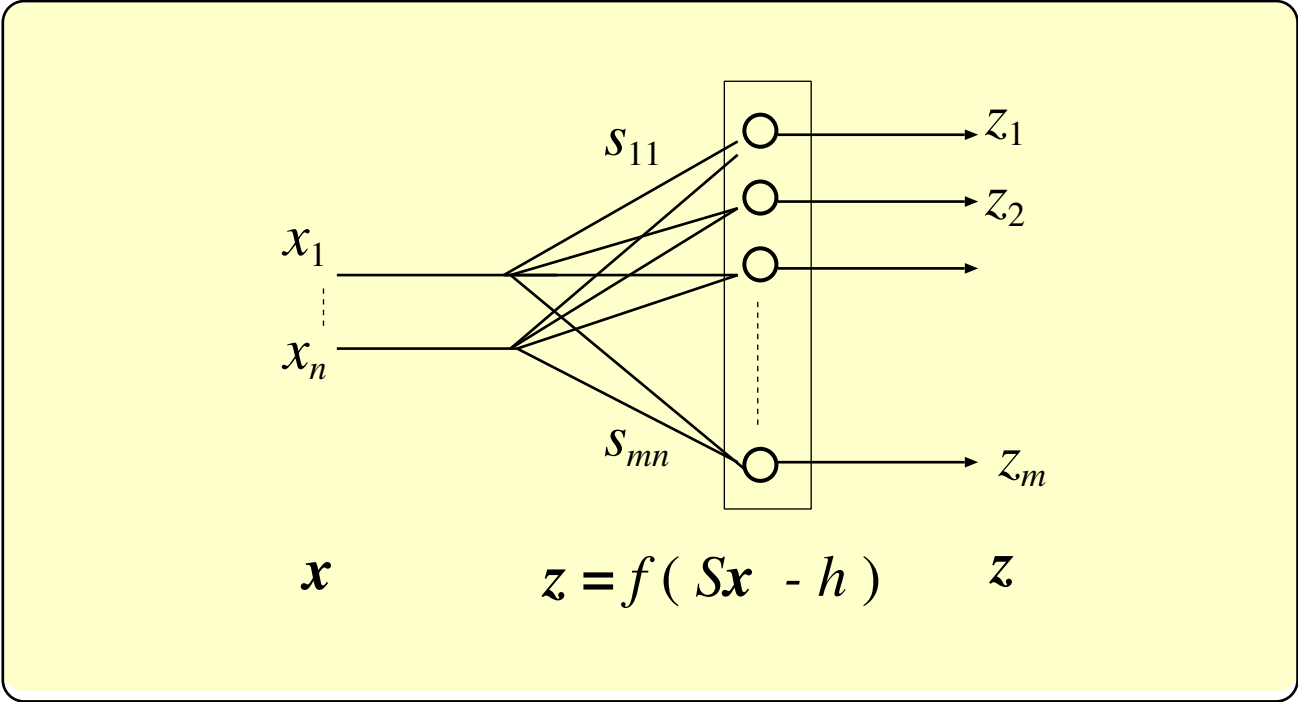


脳：神経回路モデル

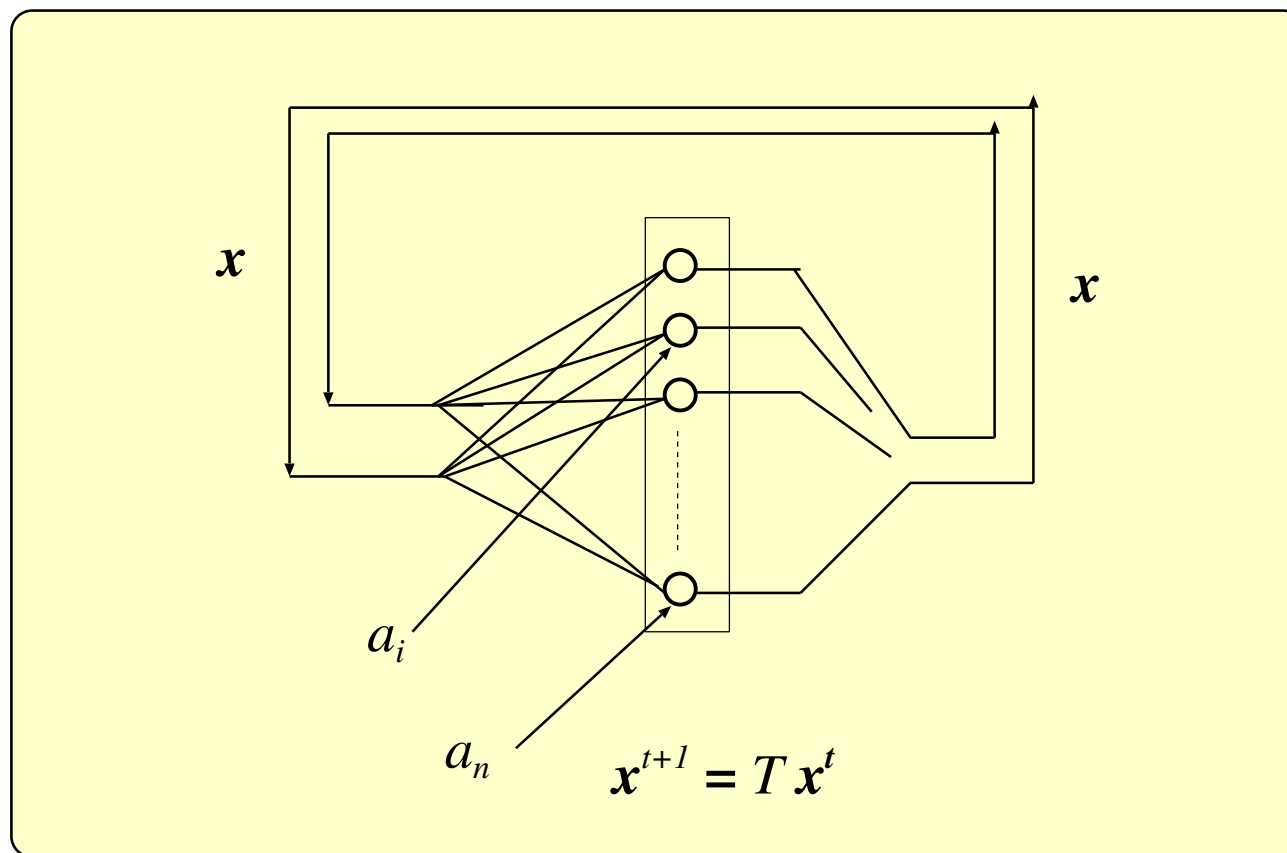
ニューロンとそのモデル：非線型の多数決素子



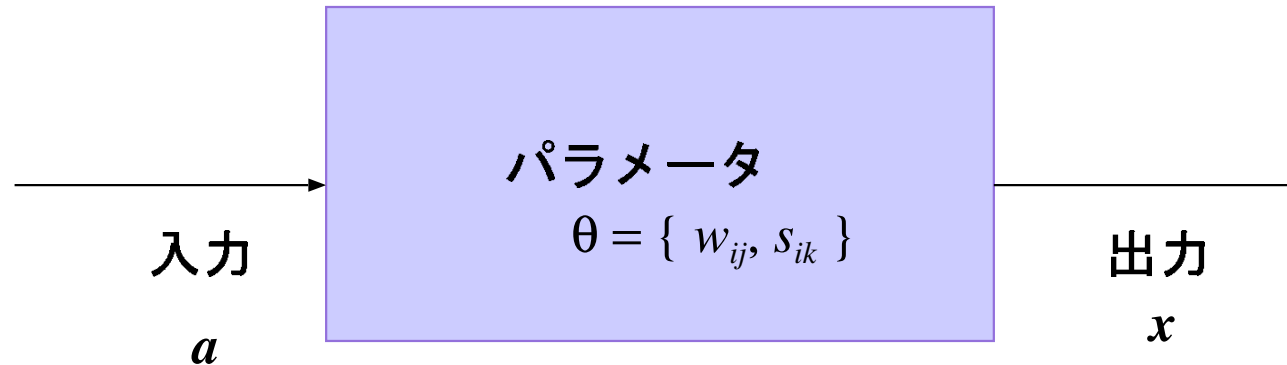
ニューロンとそのモデル，層状回路



相互結合の神経回路モデル



神経回路モデルの見方



速い ニューロン活動 x のダイナミクス

$$x(t+1) = F(x(t), \theta(t))$$

遅い 結合係数 θ のダイナミクス

$$\theta(t+1) = G(\theta(t), a(t), x(t), x(t-1), \dots)$$

入出力の関係はパラメータ θ (結合係数) に依存

大雑把に言えば, ニューロン活動 x 思考, 結合係数 θ 記憶 に対応

代表的な神経回路モデル

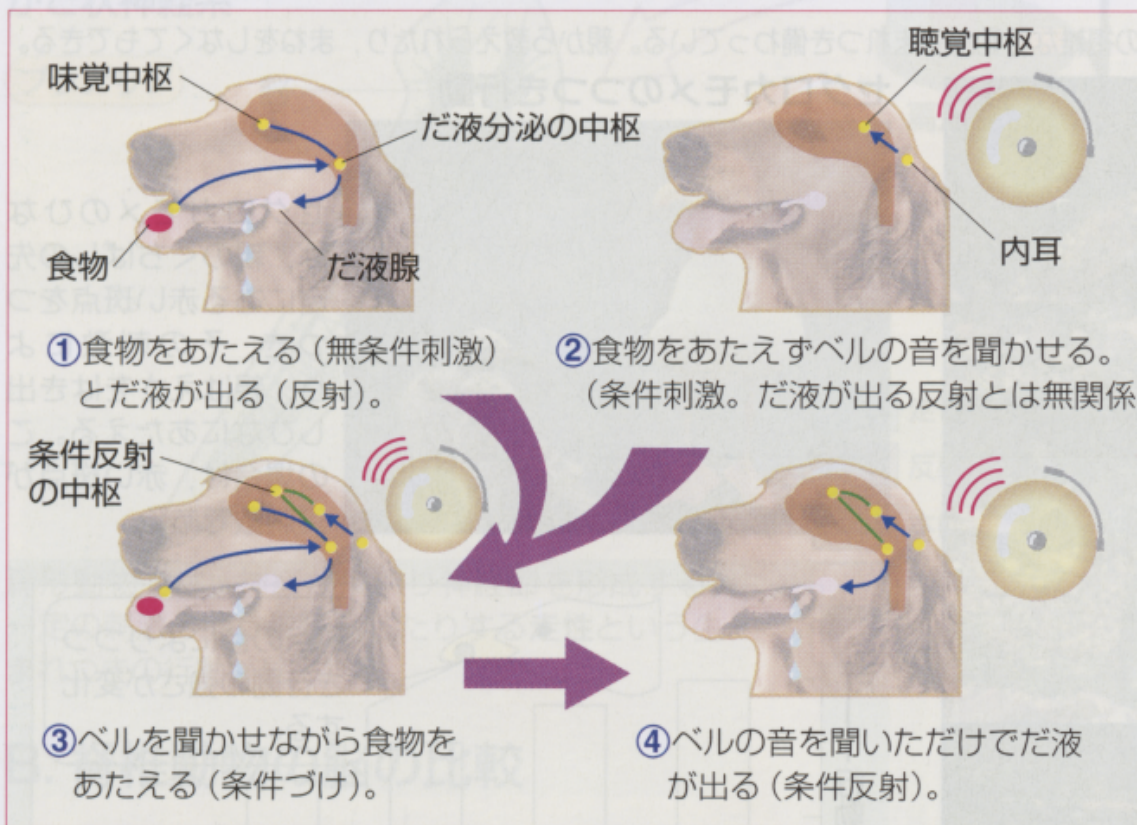
- 自己組織化モデル
- 連想記憶モデル

代表的な学習則

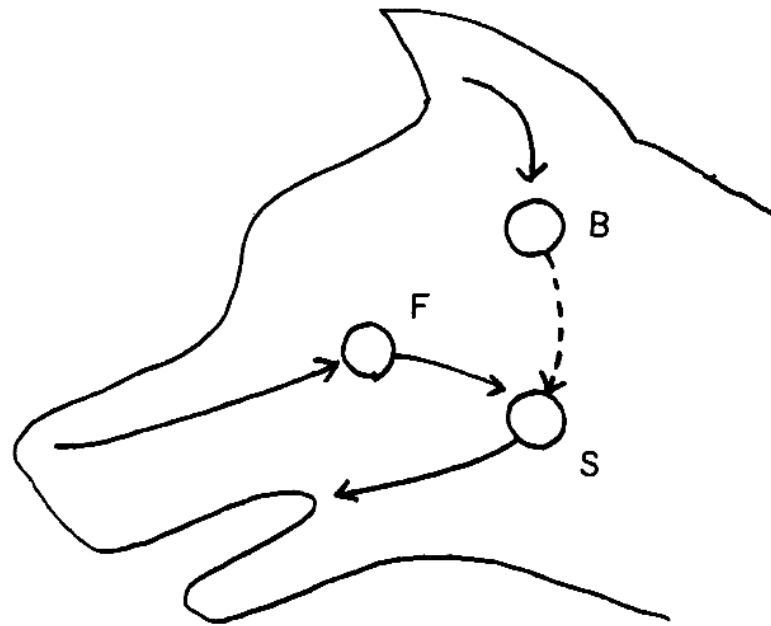
- Hebb 学習

古典的条件付けによる Hebb 学習の説明

C. 条件反射 無条件刺激と条件刺激を結びつける（条件づけ）ことで、条件刺激だけで反射を起こす反応。



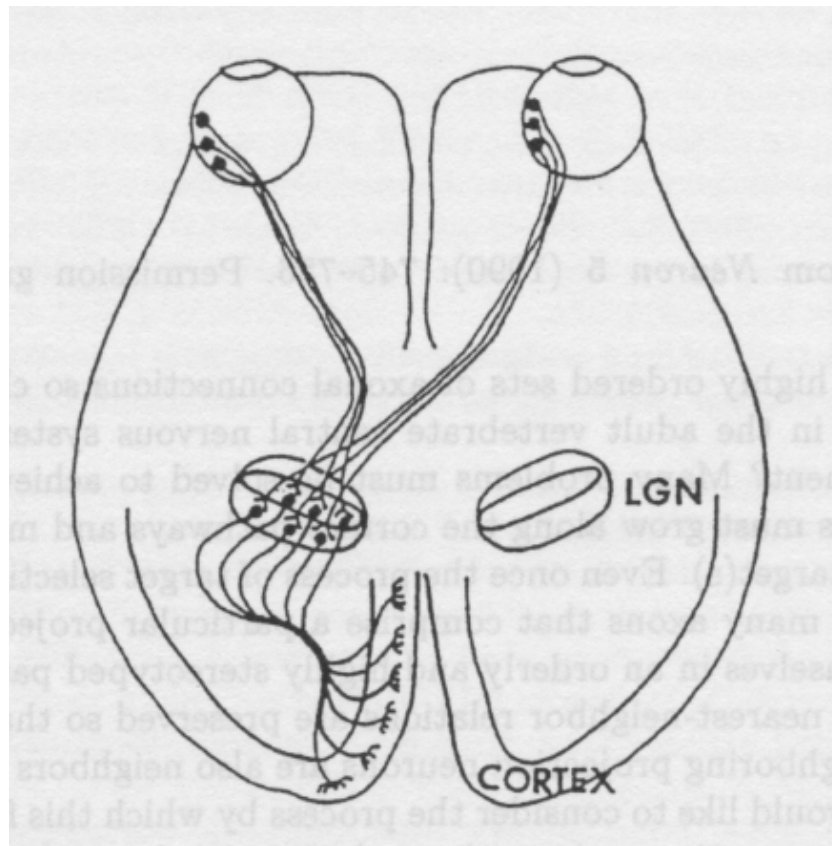
パブロフの犬と Hebb 学習



F 食べ物, **B** ベルの音, **S** 唾液

一度刺激の通り道が脳に形成されると, それにそった結合が強化され, 刺激が通りやすくなる

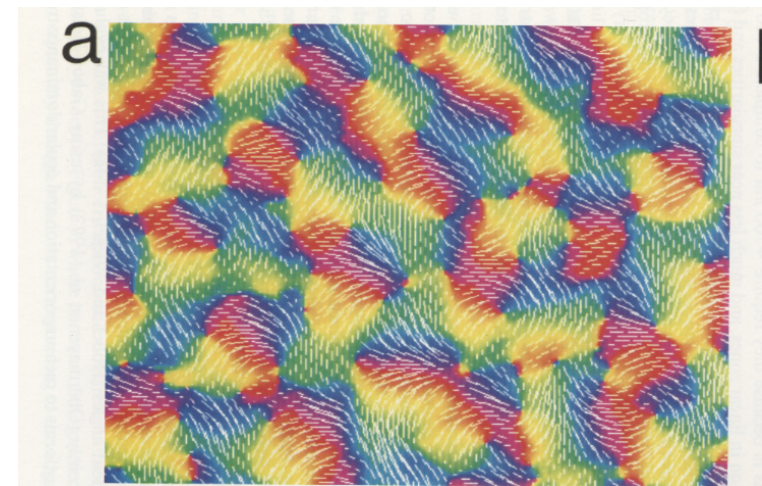
神経系の自己組織化：トポグラフィックマッピング



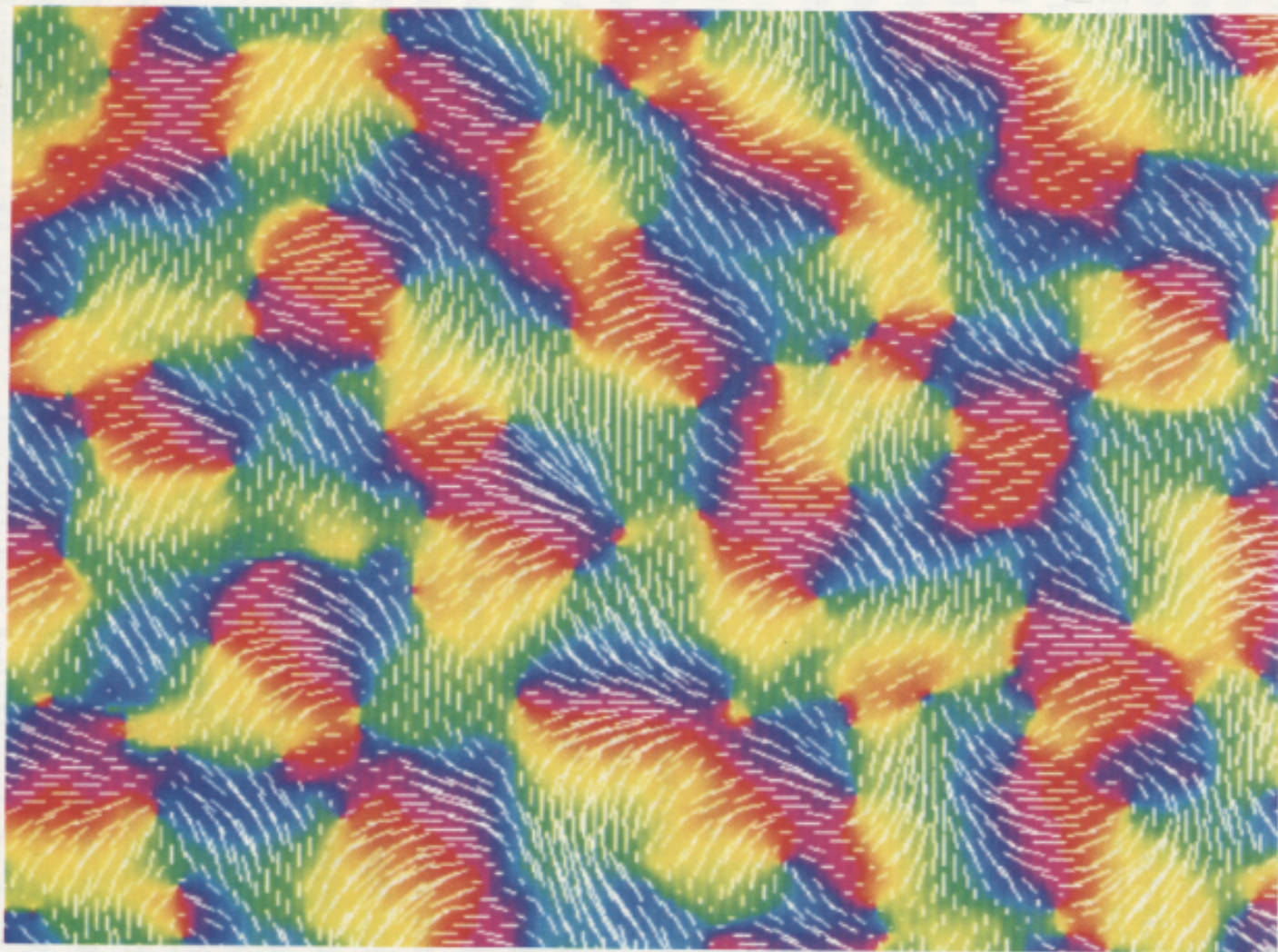
自己組織化のコンピュータシミュレーション

大脳皮質の機能地図（一次視覚野の情報表現）

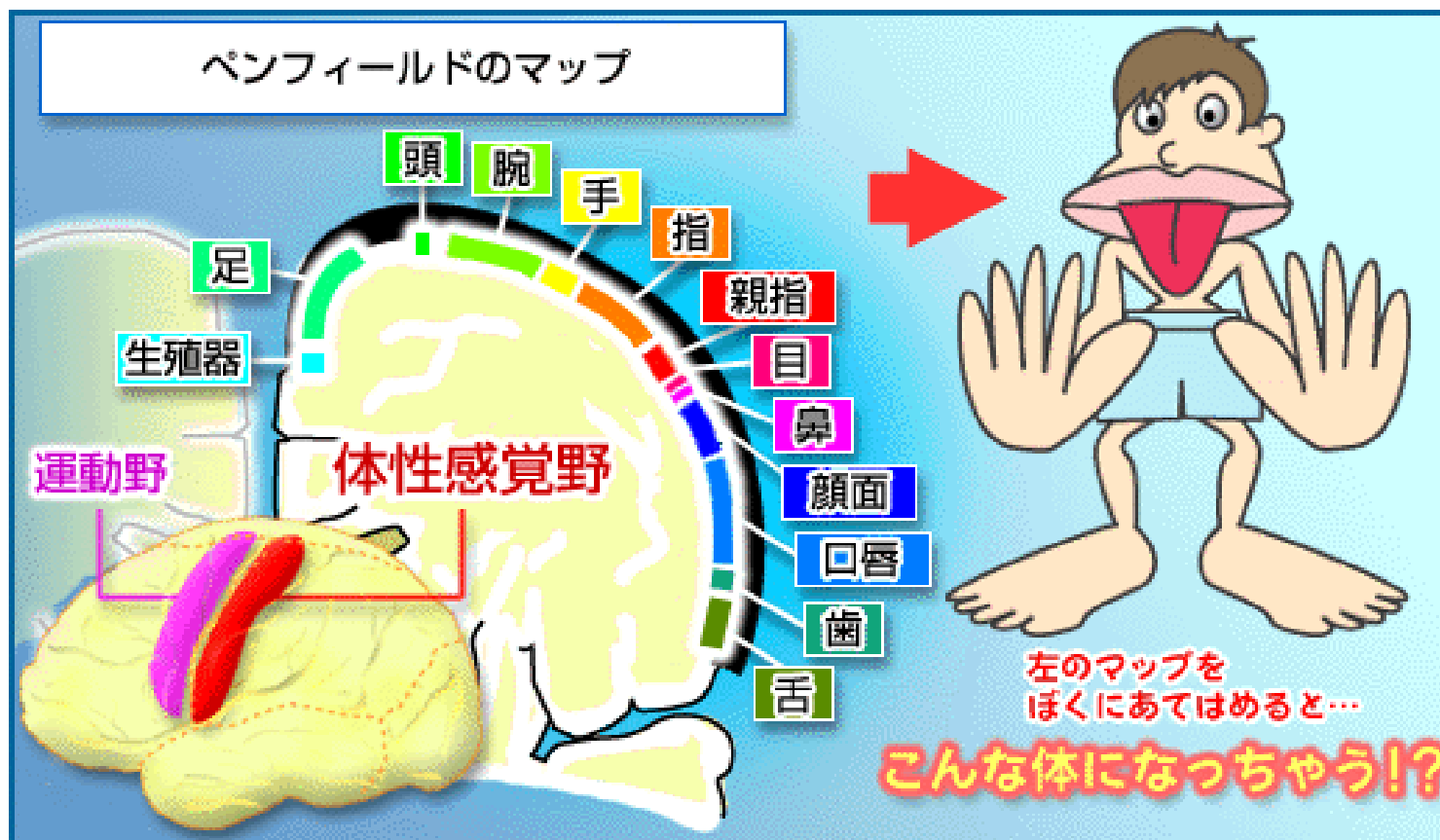
- 受容野の位置（視野内のどの位置）
- 方向選択性（線分の方向）
- 眼優位性（左右どちらか）



a

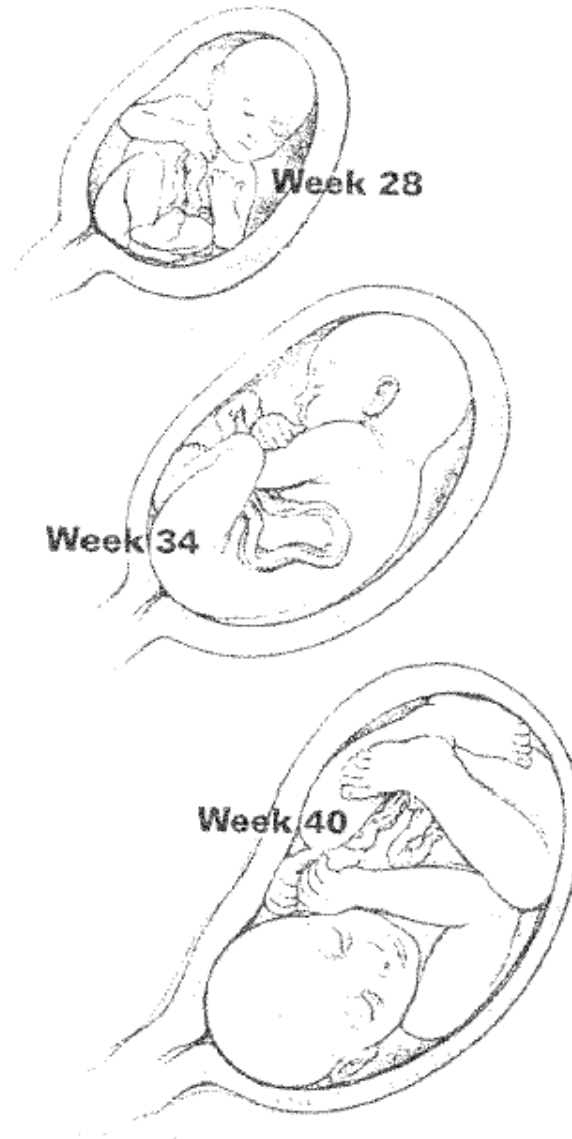


- 拡大率： 体性感覚野のマップ



日本学術会議 おもしろ情報館
<http://www.scj.go.jp/omoshiro/>

- 仮説 Farah (1998)



連想記憶モデル

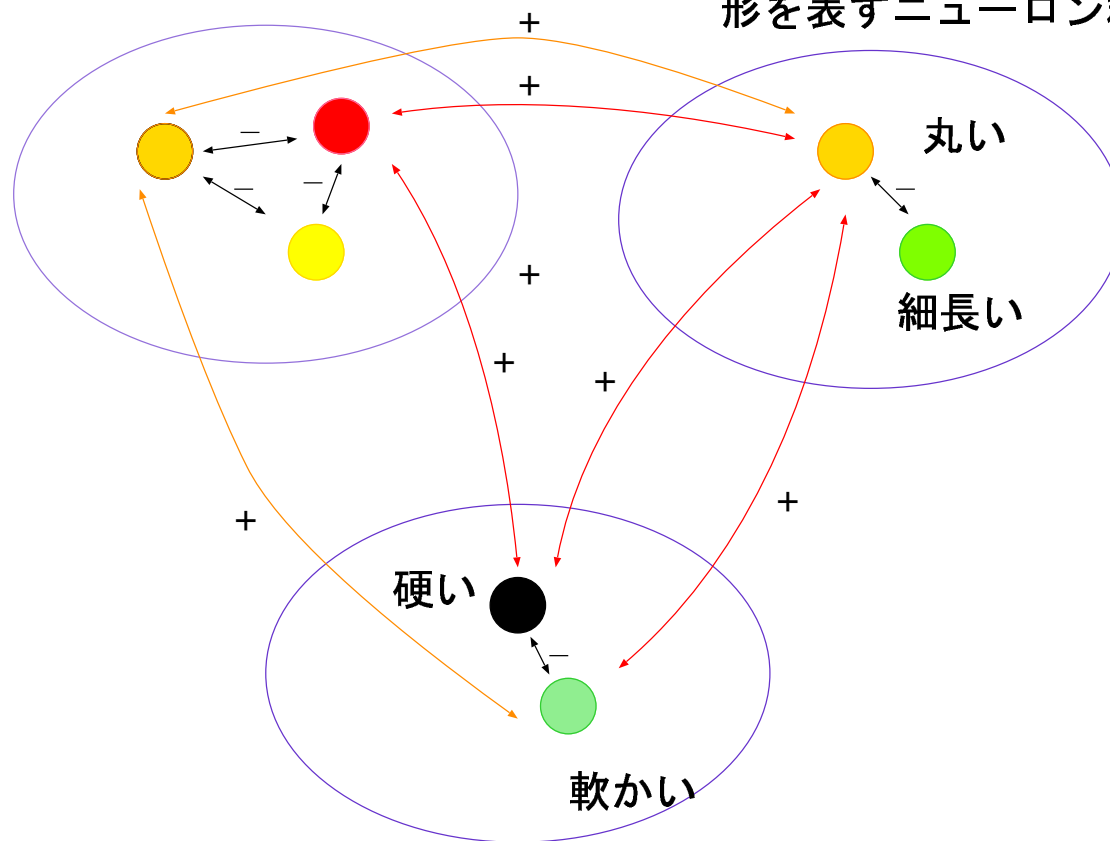
連想記憶とは

- 部分から全体が想起できる。
 - ・ 不完全な鍵からの想起が可能
- 一つの事項から関連する事項が次々と想起できる。
 - ・ 山 川 , 海 水泳
- 時間的な順序のある系列を順に想起できる。
 - ・ $x^1 \rightarrow y^1, x^2 \rightarrow y^2, \dots, x^k \rightarrow y^k$

これらの気分が味わえるのが、連想記憶モデル

色を表すニューロン群

形を表すニューロン群



硬さを表すニューロン群

リンゴ, バナナ, ミカンをおぼえたニューロン群

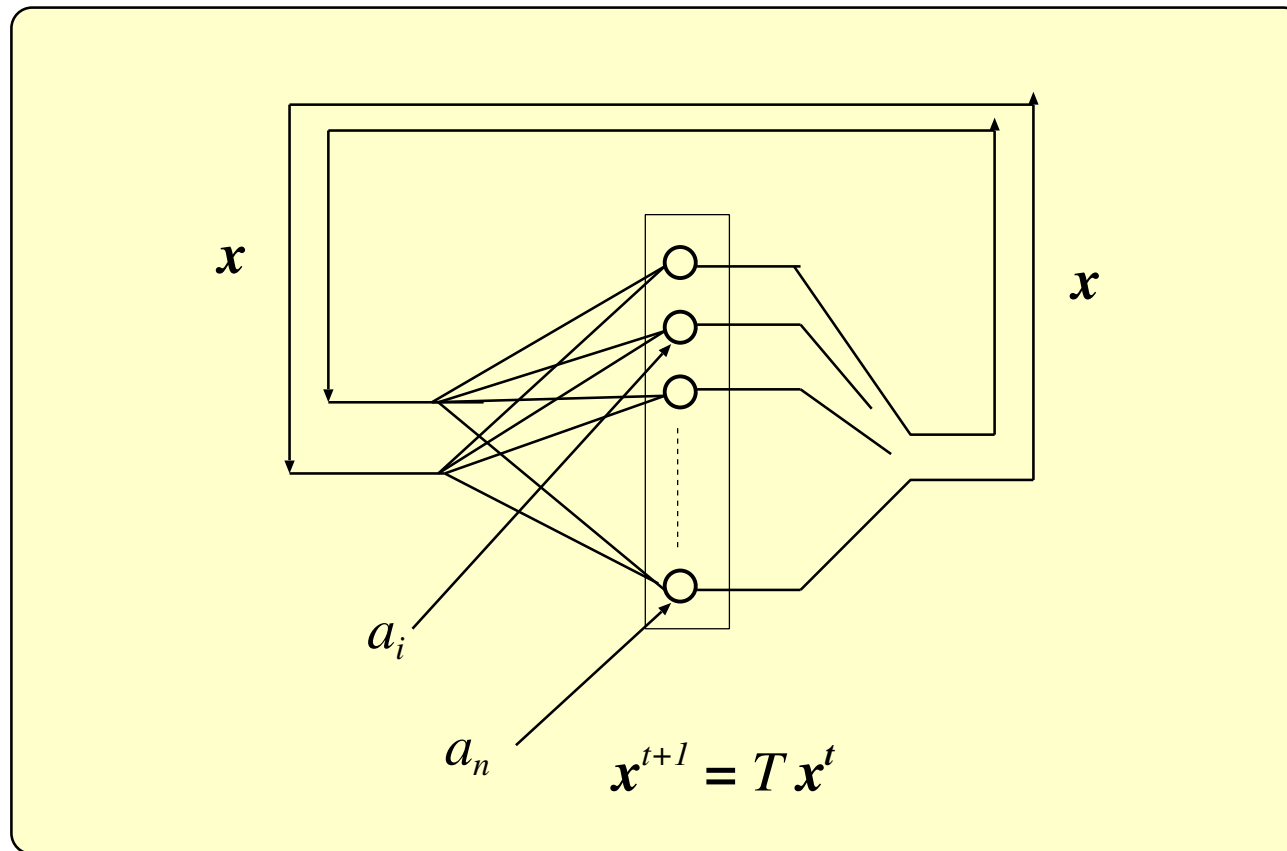
連想記憶モデル：相互想起型

- $x^1 \rightarrow y^1, x^2 \rightarrow y^2, \dots, x^k \rightarrow y^k$
- $x_i, y_i \in \{-1, 1\}$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix}, \mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix}, \mathbf{y}\mathbf{x}^\top = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} [x_1 x_2 \dots x_n] = \begin{bmatrix} y_1 x_1 & y_1 x_2 & \dots & y_1 x_n \\ y_2 x_1 & y_2 x_2 & \dots & y_2 x_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_n x_1 & y_n x_2 & \dots & y_n x_n \end{bmatrix}$$

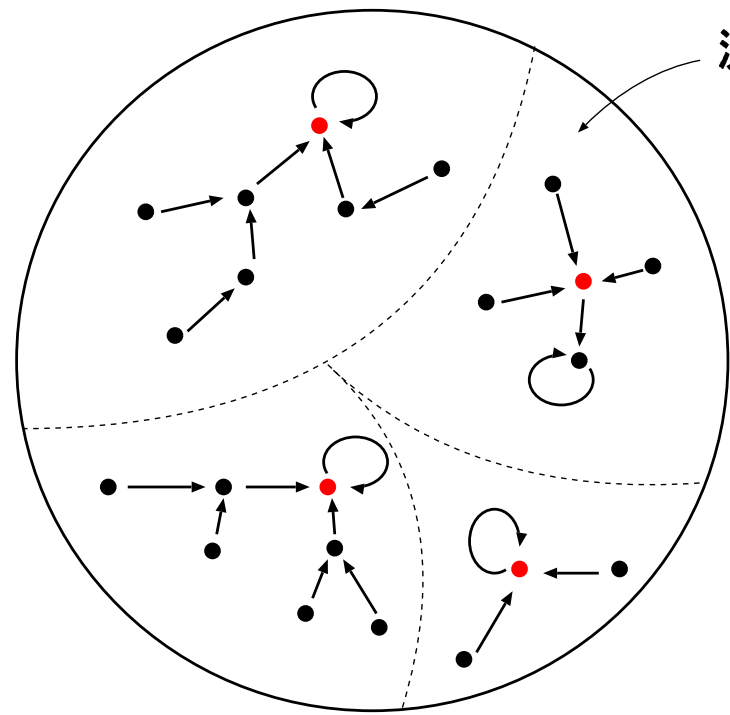
$$s_{ji} = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^k x_i^\alpha y_j^\alpha, \quad S = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^k \mathbf{y}^\alpha \mathbf{x}^{\alpha\top} \quad (\text{ヘブ学習, 相関学習})$$

相互結合の神経回路モデル



連想記憶モデル

$$x \Rightarrow T_w x$$



流域

- 記憶パターン

$$x^\mu = T_w x^\mu$$

$$\mu = 1, 2, \dots, m$$

m 記憶パターン数

結合係数

$$w_{ij} = k \sum x_i^\mu x_j^\mu$$

連想記憶モデル：自己想起型

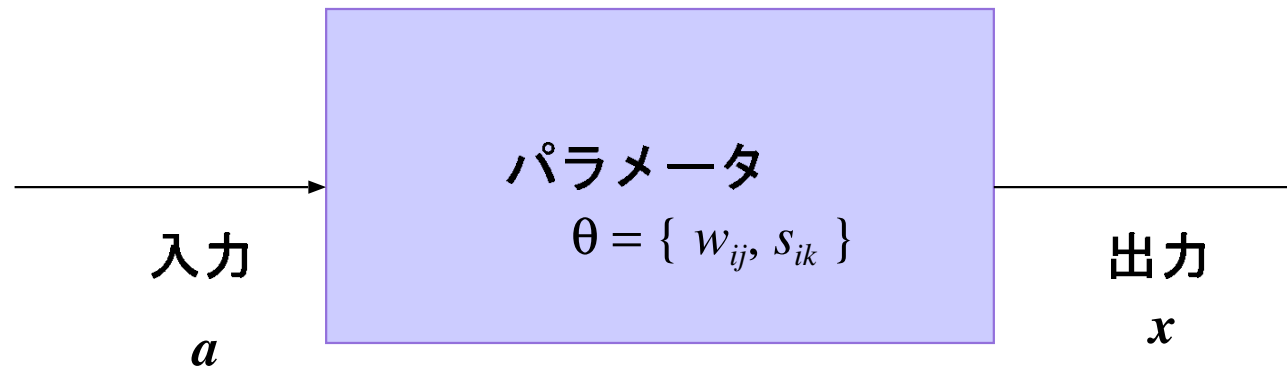
- $\mathbf{x}^\alpha \cdot \mathbf{x}^\beta = 0, \alpha \neq \beta$

$$\text{結合係数行列： } S = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^k \mathbf{x}^\alpha \mathbf{x}^{\alpha\top}$$

$$\text{活動のダイナミクス： } \mathbf{x}' = \text{sgn}(S\mathbf{x}^3)$$

$$S\mathbf{x}^3 = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^k \mathbf{x}^\alpha \mathbf{x}^{\alpha\top} \mathbf{x}^3 = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^k \mathbf{x}^\alpha (\mathbf{x}^\alpha \cdot \mathbf{x}^3) = \frac{1}{n} \mathbf{x}^3 (\mathbf{x}^3 \cdot \mathbf{x}^3) = c\mathbf{x}^3$$

神経回路モデルの見方



速い ニューロン活動 x のダイナミクス

$$x(t+1) = F(x(t), \theta(t))$$

遅い 結合係数 θ のダイナミクス

$$\theta(t+1) = G(\theta(t), a(t), x(t), x(t-1), \dots)$$

入出力の関係はパラメータ θ (結合係数) に依存

大雑把に言えば, ニューロン活動 x 思考, 結合係数 θ 記憶 に対応