

計算論的神経科学と 小脳内部モデル

川人光男

ATR脳情報研究所

Discovery Channel



情報処理課題を実行する機械を 理解するのに必要な3つの水準

計算理論
Computational theory

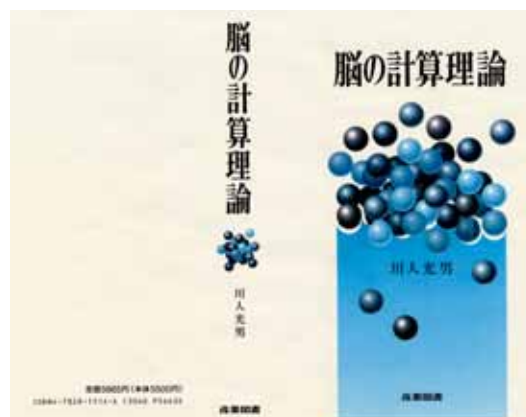
計算の目標は何か、なぜそれが適切なのか、
そしてその実行可能な方略の理論は何か

表現とアルゴリズム
Representation and algorithm

この計算理論はどのようにして実現すること
ができるか。特に入力と出力の表現は何か、
そして変換のためのアルゴリズムは何か

ハードウェアによる実現
Hardware implementation

表現とアルゴリズムがどのようにして物理的
に実現されるか



脳を創ることによって知る

- ロボットやコンピュータは人に比べてずっと劣る
- 本当には脳が分かっていない
- 創ってみて初めて働きが分かる
- 脳だけを創っても不十分で、ヒトを創ってみる

計算論的神経科学

脳の機能を、その機能を脳と同じ方法で実現できる計算機のプログラムあるいは人工的な機械を作れる程度に、深く本質的に理解することを目指すアプローチを計算論的神経科学と呼ぶ。

Biped

人工知能神経科学・クス

Schaal S, Sternad D, Osu R, Kawato M: Rhythmic arm movement is not discrete. *Nature Neuroscience*, 7, 1137-1144 (2004).
Nakanishi J, Morimoto J, Endo G, Cheng G, Schaal S, Kawato M: Learning from demonstration and adaptation of biped locomotion. *J. Robotics and Autonomous Systems*, 47, 79-91 (2004).

ヒューマノイドロボット CB-i



- 等身大ヒューマノイド
 - 身長155cm, 体重85kg
- 豊富な関節数(51個)
- 人間並みの可動範囲
- 人間並みのパワー
 - 主要な関節は油圧駆動
- 人間並みの柔軟さ
 - 関節独立の力・位置制御
- 豊富なセンサ
 - 視聴覚, 前庭, 力覚等
- 強力な演算能力
 - 運動制御系: 搭載PC×2
 - 認識・学習・シミュレータ: PCクラスタ (高速ネットワーク通信)



力制御とバランス

- 中枢神経が司る高度な姿勢調節に相当するリアルタイム制御系を開発



身体モデルを用いた力制御による自然なインタラクション



しなやかな不整地適応



高度な内部モデルと反射的な踏出しによる一連の転倒回避動作

予測と制御: バッティング

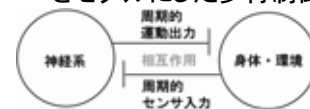
感覚・予測・制御の総合的パフォーマンス



バットを握り、自分の眼でボールを捉え、軌跡を予測し、バランスを取りつつ、素早くスイング

人間らしい2足歩行

動物の中枢神経系に存在するパターン生成器をモデルにした歩行制御



歩行動作



旋回動作

脳の歩行制御メカニズムの理解: サル脳活動によるロボット制御

ロボットの映像のリアルタイム送信 (JST(日本)→Duke大学(米国))

サルの歩行中の脳活動計測

CB-iでの歩行パターンの再現



変換された脳活動データのインターネットを介したリアルタイム送信 (Duke大学(米国)→JST(日本))

中枢パターン生成器の位相の推定: 脳の階層制御の情報推定

Object recognition on a humanoid head

Based on the capabilities of a humanoid visual system with foveated vision, we developed an object recognition system that integrates visuomotor processes and foveation to achieve reliable recognition. Training is done in interaction with the teacher.

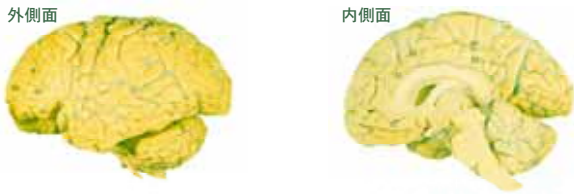


Active object recognition



Training the classifier

小脳と大脳

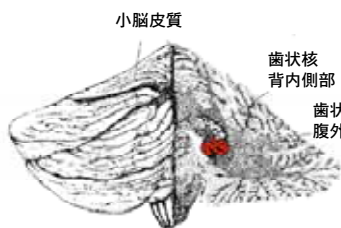


	小脳	大脳
重さ	130g	1,300g
表面積	50,000mm ²	80,000mm ²
ニューロン数	10 ¹¹	10 ¹¹
霊長類からの拡大率	2.8	3.2

古い考え方と新しい考え方

- 大脳がヒトの知性の源
- 小脳は運動の制御だけ
- 言葉がヒトの知性の特徴
- 小脳と大脳はすべての機能に関わる
- 小脳と大脳の違いは学習の方法の違い(先生有り無し)
- 言葉に頼らないコミュニケーションがヒト知性の秘密

小脳とヒト知性



◎小脳部位の系統発生

内側核0.8倍、歯状核4.5倍(キツネザル類比)

	体重	歯状核		
		体積	幅・高さ	長さ
ヒト	65kg	1,167mm ³	同じ	2倍
テンバシ	45kg	456mm ³	同じ	半分

◎小脳のサイズと知能

Paradiso (1997)

指タッピング	r=0.22	p<0.05
言語記憶	r=0.27	p<0.02
一般的IQ (WAIS-R)	r=0.19	p<0.07

大脳皮質左側頭葉は無相関

小脳の高次認知機能への関与

I. 脳活動計測

(1) 運動の想像	SPECT	Ryding et al. (1993)
(2) 名詞からの動詞の連想	PET	Raichle et al. (1994)
(3) ベグボードパズル	fMRI	Kim et al. (1994)
(4) 複数の形の視覚識別	PET	Parsons et al. (1995)
(5) 心的回転	PET	Parsons et al. (1995)
(6) 皮膚感覚による物体認識	fMRI	Gao et al. (Bower) (1996)
(7) 視覚的注意	fMRI	Allen et al. (1997)

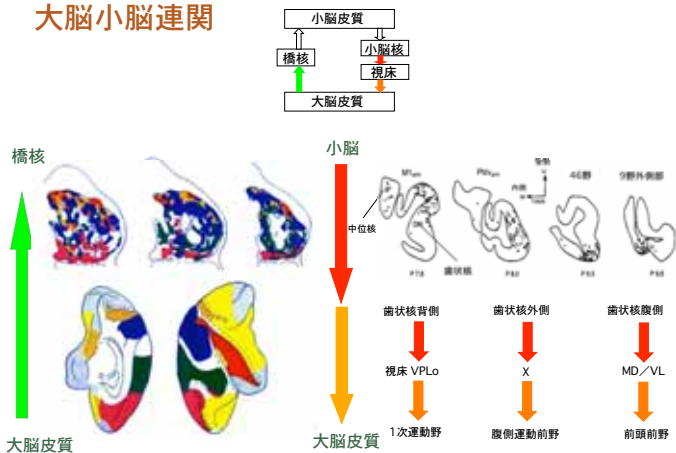
II. 損傷脳

(1) ハノイの塔	小脳皮質変性症	Grafman et al. (Hallett M.) (1992)
(2) 視覚運動認知	小脳皮質変性症	Nawrot & Rizzo (1995)
(3) 自閉症患者	小脳サイズ	Courchesne et al. (1995)

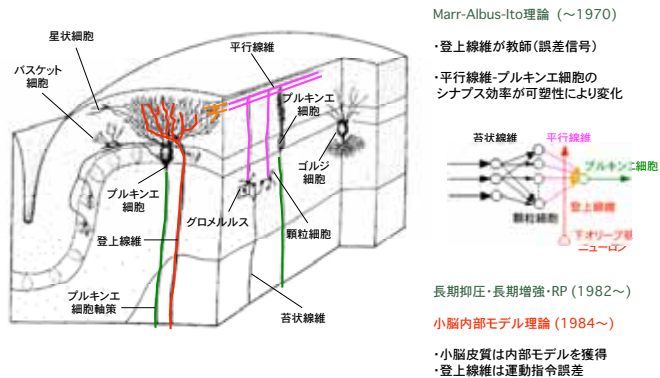
III. 解剖

(1) 46野	HSV1	Middleton & Strick (1994)
(2) IQ	小脳サイズ	Paradiso et al. (1997)

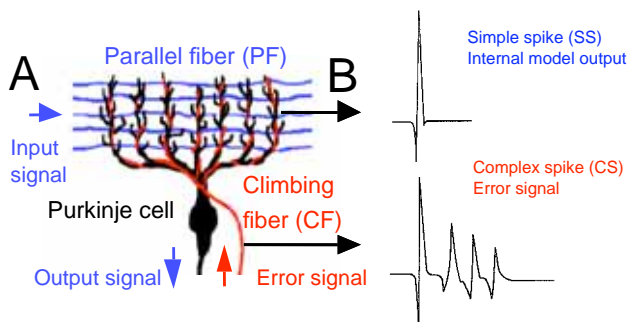
大脳小脳連関



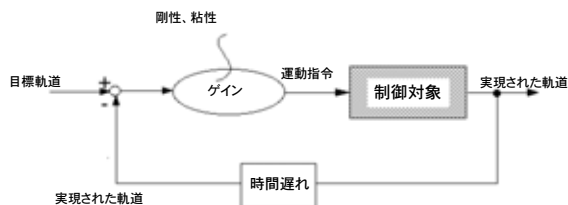
小脳皮質の神経回路・可塑性・理論



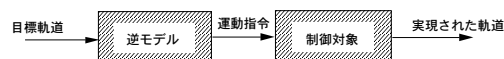
Parallel Fiber and Climbing Fiber Inputs to Purkinje Cells induce Simple Spikes and Complex Spikes



A フィードバック制御



B 逆モデルによる前向き制御



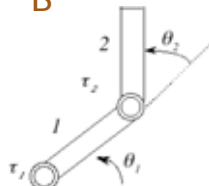
PFMによるヒト腕剛性の測定



A



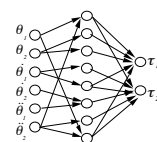
B



C

$$\begin{aligned} \tau_1 = & (M_1 L_1^2 + 2M_2 L_1 S_2 \cos \theta_2 + I_1 + I_2) \ddot{\theta}_1 \\ & + (M_2 L_1 S_2 \cos \theta_2 + I_2) \ddot{\theta}_2 \\ & - M_2 L_1 S_2 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 + B_1 \dot{\theta}_1 \\ \tau_2 = & (M_2 L_1 S_2 \cos \theta_2 + I_2) \ddot{\theta}_1 + I_2 \ddot{\theta}_2 \\ & + M_2 L_1 S_2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 + B_2 \dot{\theta}_2 \end{aligned}$$

逆ダイナミクスモデル



順ダイナミクスモデル



小脳内部モデル理論

- 小脳は入力を出力に変換する神経回路の集まり
- シナプスの伝達効率が変化して異なる変換を学べる
- 学習は教師がいて、誤差を教えてくれる
- 脳の外にある、運動のための身体の一部、道具、他人の脳などのまねをする内部モデルを学ぶ

小脳内部モデルを用いたロボットデモンストレーション

運動指令に関する教師あり学習との比較

フィードバック誤差学習則

$$d\omega/dt = \varepsilon(\partial\tau_{ff}/\partial\omega)^T \tau_{fb} \quad (1)$$

教師あり学習

運動指令の教師信号が $\tau_{desired}$ と与えられていて、2乗誤差

$E = \frac{1}{2}(\tau_{desired} - \tau_{ff})^T \cdot (\tau_{desired} - \tau_{ff})$ を ω の最急降下方向に減少させる(Widrow-Hoff 則)

$$d\omega/dt = \varepsilon(\partial\tau_{ff}/\partial\omega)^T (\tau_{desired} - \tau_{ff}) \quad (2)$$

τ_{fb} が $(\tau_{desired} - \tau_{ff})$ を近似している。つまり、フィードバック運動指令が、逆モデルを学習するための運動指令の誤差信号として働いている

τ_{fb} と $\tau_{desired}$ が同じ座標系で表現されている
2つの信号の時間経過はある程度似ている

フィードバック誤差学習としてみたLTD, LTP

プルキンエ細胞の入出力モデル

プルキンエ細胞の出力 y は n 本の平行線維入力 x_i のシナプス荷重 ω_i による線形和

$$y = \sum_i \omega_i x_i \quad (1)$$

LTDとLTPのモデル

$$d\omega_i/dt = -\varepsilon x_i (C - C_{spont}) \quad (2)$$

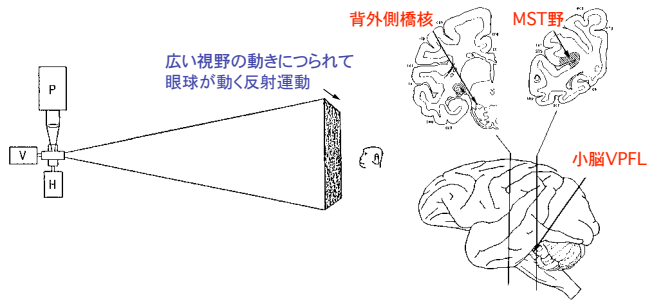
フィードバック誤差学習による解釈

登上線維の発火頻度の自発電からの $C - C_{spont}$ がフィードバック制御器の運動指令に対応

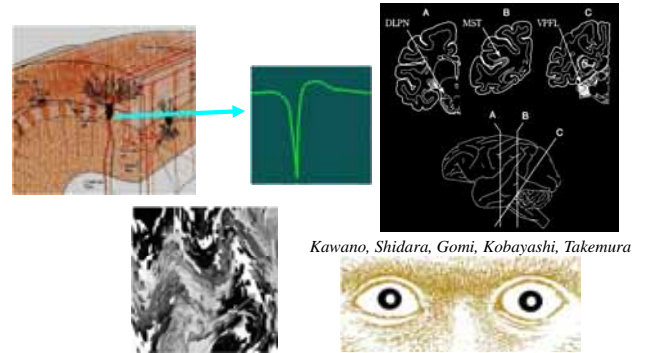
$$\begin{aligned} d\omega_i/dt &= \varepsilon(\partial\tau_{ff}/\partial\omega_i)\tau_{fb} \\ &= \varepsilon(\partial(-y)/\partial\omega_i)\tau_{fb} \\ &= -\varepsilon x_i (C - C_{spont}) \end{aligned} \quad (3)$$

追従眼球運動の神経生理学的研究

(電総研 河野、設楽、竹村、小林らによる実験)

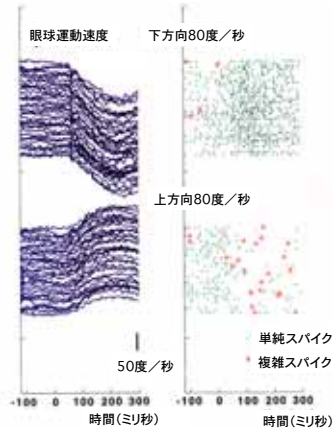


Simple and Complex Spikes of Purkinje Cells in Monkeys during Ocular Following Responses



Ocular Following Responses: Reflex eye movement induced by movement of large visual field

追従眼球運動と単純・複雑スパイク

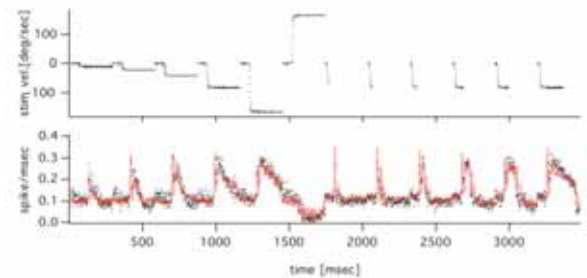


プルキンエ細胞発火頻度の逆ダイナミクスモデル

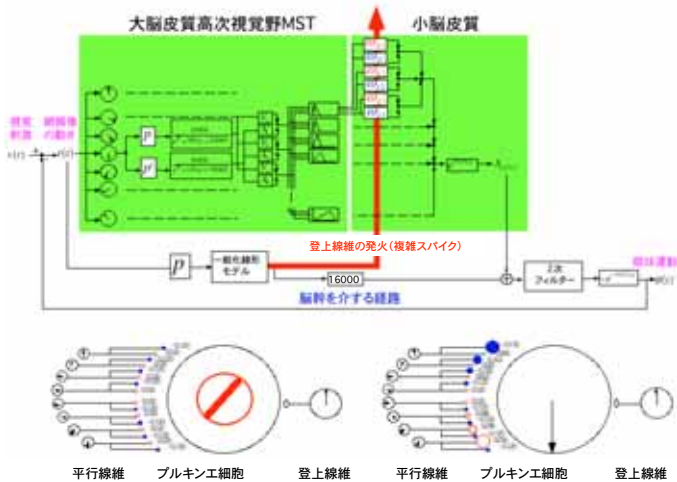
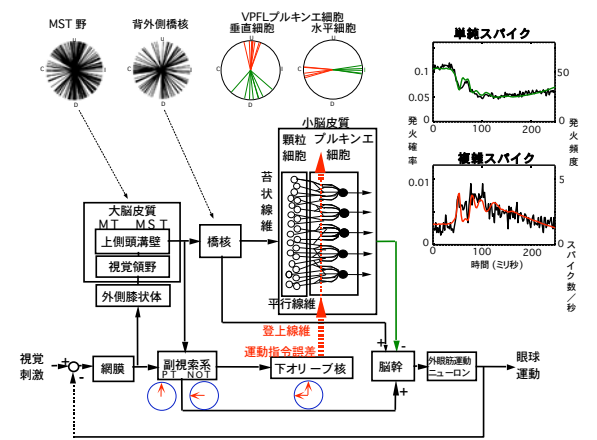
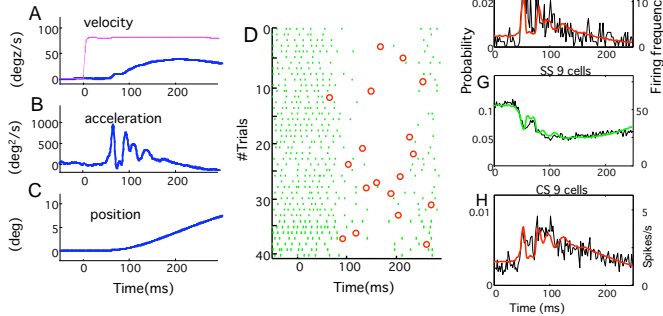
5種類の刺激速度、6種類の刺激時間のデータから1組の係数を推定

Coeff.det 0.78

$$f(t) = M\ddot{\theta}(t + \delta) + B\dot{\theta}(t + \delta) + K\theta(t + \delta) + f_{bias}$$



Instantaneous firing frequency is information carrier for complex spikes (CS) and simple spikes (SS).



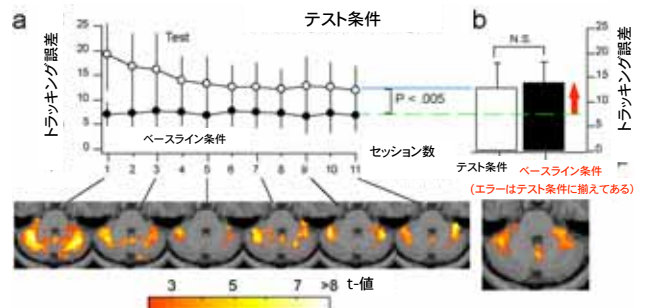
小脳内部モデル理論はどれくらい証明できたか？

- OFRについてVPFLではまずまちがいない（でも小脳全体の1/1000）
- 登上線維入力が運動指令の空間の誤差（感覚誤差ではない）Winkelman & Frens (2005)
- 登上線維が強いと制御が悪くなるという予測も平野先生が実証
- 電気シナプスが適度に強くなるとカオスも実験的に支持 Lange E
- 腕の運動制御は難しい(山本憲司、北澤)

ヒトの脳に道具の内部モデルがある

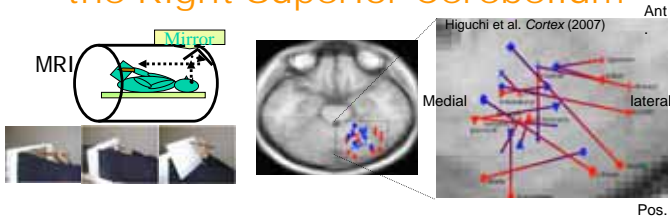
- ・ ヒトの脳の活動を脳を傷つけずに外から計測できる (fMRI, PET, 脳波、脳磁図など)
- ・ 新しい道具を学ぶ時に小脳のたくさんの部分が活動する
- ・ 特定の道具を使う記憶 (内部モデル) は狭い場所に別々にある

ヒト小脳内の道具の内部モデル: fMRIによる検証



Imamizu H, Miyauchi S, Tamada T, Sasaki Y, Takino R, Puetz B, Yoshioka T, Kawato M: Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool. *Nature* 403 192-195(2000)

Organization of 16 Daily Tools in the Right Superior Cerebellum



16 tools and utensils:
Chopsticks, saw, scissors, pencil, hammer, screw-driver, fork, spoon, tooth brush, brush, comb, cutting pliers, monkey wrench, wrench, knife and clip

Higuchi et al. *Cortex* (2007)

•Averaged across 8 subjects with fixed effect model $p < 0.05$ corrected.

•The peaks are projected in a horizontal plane

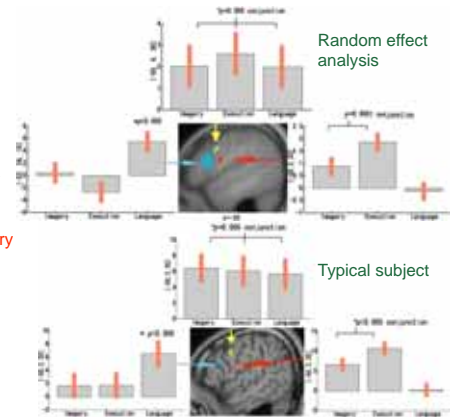
Conditions

- Tool-use execution
- Hold the tool and look at the object (control)
- Tool-use motor imagery

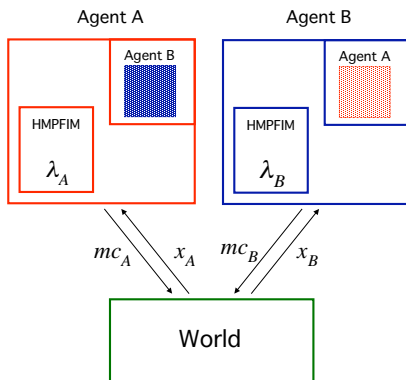
Language and Tool Internal Models in Broca's Area: Segregation and Overlap

- 28 healthy subjects (14 males and 14 females)
- Conditions
 - Tool-use execution
 - Hold the tool and look at the object (control)
 - Tool-use motor imagery
 - Story listening
 - Reversed story listening (control)

Higuchi, Chaminade, Imamizu, Kawato (in preparation)



心の理論の計算モデル (Computational Theory of Mind)

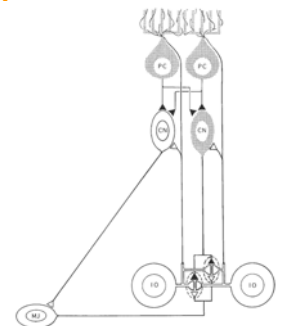
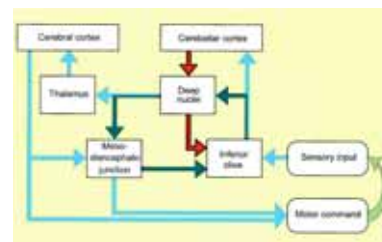


- (1) A, Bがそれぞれ順に世界を制御、HMPFIMを獲得
- (2) 本質的仮定: 2つのHMPFIMは異なるが似ている
- (3) お互いに相手のモデルを獲得
- (4) 上は不可能 (λ, mc 観測不能)
- (5) imitationのアルゴリズムを用いて他者の λ, mc を推定. これを用いて theory of mind 学習 ((2))
- (6) Bootstrap or Annealing ◻

$$\hat{mc}_i = \lambda mc_i + (1 - \lambda) mc'_i$$

$$\lambda \rightarrow 0$$

Microcircuitry of Cerebello-IO Network

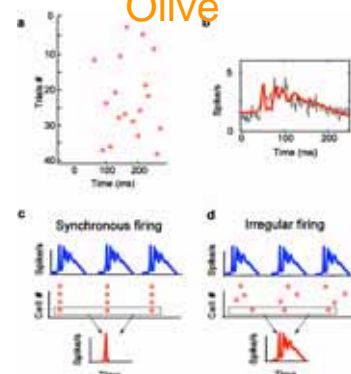


De Zeeuw CI, Simpson JJ, Hoogenraad CC, Galjart N, Koekoek SKE, Ruigrok TJH: Microcircuitry and function of the inferior olive. *Trends in Neurosciences*, 21, 391-400 (1998).

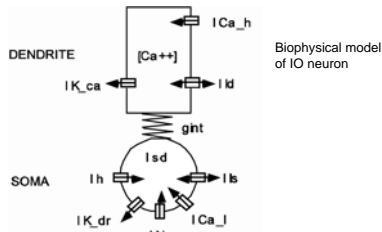
Controversies of Inferior Olive Functions: Rhythmicity and Synchrony versus Learning Signals

1. Most intensive gap junctions (electrical coupling) between IO neurons
2. Strong rhythmicity and synchrony under anesthetized rodents with blockades of synaptic inputs to IO (Llinas)
3. No rhythmicity and little synchrony for awake monkeys (Thach)
4. Learning theory should explain gap junctions and low firing rates

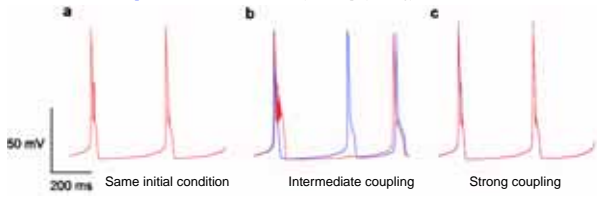
Chaotic Resonance in Inferior Olive



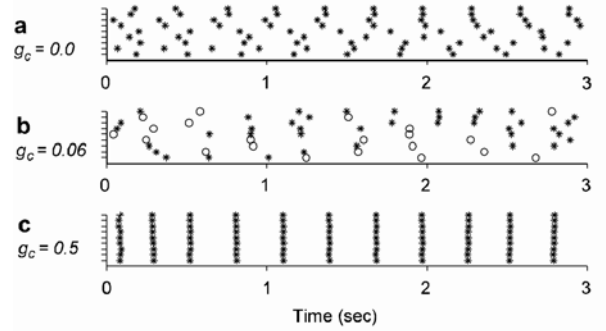
Schweighofer N, Doya K, H. Fukai, Chiron JV, Furukawa T, Kawato. M: Chaos may enhance information transmission in the inferior olive. *Proc Natl Acad Sci USA*, 101, 4655-4660 (2004).



Schweighofer N, Doya K, Kawato M: Electrophysiological properties of inferior olive neurons: a compartmental model. *Journal of Neurophysiology* 82, 804-817 (1999).

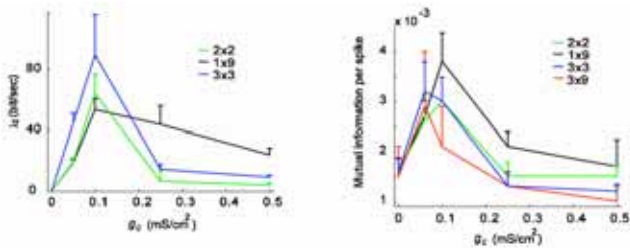


Spiking of 3x3 Cells without Inputs



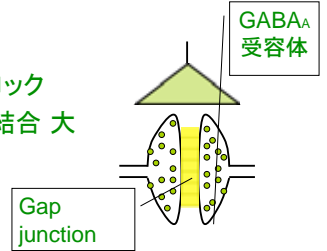
Largest Lyapunov Exponent

Network Mutual Information



Picrotoxin condition

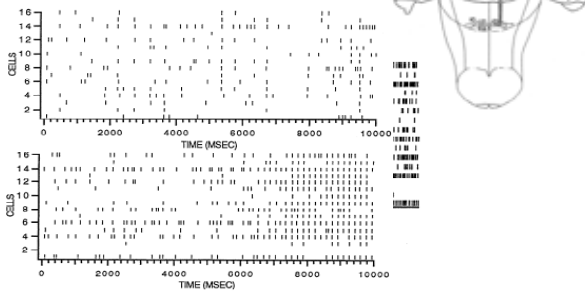
- GABA_A受容体をブロック
→ Gap junctionの結合大



Picrotoxin conditionでは、
①膜電位が脱分極、②coupling大、③noise小
となると考えられる

Picrotoxin condition

- E. J. Lang et al. (1996)



<http://www.neuro2010.org/neuro2010-eng/index.html>

