

# 計算論的神経科学と 小脳内部モデル

川人光男

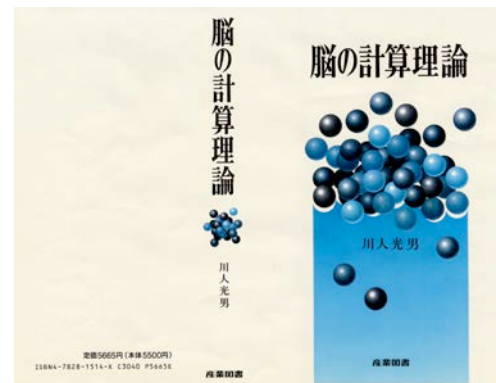
ATR脳情報研究所

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つと劣る
- 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。

Bliss

## 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).

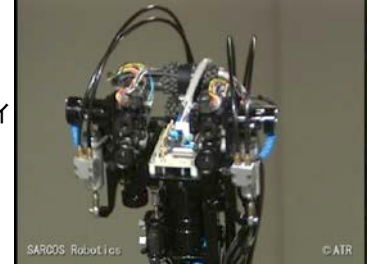
## ヒューマノイドDB (Dynamic Brain)

- ・ 30 自由度
- ・ 身長190 cm
- ・ 体重80 kg
- ・ 柔らかい
- ・ 生物に学んだ眼球運動・視覚系
- ・ SRCとKDBの共同開発



## 生物に学んだ眼球運動・視覚系

- ・ それぞれの眼球に2自由度
- ・ 人工前庭器官: ジャイロセンサー
- ・ 中心かど周辺視は2台のカメラ



DB 26 Arts

Shibata, T. and Vijayakumar, S. and Conradt, J. and Schaal, S.: Biomimetic Oculomotor Control. *Adaptive Behavior*, 9, 189-208 (2001).



## ヒューマノイドロボット CB-i

サルコス社 (米国) が製作

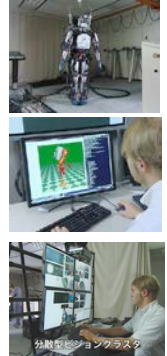
- ・ 人間により近いヒューマノイドロボット (同程度の速さと力)
- ・ 自律型
- ・ 155cm and 85 Kg
- ・ 柔らかい



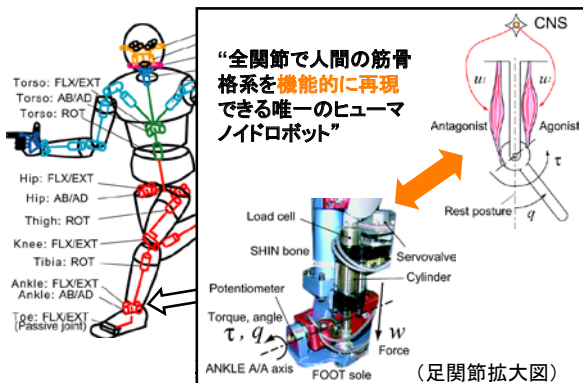
## ヒューマノイドロボット CB-i



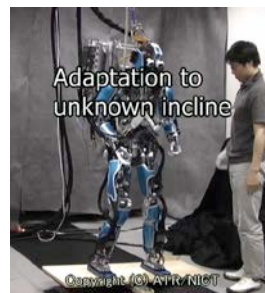
- ・ 等身大ヒューマノイド
  - 身長155cm, 体重85kg
- ・ 豊富な関節数 (51個)
- ・ 人間並みの可動範囲
- ・ 人間並みのパワー
  - 主要な関節は油圧駆動
- ・ 人間並みの柔軟さ
  - 関節独立の力・位置制御
- ・ 豊富なセンサ
  - 視聴覚, 前庭, 力覚等
- ・ 強力な演算能力
  - 運動制御系: 搭載PC×2
  - 認識・学習・シミュレータ: PCクラスター (高速ネットワーク通信)



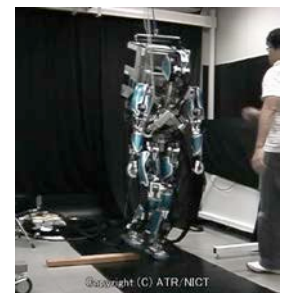
## 関節の構成と特徴



## ヒト型ロボットによるバランス制御の実験例 —BMIリハの姿勢制御、歩行応用への必須技術 ビジョンおよび床反力フィードバックなし(姿勢情報のみ)



未知傾斜面のバランス



未知障害物上での片足バランス

# 力制御とバランス



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



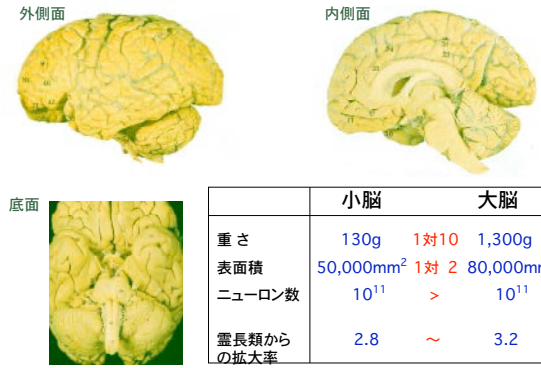
- 中枢神経が司る高度な姿勢調節に相当するリアルタイム制御系を開発



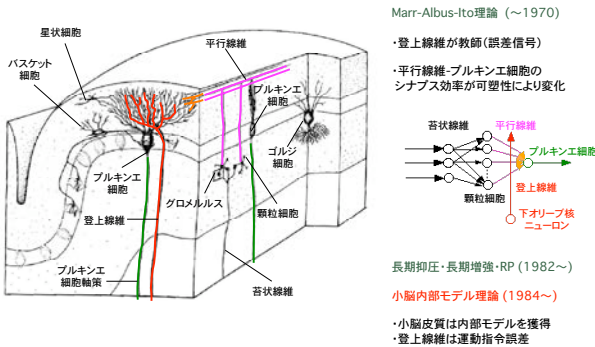
しなやかな不整地適応

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

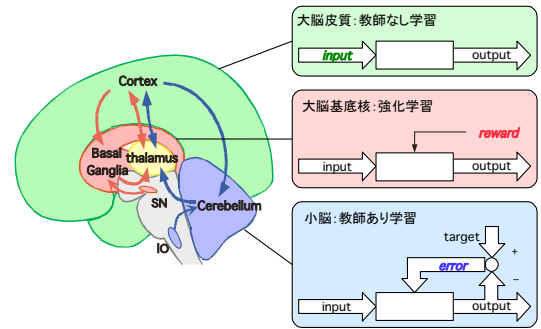
# 小脳と大脳



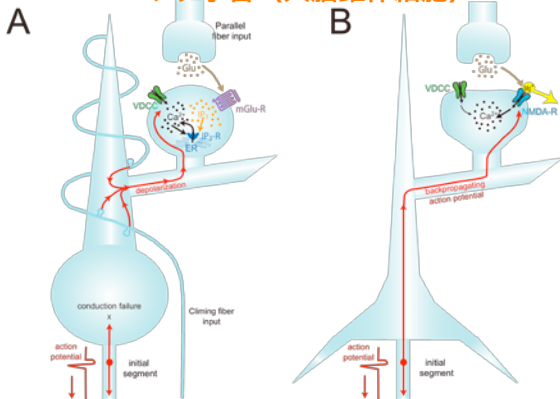
# 小脳皮質の神経回路・可塑性・理論



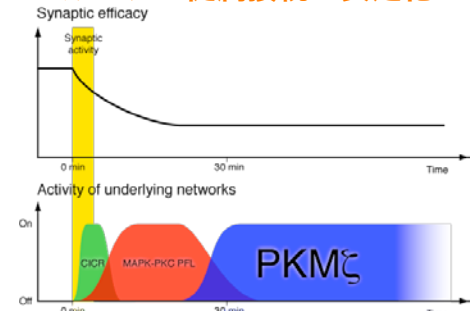
# 大脳、小脳、大脳基底核は学習アルゴリズムの違い？ (Doya K, Neural Networks 1999)

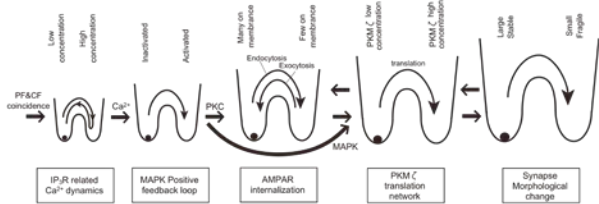


# 教師あり学習 (小脳プルキンエ細胞) とヘップ学習 (大脳錐体細胞)

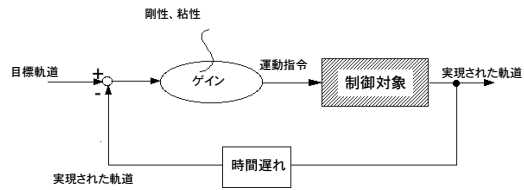


# 小脳長期減弱はCa<sup>2+</sup>, MAPK, PKMζのポジティブフィードバックループの従属接続で安定化

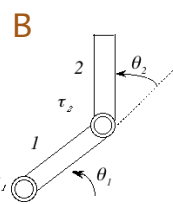
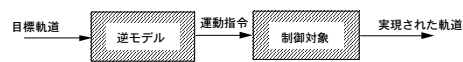




### A フィードバック制御

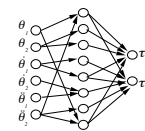


### B 逆モデルによる前向き制御

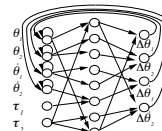


$$\begin{aligned} \tau_1 &= (M_2 L_1^2 + 2M_2 L_1 S_2 \cos \theta_2 + I_1 + I_2) \ddot{\theta}_1 \\ &\quad + (M_2 L_1 S_2 \cos \theta_2 + I_2) \ddot{\theta}_2 \\ &\quad - M_2 L_1 S_2 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 + B_1 \dot{\theta}_1 \\ \tau_2 &= (M_2 L_1 S_2 \cos \theta_2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

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

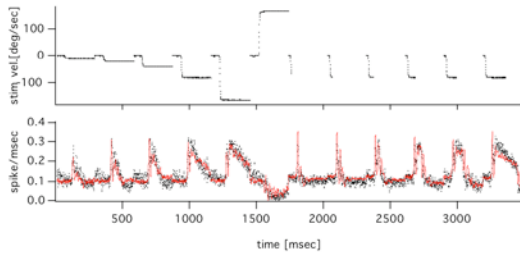
Jun Nakanishi, and Stefan Schaal: Feedback error learning and nonlinear adaptive control. *Neural Networks*, 17, 1453-1451 (2004)

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

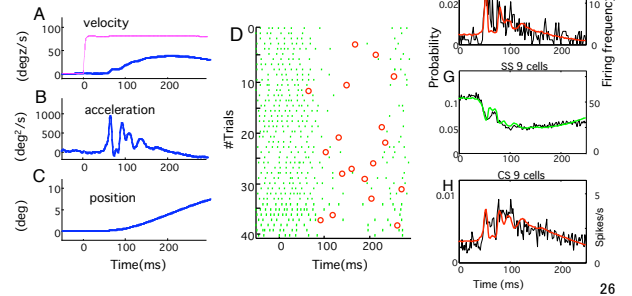
Coeff.det 0.78

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

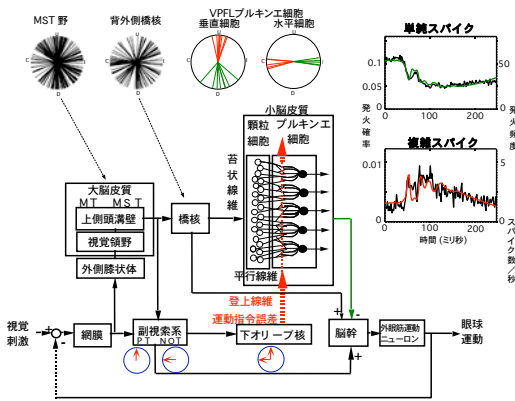


25

瞬時の発火頻度は複雑スパイクと単純スパイクの情報のキャリアー

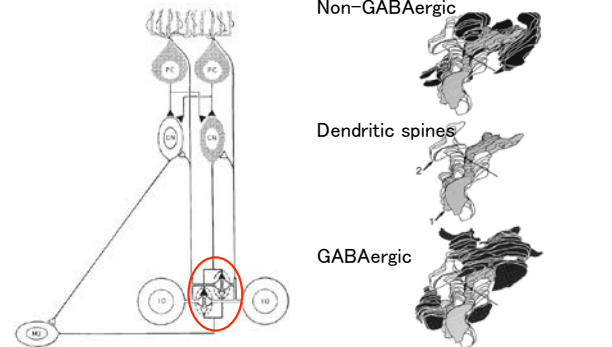


26



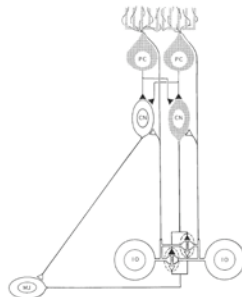
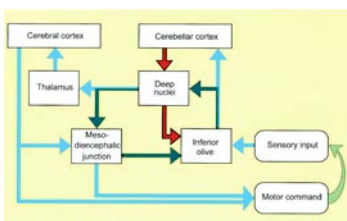
27

下オリーブ核の電気的結合は、小脳核からの抑制性入力で修飾される



C. I. De Zeeuw et al. 1998

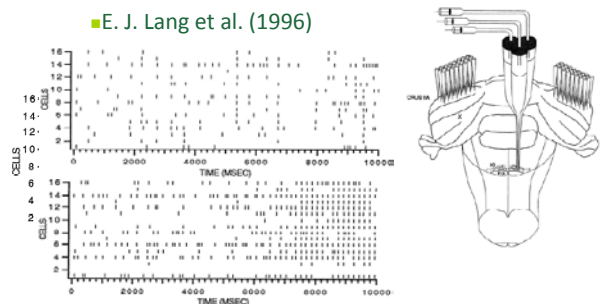
小脳、小脳核、下オリーブ核が作る閉回路の機能についての仮説：学習の自由度の制御



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

29

ピクトロキシン（抑制性伝達物質GABAの拮抗薬）のもとでは下オリーブ核のニューロンが同期してリズム的に発火する

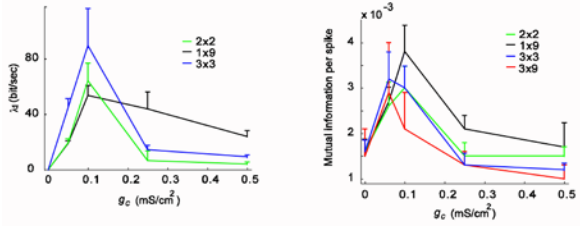


30



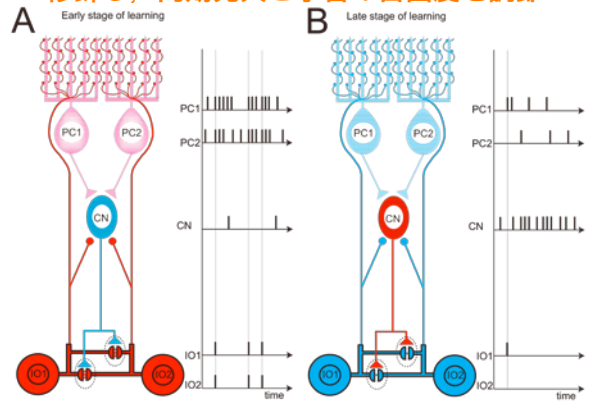
## 中程度の電気的結合はカオスダイナミクスを引き起こし最適な情報伝達を可能にする

Largest Lyapunov exponent      Network mutual information per spike



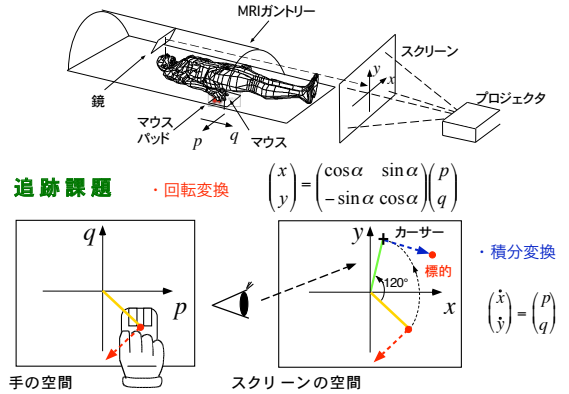
The idea of Schweighofer (2004) was confirmed in the recent simulated learning study: Isao T. Tokuda, Cheol E Han, Kazuyuki Aihara, Mitsuo Kawato, and Nicolas Schweighofer: Role of chaotic resonance in cerebellar learning, *Neural Networks*, 2010

## 学習初期と後期で抑制入力で電気的結合を修飾し、同期発火と学習の自由度を調節



## ヒトの脳に 道具の内部モデルがある

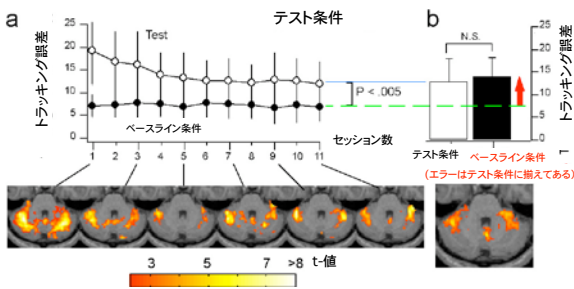
- ・ヒトの脳の活動を脳を傷つけずに外から計測できる (fMRI, PET、脳波、脳磁図など)
- ・新しい道具を学ぶ時に小脳のたくさんの部分が活動する
- ・特定の道具を使う記憶 (内部モデル) は狭い場所に別々にある



33

34

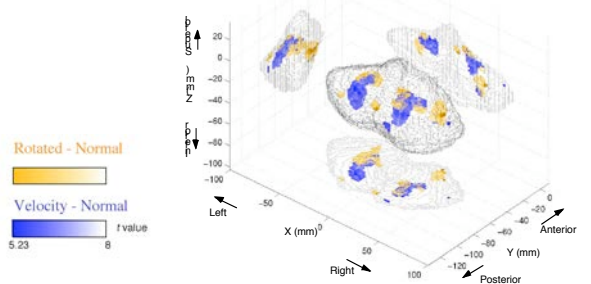
## ヒト小脳内の道具の内部モデル: fMRIによる検証



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)

35

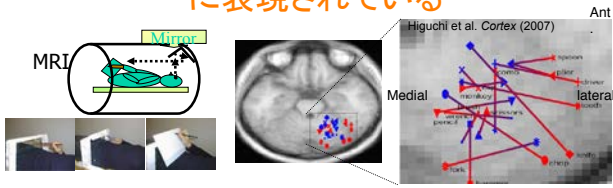
## 複数の道具に対応する 小脳内部モデルのモジュール構造



Imamizu H, Kuroda T, Miyauchi S, Yoshioka T, Kawato M: Modular organization of internal models of tools in the human cerebellum. *Proc Natl Acad Sci USA*, 100, 5461-5466 (2003).

36

## 16個の日常的な道具が右の小脳上部に表現されている



### 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

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

•The peaks are projected in a horizontal plane

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

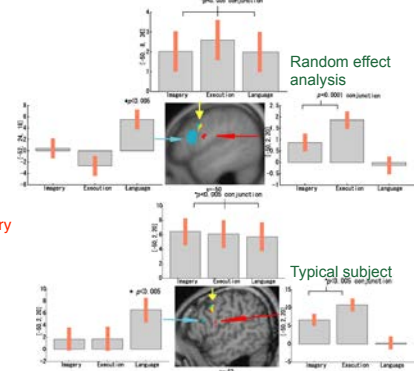
•Tool-use motor imagery

Higuchi S, Imamizu H, Kawato M: Cerebellar activity evoked by common tool-use execution and imagery tasks: an fMRI study. *Cortex*, 3, 350-358 (2007).

37

## ブローカ野で言語と道具の表現が重なっている

- 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 S, Chaminade T, Imamizu H, Kawato M: Shared neural correlates for language and tool-use in Broca's area. *NeuroReport*, 20, 1376-1381 (2009)

38