

# ロボットと知能

國吉康夫

工学部 機械情報工学科(機械B)

&

情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻

<http://www.isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp/>



**Intelligent System and Informatics Lab.**

<http://www.isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp>

⚠: このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。

## 情報文化

竹内郁雄  
「情報とアートのインタフェース」

### 新しい芸術

絵画 映像 音楽 演劇 身体表現  
メディアアート エンターテイメント  
オタク文化

市民アート

マンガ

コンテンツ

WEB2.0

デジタルヒューマン

映画

アニメ

ゲーム

ミュージアム

知的財産

## 情報の知

## 情報社会

環境

市民メディア  
マスメディア

ジャーナリズム

医療制度

電子行政

情報爆発

情報経済

教育

ネット社会

産業

グローバリゼーション

情報格差

電子マネー

セキュリティ

インターネット

コミュニケーション

ネットワーク

通信・電話

コンピュータ

ことば

紙

## 情報基盤

須藤修  
「情報爆発と新たなネットワーク社会の創造」

原島博  
「なぜ、いま情報技術なのか？」

## 情報機械

ロボット

人型ロボット

認知機能

知能ロボット

環境型ロボット

生活支援ロボット

産業用ロボット 工業生産

セル生産支援ロボット

極限フロンティアロボット

人工知能

身体性

ユビキタス

モバイル

バーチャルリアリティ

マルチメディア

パーソナルコンピュータ

シミュレーション

科学技術計算

印刷術

# 情報とロボットおよび生命 12月13日

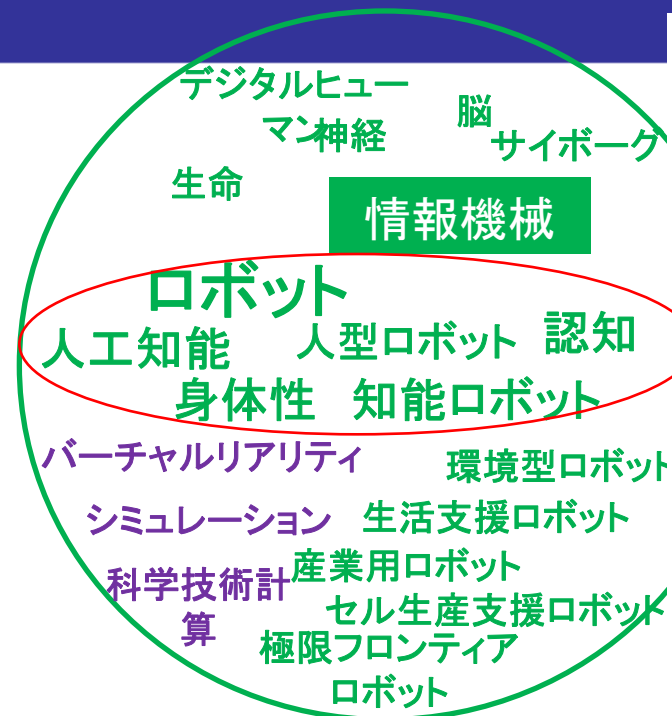
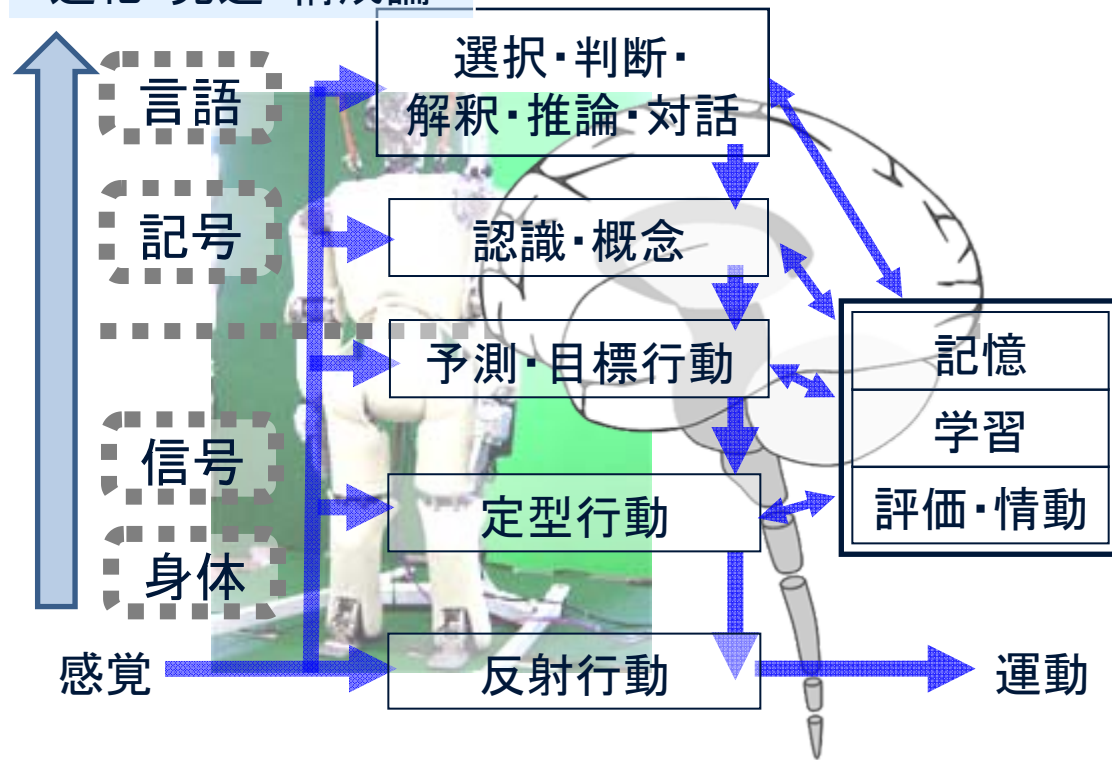
## 人の認知を解明するロボットの情報学

～國吉康夫担当～

### ロボットと知能 (学習、上達するロボットの情報学)

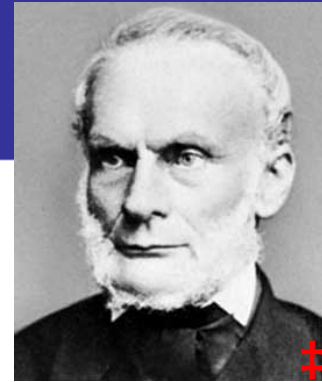
認知発達ロボット ⇔ 人の認知の理解

進化・発達・構成論



# 情報概念のルーツ ＝物理学

Rudolf Clausius  
(1822-1888)



[http://en.wikipedia.org/wiki/Rudolf\\_Clausius](http://en.wikipedia.org/wiki/Rudolf_Clausius)

The two-dimensional work of art depicted in this image is in the [public domain](#) in the United States and in those countries with a copyright term of life of the author plus **100** years. This photograph of the work is also in the [public domain](#) in the [United States](#) (see [Bridgeman Art Library v. Corel Corp.](#)).

Leo Szilard, near  
Oxford, spring 1936.

ここにあった写真は、  
著作権処理の都合上、  
削除いたしました。  
ご了承ください。

<http://www.dannen.com/szilard.html>

Photo copyright U.C. Regents; used by permission. Contact [Mandeville Special Collections Library, U.C. San Diego](#), for information on obtaining Szilard images.

Claude Shannon  
(1916-2001)

This is a **copyrighted** image that has been released by a company or organization to **promote their work or product in the media**, such as advertising material or a promotional photo in a press kit. The **copyright** for it is most likely owned by the **company who created the promotional item** or the **artist who produced the item in question**; you **must provide** evidence of such ownership. Lack of such evidence is grounds for deletion as established by these [terms of use](#). It is believed that the use of some images of promotional material to illustrate: **the person(s), product, event, or subject in question where the image is unrepeatably, i.e. a free image could not be created to replace it** on the [English-language Wikipedia](#), hosted on servers in the United States by the non-profit [Wikimedia Foundation](#), qualifies as **fair use** under [United States copyright law](#). Any other **usage of this image, on Wikipedia or elsewhere, might be copyright infringement**. See [Wikipedia:Non-free content](#) and [Wikipedia:Publicity photos](#). Additionally, the copyright holder may have granted permission for use in works such as Wikipedia. However, if they have, this permission likely does *not* fall under a free license.

ここにあった  
写真は、著  
作権処理  
の都合上、  
削除いたしま  
した。  
ご了承ください。

[http://en.wikipedia.org/wiki/Claude\\_Shannon](http://en.wikipedia.org/wiki/Claude_Shannon)

- エントロピー: 熱力学第2法則. 気体の乱雑さを表す状態量. (Clausius)  $S = k_B \ln \Omega$
- = 物理状態を観測して得られる情報量 (Szilard).
- 確率事象について得られる情報量 (Shannon)

$$1\text{bit} = k_B \ln 2 \quad (k_B : \text{ボルツマン定数}) \quad H(P) = - \sum_{A \in \Omega} P(A) \log P(A)$$

Szilard, L. (1929) "Über die Entropieverminderung in einem Thermodynamischen System bei Eingriffen Intelligenter Wesen", *Zeitschrift für Physik* **53**:840–856

Claude Shannon, "A Mathematical Theory of Communication", *Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379–423 and 623–656, 1948

# 情報 ≠ 情報量

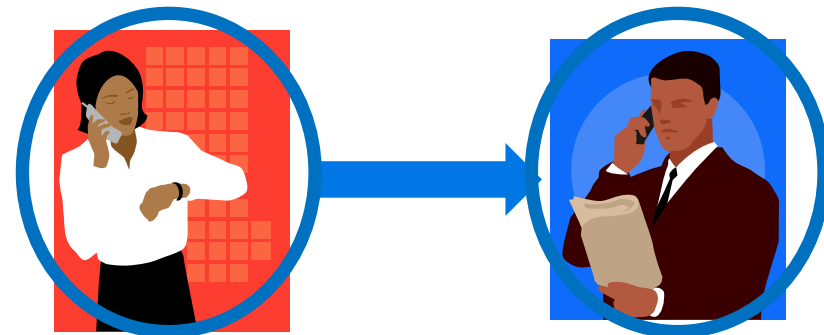
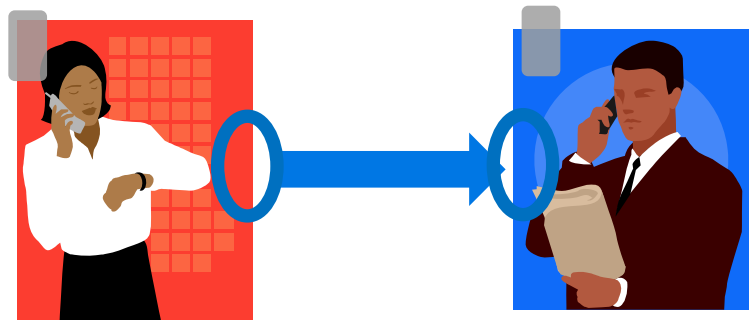
- シヤノンは、「情報量」は定義したが、「情報とは何か」を定義してはいない。必然的に...
- (純粹情報分野の) 基本概念: 通信: 「送出情報を如何にロスなく受け手に伝えるか」

送信情報量と受信情報量

- これでいいのか？！
- 「情報」の意味を知るには、それがどう生み出され、何を引き起こすのか(どう利用されるのか)を考えなければいけない。

実世界事象: 主体 → 主体: 実世界事象

物理学との再融合を目指せ...

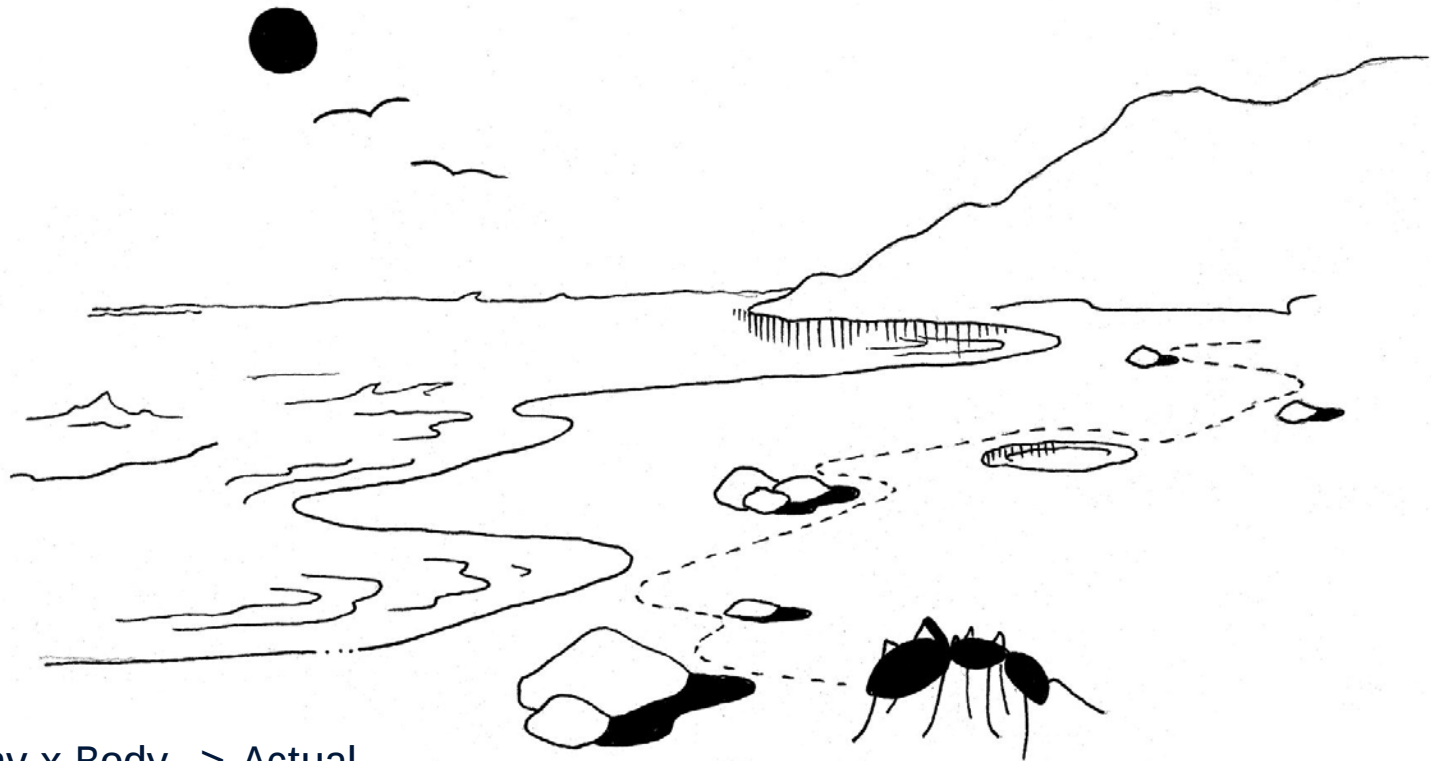


# 従来の知能ロボット

- 言語理解：音声認識，音声合成，概念辞書・・・固定的対応付け。「意味」は分かっていない.
  - 認識・判断・行動：結局，人間があらかじめ規則として書き下す.
  - 学習：実は，与えられた行動要素を組み合わせ，人間が決めた評価基準に適合させるだけ. 予め想定されない状況は扱えない.
- ⇒想定範囲内の「デモ」はできるが，不測の事態が起こるとでたらめな動作になる.
- 現状は，想定範囲を広げることで対処.
- 記号接地 (symbol grounding) 問題：解釈・利用系

# Simon's Ant on the Beach

Slides by Rolf Pfeifer (from AILectures from Tokyo)



Goal x Env x Body -> Actual  
motion

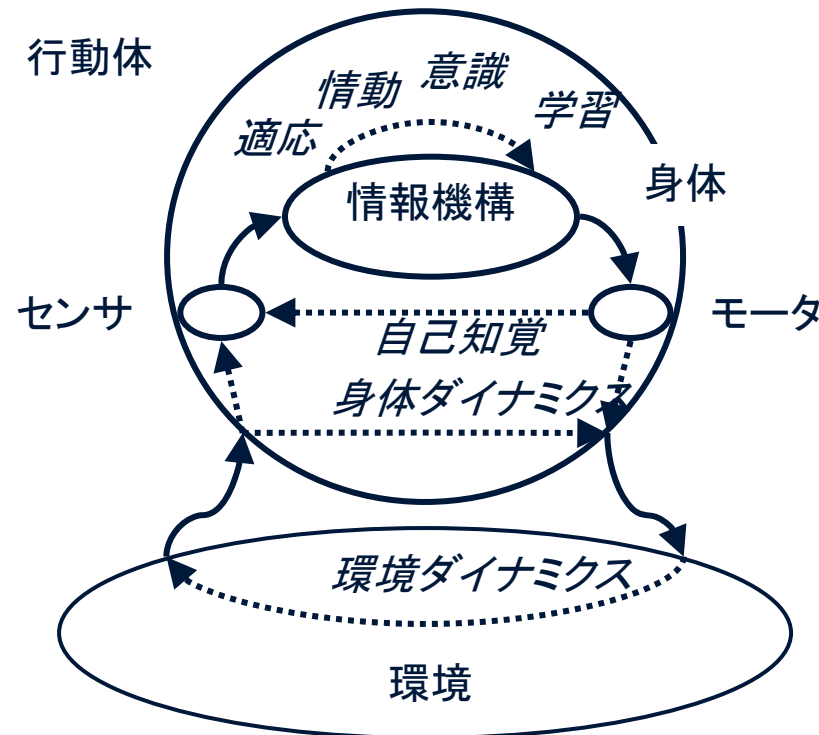
≠

Herbert A. Simon



# 情報は、主体と環境の相互作用から生み出される

- 神経系 $\leftrightarrow$ 身体 $\leftrightarrow$ 環境 の相互作用から情報が発生する.
- 身体性: その相互作用を(有意味に)制約し, 構造化するもの.



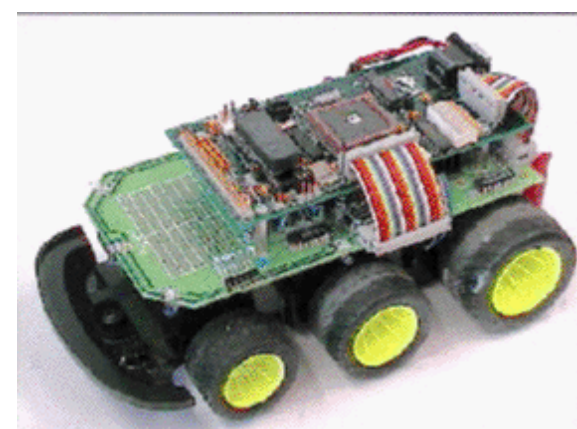


# The „Didabot“ experiment

Slides by Rolf Pfeifer (from AILectures from Tokyo)



arena with Styrofoam cubes  
Experiment by René te Boekhorst and Marinus Maris



“Didabot”:  
simple robot for didactical  
purposes

# „Didabot“ experiment – overview

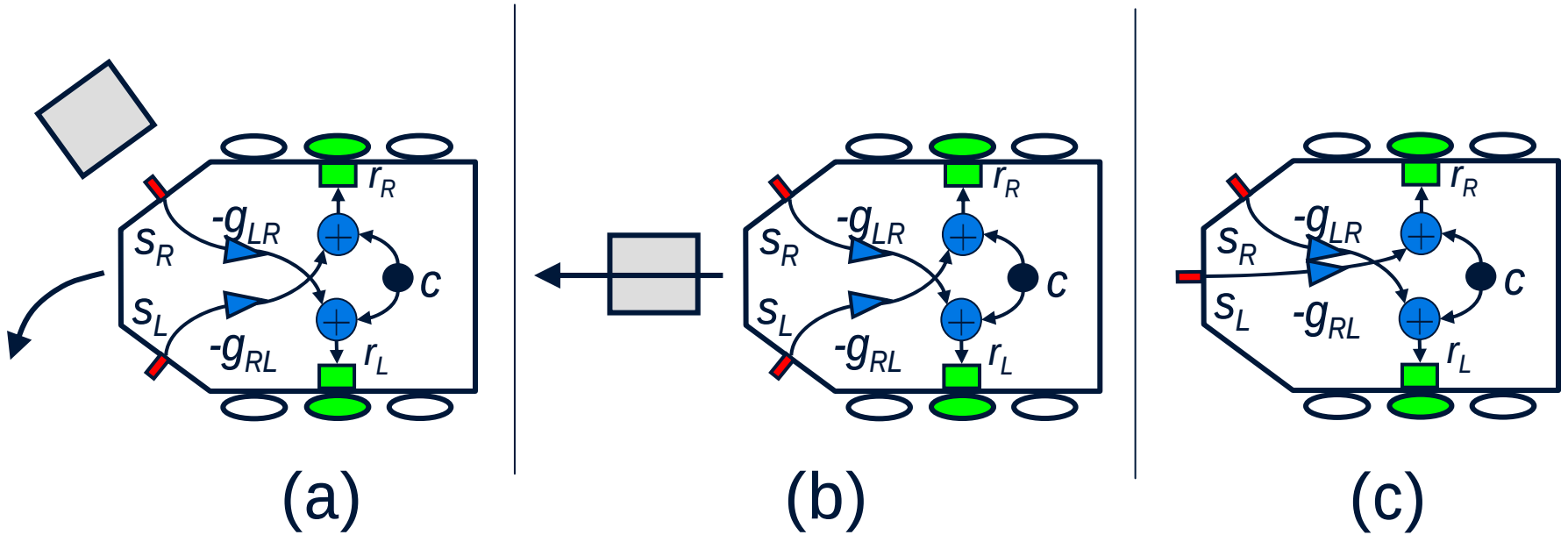
Slides by Rolf Pfeifer (from AILectures from Tokyo)



# What are the robots doing?

Slides by Rolf Pfeifer (from AILectures from Tokyo)

# Didabots



+

浅田稔、國吉康夫：ロボットインテリジェンス、岩波講座ロボット学、岩波書店、2006、  
図2.6(p59)

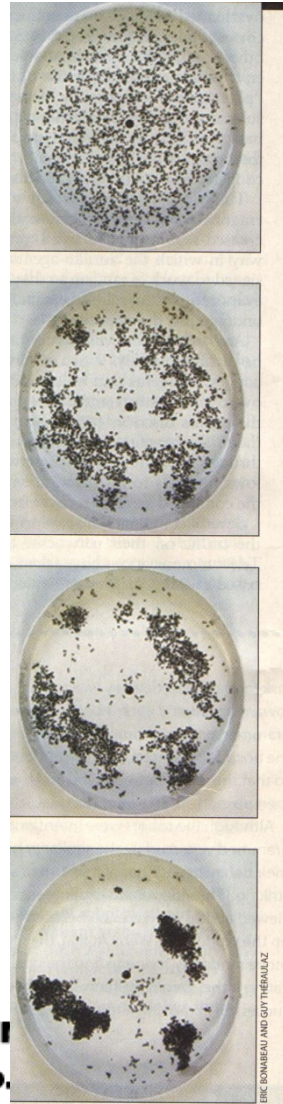


# Didabots – real ants

Slides by Rolf Pfeifer (from AILectures from Tokyo)



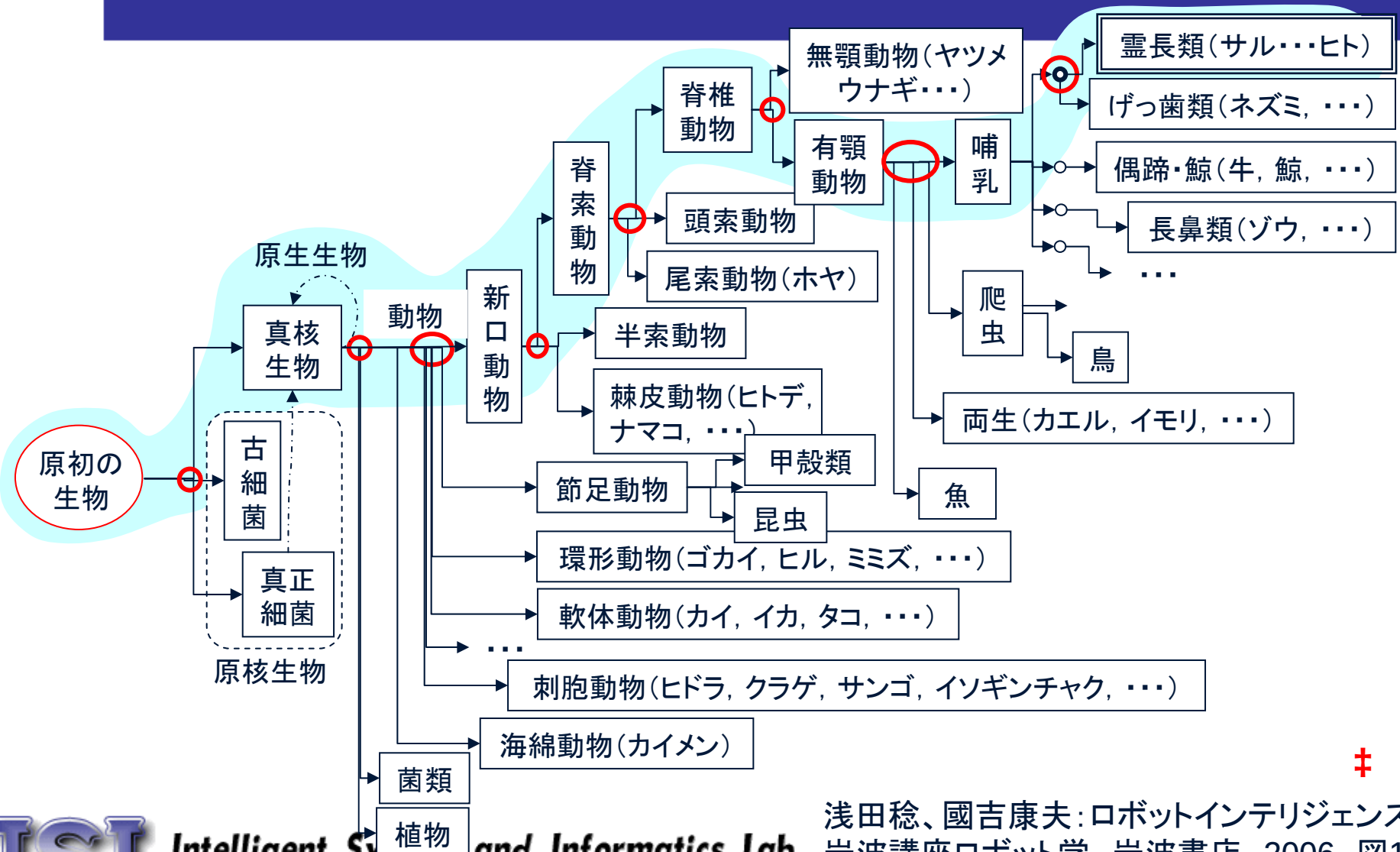
styrofoam  
cubes



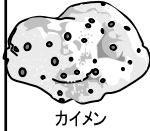
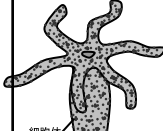
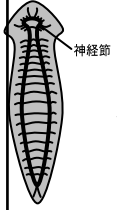
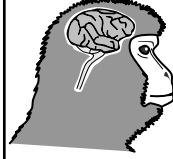
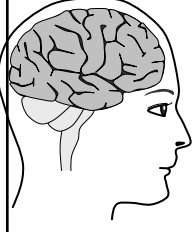
dead  
ants



# そもそも脳はどうやって生まれてきたか：進化の系統樹



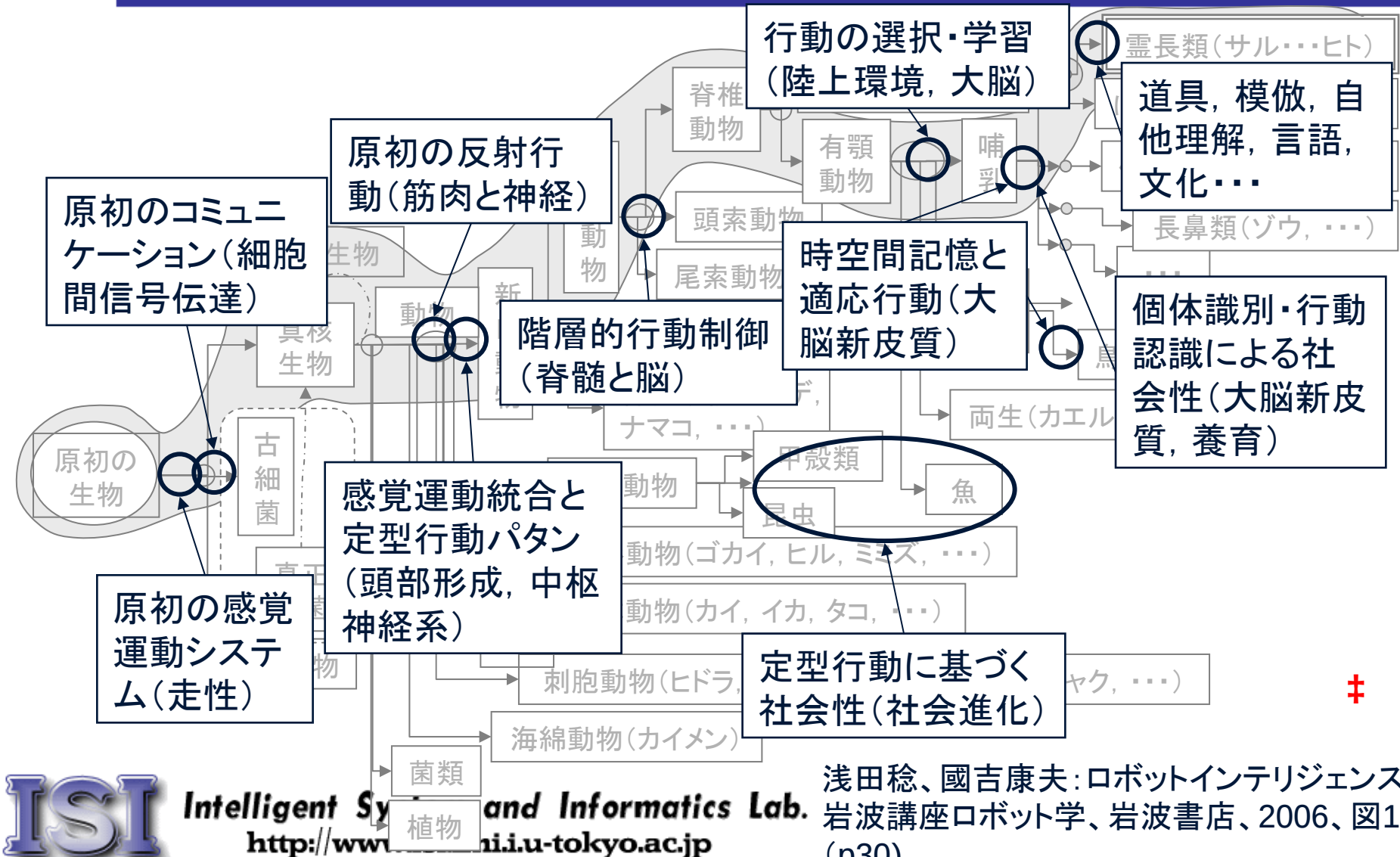
†

|                    |                                                  |                                                                                                                                        |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                          |                                                                                                                     |                                                                                                                                       |
|--------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ヒトへの<br>進化経路       | 単細胞生物<br>原初の感覚運<br>動系と社会性                        | 多細胞化<br>刺激反応性                                                                                                                          | 筋肉と神経<br>の獲得<br>原始的反射                                                                                                    | 頭部の成立<br>神経節の形成<br>感覚運動統合                                                                                                                                                                                                                                 | 脊椎、中枢神経<br>系。複雑な本能<br>行動。階層的制<br>御。                                                                                                                         | 陸棲動物。哺<br>乳類。大脳新<br>皮質。記憶・<br>表象能力。                                                                                                                        | 霊長類登場<br>複雑状況の認<br>識、判断                                                                                                                  | 類人猿登場<br>類推、推論、<br>社会的知性                                                                                            | ヒトの登場<br>抽象能力、言<br>語、教育、文<br>化                                                                                                        |
| 現存生物<br>の例         | 大腸菌、ミド<br>リムシ、粘菌、                                | カイメン                                                                                                                                   | ヒドラ、ク<br>ラゲ                                                                                                              | ミミズ、アメフラシ、<br>イカ、タコ、(昆<br>虫)                                                                                                                                                                                                                              | 魚、カエル、ワ<br>ニ                                                                                                                                                | ネズミ、ネコ、<br>ブタ、(鳥)                                                                                                                                          | サル(マカ<br>ク)                                                                                                                              | ゴリラ、チン<br>パンジー                                                                                                      | ヒト(原人、<br>現代人)                                                                                                                        |
| 自律性<br>行動・認<br>知機能 | 走性。化学/<br>温度/光に反<br>応。養分接近、<br>有害物回避、<br>明暗所選好等。 | 反射の原型。<br>刺激があると<br>全身鞭毛活<br>動停止、水<br>流停止。                                                                                             | 原始的反射<br>触手に触つ<br>た餌を捕食。<br>引っ込め反<br>射?遊泳。                                                                               | 反射、解発機構と定<br>型行動。中枢支配性<br>全身運動。<br>昆虫では適応、記憶<br>、地図、学習機能あ<br>り。                                                                                                                                                                                           | 多様な本能行<br>動:<br>求愛、巣作り、<br>縄張り、卵の世<br>話等。                                                                                                                   | 記憶に基づく<br>行動。認知地<br>図。<br>高度な記憶・<br>学習能力。                                                                                                                  | 樹上行動の為<br>高度な空間認<br>知と運動制御。<br>情報統合。                                                                                                     | 道具の製作と<br>使用、限定的<br>模倣、自己認<br>識、他者の<br>心の推定。                                                                        | 直立二足歩行<br>模倣、抽象思<br>考、言語、創<br>造性、科学、<br>技術、芸術。                                                                                        |
| 社会性                | 伝達物質コ<br>ミュニケー<br>ション、集団<br>同調動作、集<br>合体。        | なし。                                                                                                                                    | なし。                                                                                                                      | 遺伝支配の社会性昆<br>虫あり。個体間定<br>型コミュニケーション。<br>フェロモン等。                                                                                                                                                                                                           | 本能行動支配が<br>優勢。                                                                                                                                              | 本能行動優勢。<br>つがい、養育、<br>群れ、共同狩。<br>順位。                                                                                                                       | 社会的関係認<br>知。個体識別、<br>順位制。グ<br>ルーミング。                                                                                                     | 視線等による<br>意思疎通、動<br>的協調                                                                                             | 多階層的。<br>教育、文化、<br>社会制度、経<br>済。                                                                                                       |
| 身体基本<br>構造<br>生態特徴 | 単細胞。原核<br>/真核。細胞<br>膜栄養摂取。                       | 未分化多細<br>胞。不定形。<br>体壁多小孔。<br>固着性。                                                                                                      | 腔腸(口で<br>摂食・排<br>泄)                                                                                                      | 消化管、口と肛門の<br>区別。頭部が明確化。                                                                                                                                                                                                                                   | 脊椎・内骨格構<br>造。                                                                                                                                               | 陸上生活。四<br>肢発達。胎生。<br>恒温性。夜行<br>性多。                                                                                                                         | 把持適応手指<br>(親指対向配<br>置)。顔。樹<br>状生活多。                                                                                                      | 身体大型化。<br>雑食性(果<br>実、植物、昆<br>虫、動物)                                                                                  | 脊椎湾曲、直<br>立に適応。                                                                                                                       |
| 運動機構<br>感覚器        | 鞭毛モータ、<br>繊毛、蠕動。<br>細胞表面に化<br>学/光受容体<br>等のセンサ。   | なし。小孔<br>内鞭毛で栄<br>養摂取用水<br>流発生。                                                                                                        | 平滑筋、<br>骨格なし。                                                                                                            | 有紋筋(素早い)あ<br>り。<br>節足動物は外骨格リ<br>ンク機構。頭部感覚<br>器(眼、触角等)集<br>中。特定情報抽出感<br>覚器。                                                                                                                                                                                | 四肢獲得。内骨<br>格を多量の筋肉<br>が取り巻く。姿<br>勢維持にも動的<br>協調必要。眼球<br>発達。                                                                                                  | 高度な敏捷性<br>(恒温性によ<br>る活性度向<br>上)、鋭敏な<br>感覚(特に嗅<br>覚、聴覚)                                                                                                     | 手指の発達。<br>高度な視覚。                                                                                                                         | 手指の器用さ。<br>発声の多様化。                                                                                                  | 発音器官(言<br>語音)の発達。<br>表情筋の発達<br>。                                                                                                      |
| 神経系                | なし。受容体<br>から運動系へ<br>の化学的信号<br>伝達あり。              | なし。ガラ<br>ス海綿で膜<br>電位による<br>細胞間伝達<br>あり。<br><br>カイメン | 散在神経系。<br>中枢なし。<br><br>ヒドラ<br>(散在神経系) | 神経節。頭部神経節<br>の優位化。ニューロ<br>ン数10万程度。<br><br>プラナリア<br>(はしご形神経系)<br><br>バタ<br>(はしご形神経系) | 髄鞘化、伝達速<br>度向上。脳-脊<br>髄系確立。CPG、<br>脳幹、小脳、辺<br>縁系。<br><br>カエル<br>(管状神経系) | 小脳と大脳の<br>発達。大脳新<br>皮質の発達。<br>感覚野と運動<br>野形成。聴覚、<br>嗅覚関連領野<br>の発達。<br> | 大脳新皮質の<br>視覚関連領野<br>大幅増大(皮<br>質55%)。連<br>合野の形成。<br> | 前頭葉の大幅<br>な発達。脳全<br>体の大型化。<br> | 前頭前野、頭<br>頂側頭後頭接<br>合部TPO、言語<br>野の大幅な発<br>達。<br> |

ヒドラ、プラナリア、バタ、カエルの図は  
より、改変。マウス、サル、チンパンジー、  
参照した。



# 知能の進化: 環境 × 身体が創りだす情報構造(可能性) ⇔ 神経系



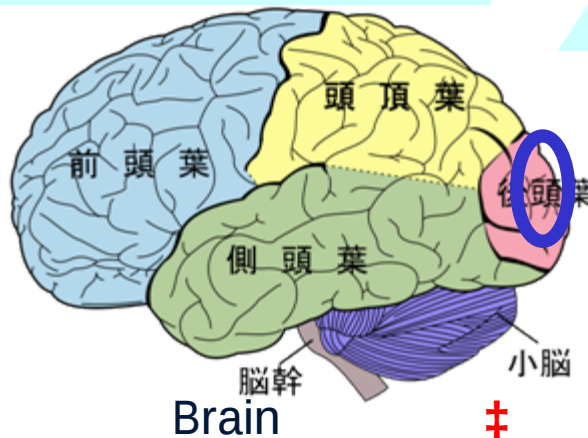
# 身体が脳をつくる！

## 認知構造の創発と発達

**Plasticity &  
Early Development**

Information-Driven  
**Self-Organization**  
Esp. Cerebral Cortex

Emergent Information Structure  
from Embodied Interaction



[http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%94%B%E5%83%8F:Brain\\_diagram\\_ja.png](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%94%B%E5%83%8F:Brain_diagram_ja.png)

# 創発・発達の構成論

浅田稔、國吉康夫: ロボットインテリジェンス、

岩波講座ロボット学、岩波書店、2006、図1.6(p22)

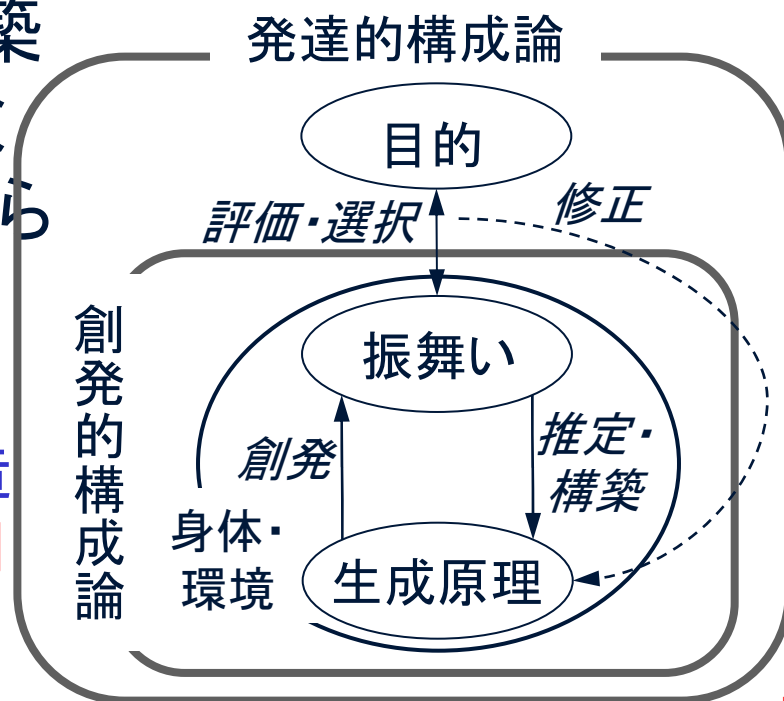
知的行動の見かけをそのまま作ろうとするのではなく、余計なものを剥ぎ取って、知的行動の発生と変化の最も基本的な原理を見極め、それを実際の環境中に構築し、行動し発達する様子を実験し、原理にフィードバックしながらスケールアップしていく

知能創発・発達の基本原理:

1. 身体性＝身体が形作る情報構造
2. その情報構造を発見・獲得・利用する機構

知能を創る

仕組みを理解



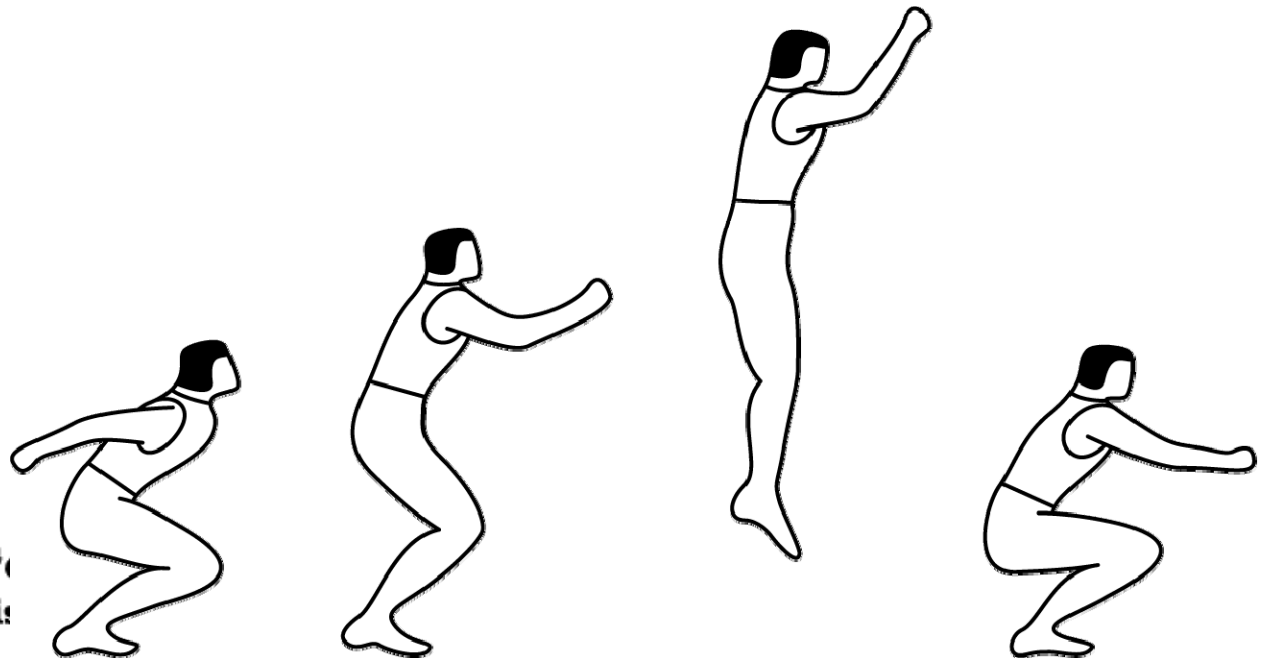
# 脳を完全に取り去った身体の「賢さ」

# 跳躍・着地：身体性知能

新山・國吉 05-06

- 跳躍・着地
  - 極めて速い&ダイナミック – フィードバック制御困難.
  - 地面との相互作用 – モデル化・予測が困難.
  - 身体動力学の役割が大きい.活用が不可欠.
- 賢さ：上記のもとで，安定に跳躍着地する.

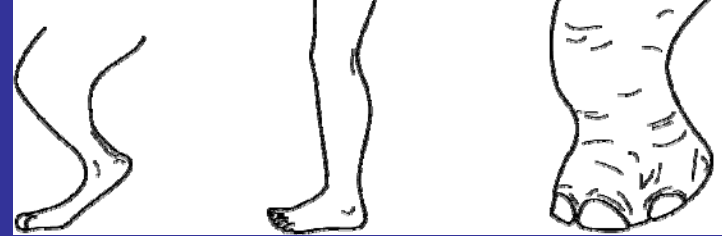
Ryuma Niiyama, Akihiko  
Nagakubo, Yasuo, Kuniyoshi:  
“Mowgli: A Bipedal Jumping  
and Landing Robot with an  
Artificial Musculoskeletal  
System”, Proc. 2007 IEEE  
International Conference on  
Robotics and  
Automation, ThC5.2 ,  
2007/4/12 , Rome, Italy. Fig.1





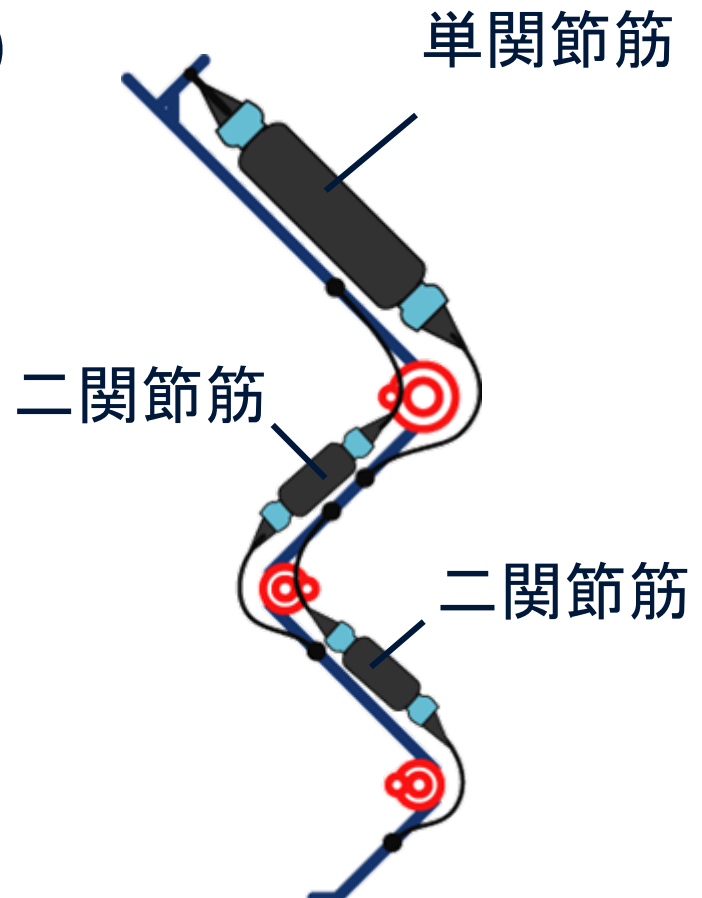
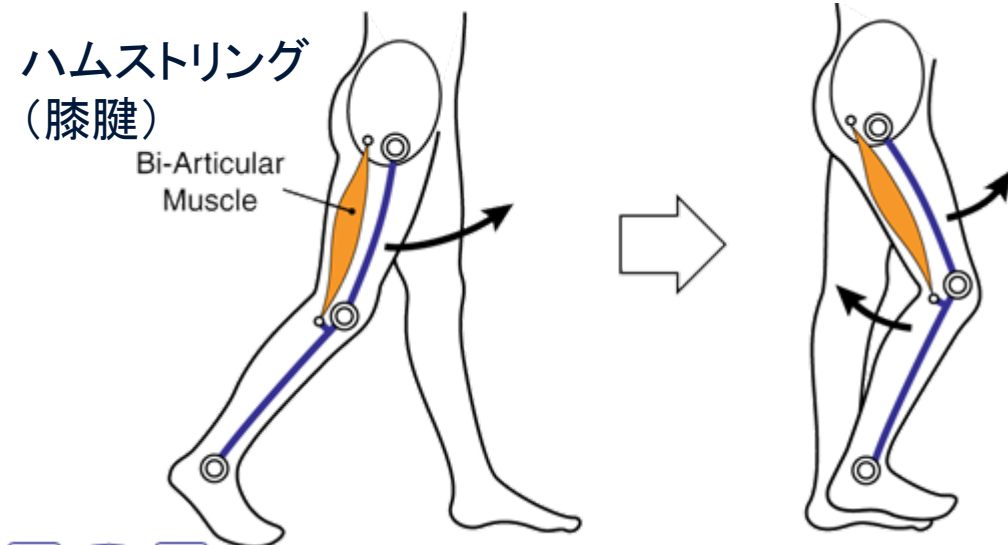
# 脚のバイオメカニズム

新山・國吉 05-06



## ■ 身体構造⇒自然な動き

- 二関節筋 (Bi-Articular Muscles)
- 空気圧人工筋 (McKibben pneumatic actuators)
- 各部の寸法・質量分布



# Jumping & Landing: MOWGLI

Niiyama & Kuniyoshi 05-06



ISI

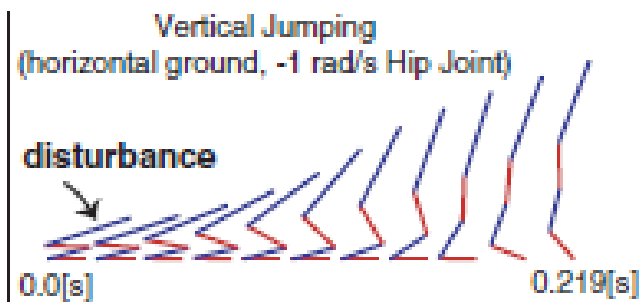
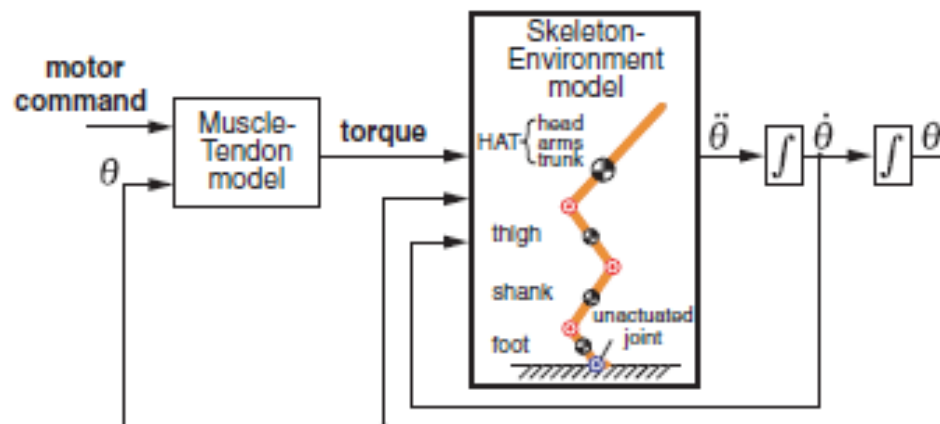
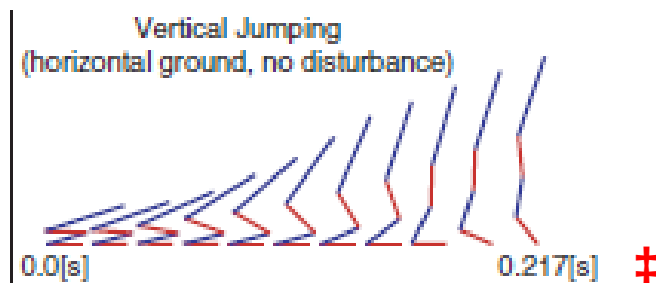
新山龍馬, 國吉康夫: 筋骨格系のバイオメカニクスに基づく跳躍・着地ロボットの開発, 第11回ロボティクス・シンポジウム, 1C1, pp.50-55, 佐賀, March, 2006.

# 身体の「賢さ」

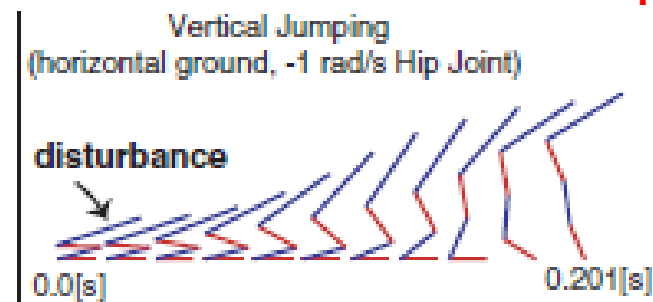
Ryuma Niiyama, Akihiko Nagakubo, Yasuo, Kuniyoshi: "Mowgli: A Bipedal Jumping and Landing Robot with an Artificial Musculoskeletal System", Proc. 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ThC5.2, 2007/4/12, Rome, Italy. Fig.10, 11

## ■ 外乱適応性

外乱なしの動き(筋肉=モータ)



With Disturbance



筋肉の場合(二関節筋含む)

関節モータの場合(二関節筋なし)

# コツと目の付け所 — 身体性の情報構造 — 人間型身体を有するものたちに共 有される情報構造とは？

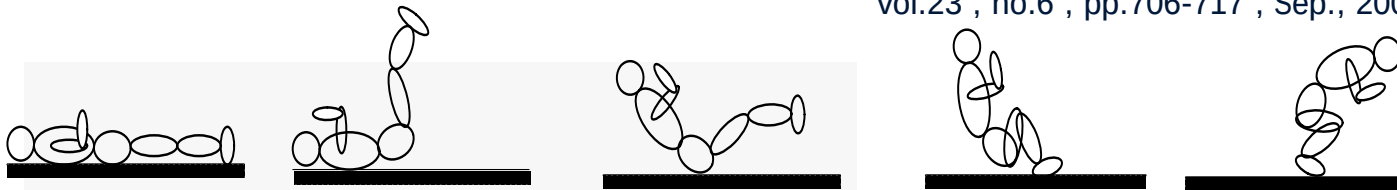
身体—環境相互作用から創発する情報構造  
脳が扱う情報構造  
模倣・教示において伝達される情報

「一旦コツを会得すれば、いとも簡単に確実に作業をこなせる。」  
「もの覚えのよい人は、目の付け所がよい」  
→誰もが思っていることだが、  
人間の知能の原理に関わる重要な現象

# “Roll-and-Rise” Motion

## -- An example emphasizing “knacks”

國吉康夫, 大村吉幸, 寺田耕志, 長久保晶彦: 等身大ヒューマノイドロボットによるダイナミック起上がり行動の実現, 日本ロボット学会誌, vol.23, no.6, pp.706-717, Sep., 2005. Fig.1 の変形(p707)



- 身体動力学を活かし, 巧みさが要求される.
- 完全なモデル化が不可能(劣駆動, 強い外乱)
- 制御の切り換えが必要(複数ダイナミクス)
- リミットサイクルでない. 発散含む. 目標到達型.



# Non-Uniform Trajectory Bundle

T. Yamamoto and Y. Kuniyoshi 02

相空間(ここでは膝一腰関節角空間)軌道が  
収束する領域と分散する領域がある.

足裏着地  
(収束)

ここにあった図版は、  
著作権処理の都合上、  
削除いたしました。  
ご了承ください。

脚の振上げ・振下ろし  
(分散)



# 非一様な収束点

K. Terada and Y. Kuniyoshi 04

ここにあった図版は、  
著作権処理の都合上、  
削除いたしました。  
ご了承ください。

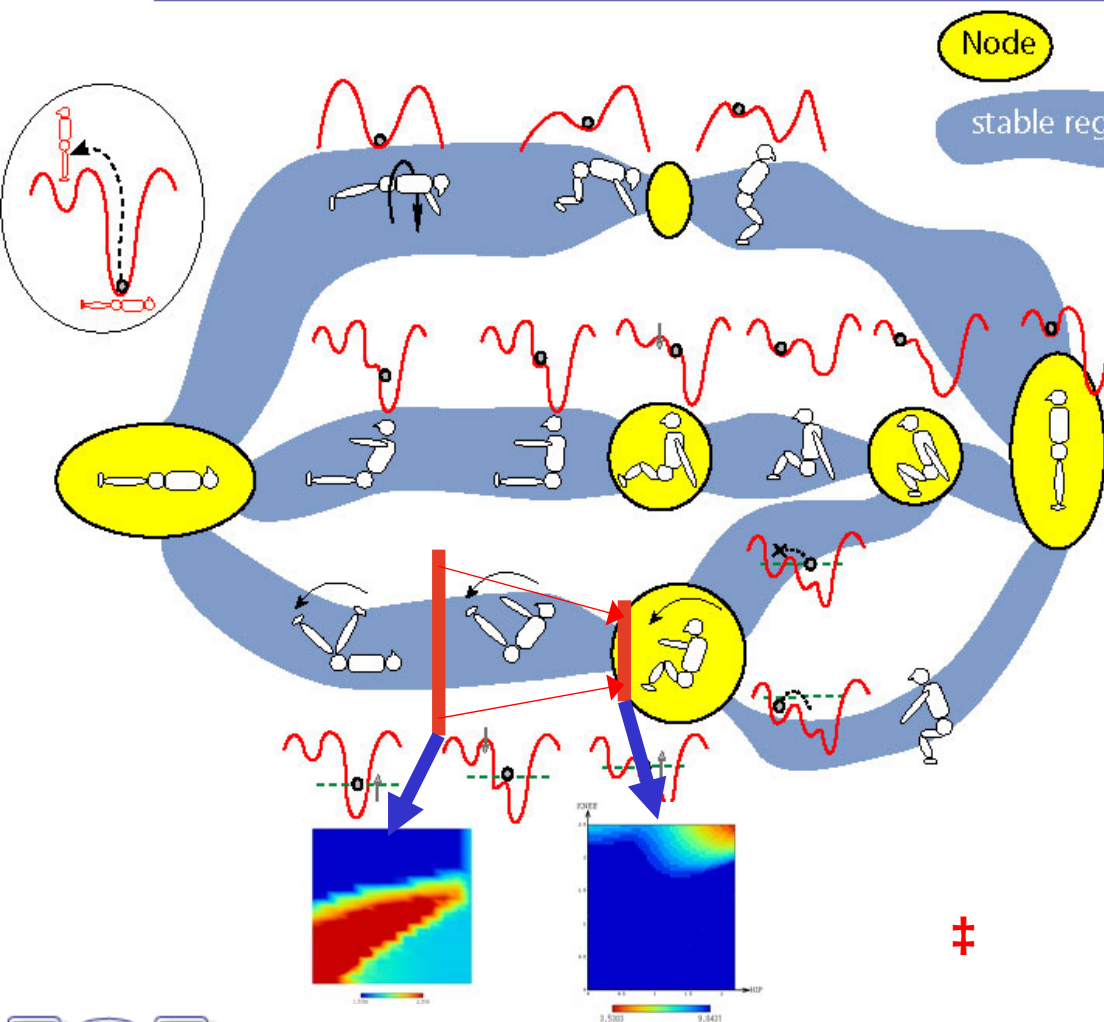
エントロピー

情報量



# 大域動力学 → ツボ

## (身体性情報構造)



“ツボ” ● ← “コツ”

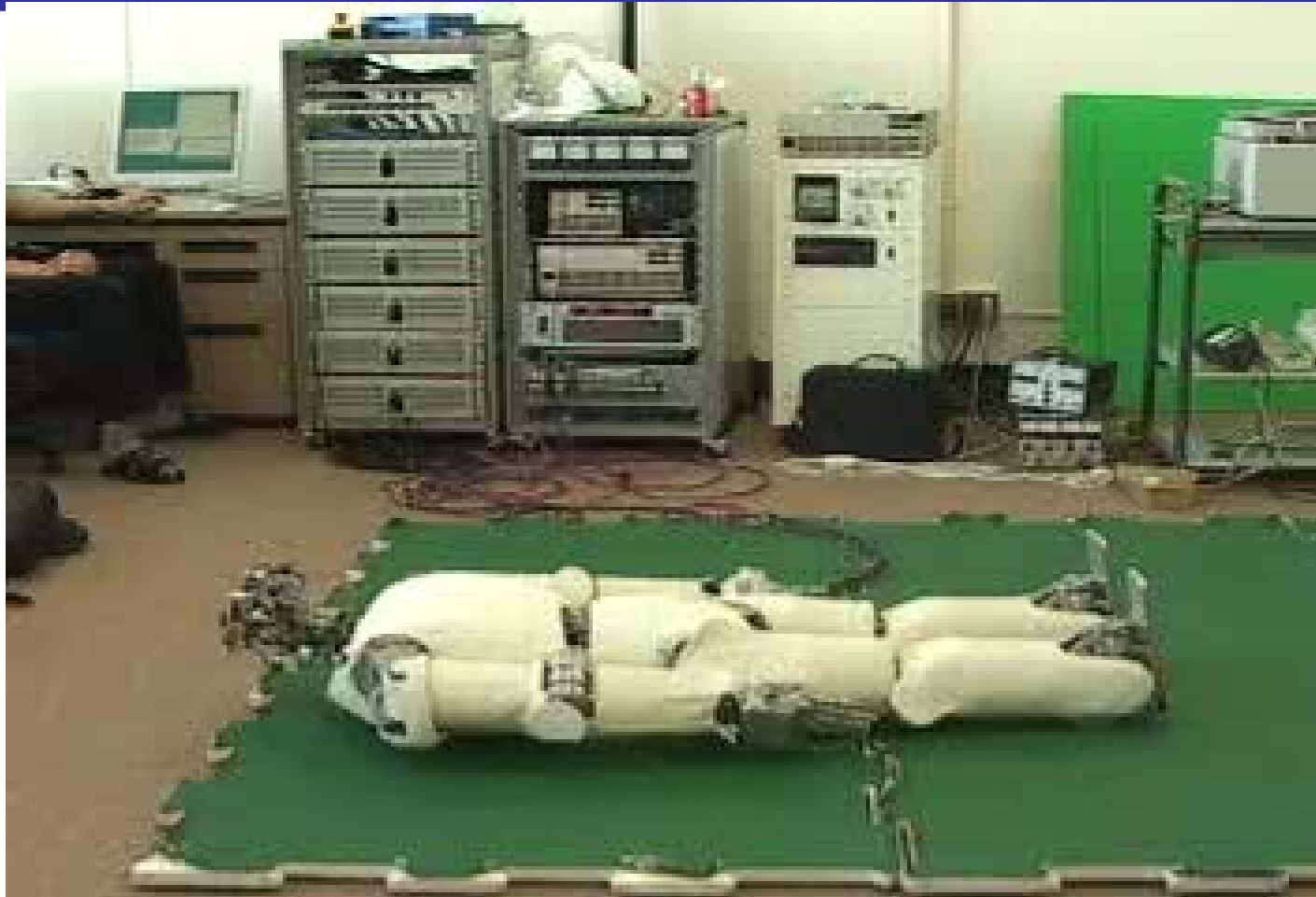
- 情報の集中点
- 外乱に対し安定
- 適応と安定の両立
- 身体・環境・目標から創発
- 「人間型」に共有される記号的情報.

≠

國吉康夫, 大村吉幸, 寺田耕志, 長久保晶彦: 等身大ヒューマノイドロボットによるダイナミック起上がり行動の実現, 日本ロボット学会誌, vol.23, no.6, pp.706-717, Sep., 2005. Fig.3 の変形(p709)

# Success! – Rising in 2secs.

Ohmura, Terada & Kuniyoshi 03



Yasuo Kuniyoshi, Yoshiyuki Ohmura, Koji Terada, Akihiko Nagakubo:  
Dynamic Roll-And-Rise Motion By An Adult-Size Humanoid Robot,  
International Journal of Humanoid Robotics, vol.1, no.3, pp.497-516, 2004.

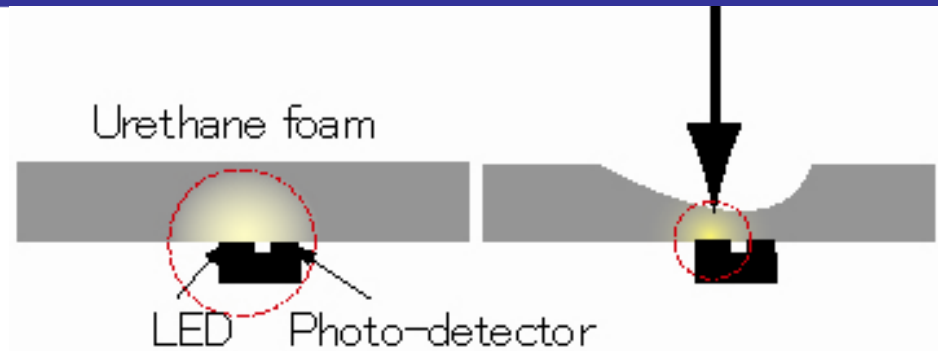
# 触覚センサ

大村, 長久保, 瀬田, 國吉 2005

Yoshiyuki Ohmura, Yasuo Kuniyoshi, Akihiko Nagakubo: Conformable and Scalable Tactile Sensor Skin for Curved Surfaces, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1348-1353, 2006.

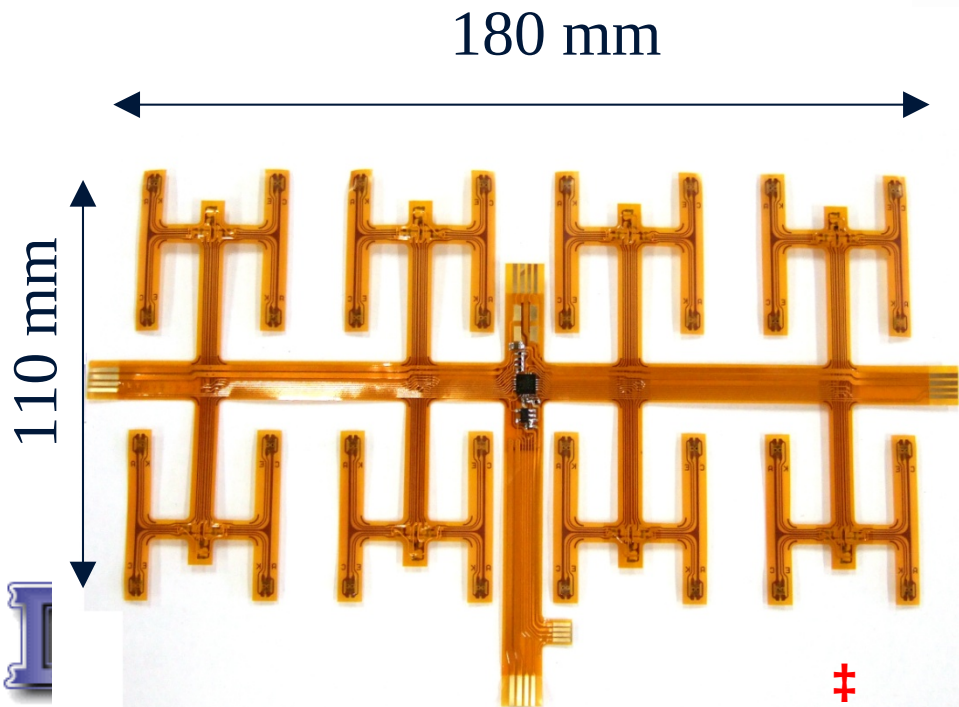
Fig.1(p1349), 6(1351)

小型触覚センサ  
切り貼り実装

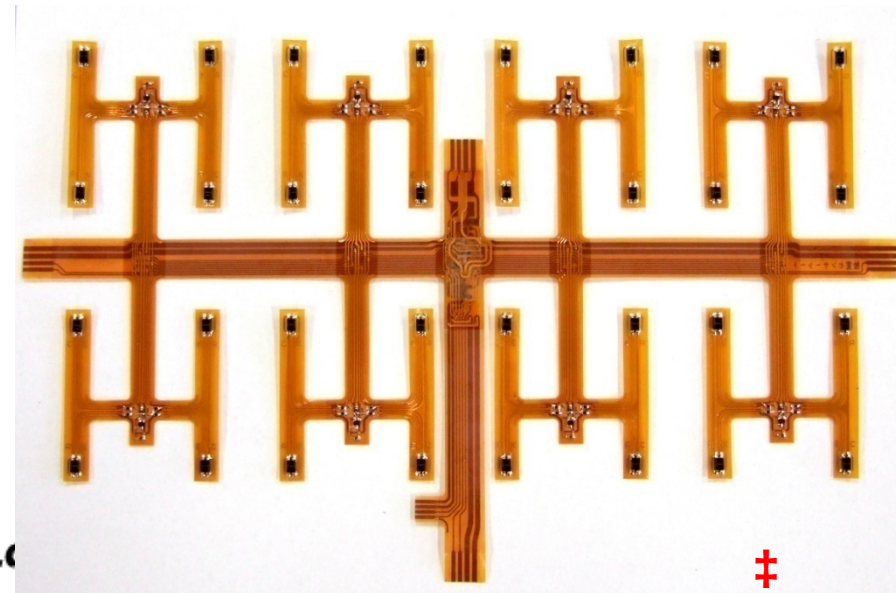


光拡散方式

✦



✦

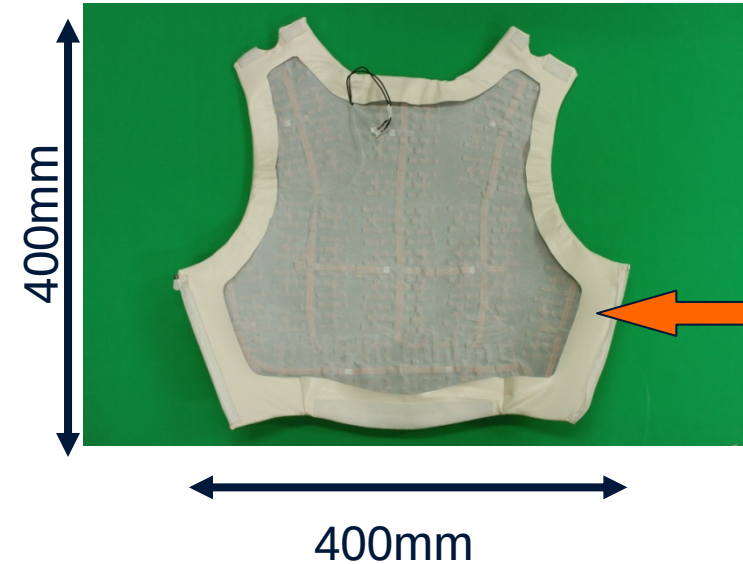


✦

# ヒューマノイドへの実装

大村, 國吉 2006

## 柔らかい触覚皮膚(人間密着指向への布石...)



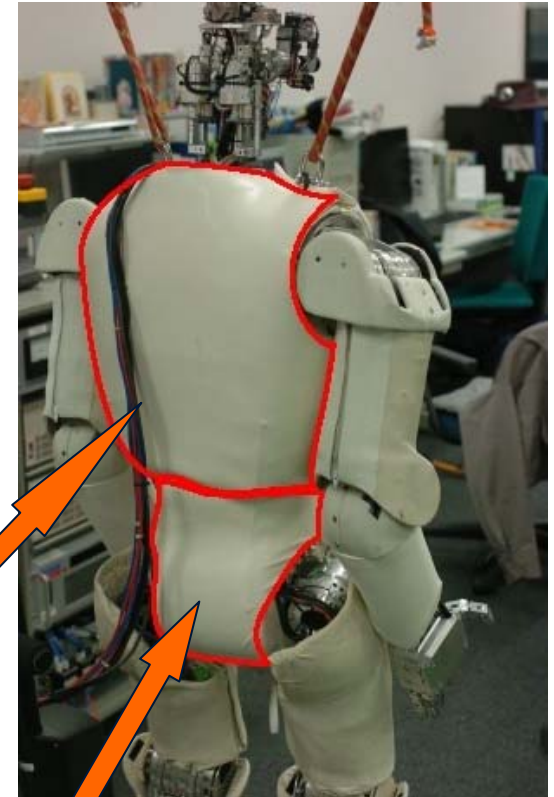
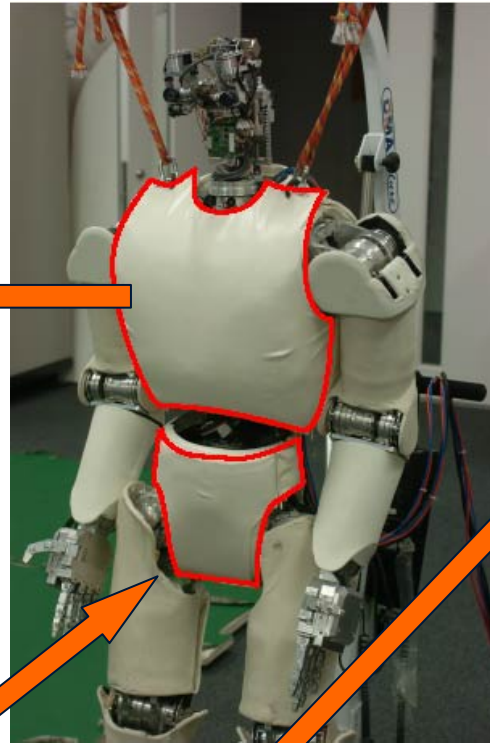
胴体用触覚皮膚  
(192点)

股間  
(62点)

背中  
(308点)

臀部  
(150点)

足裏  
各56点

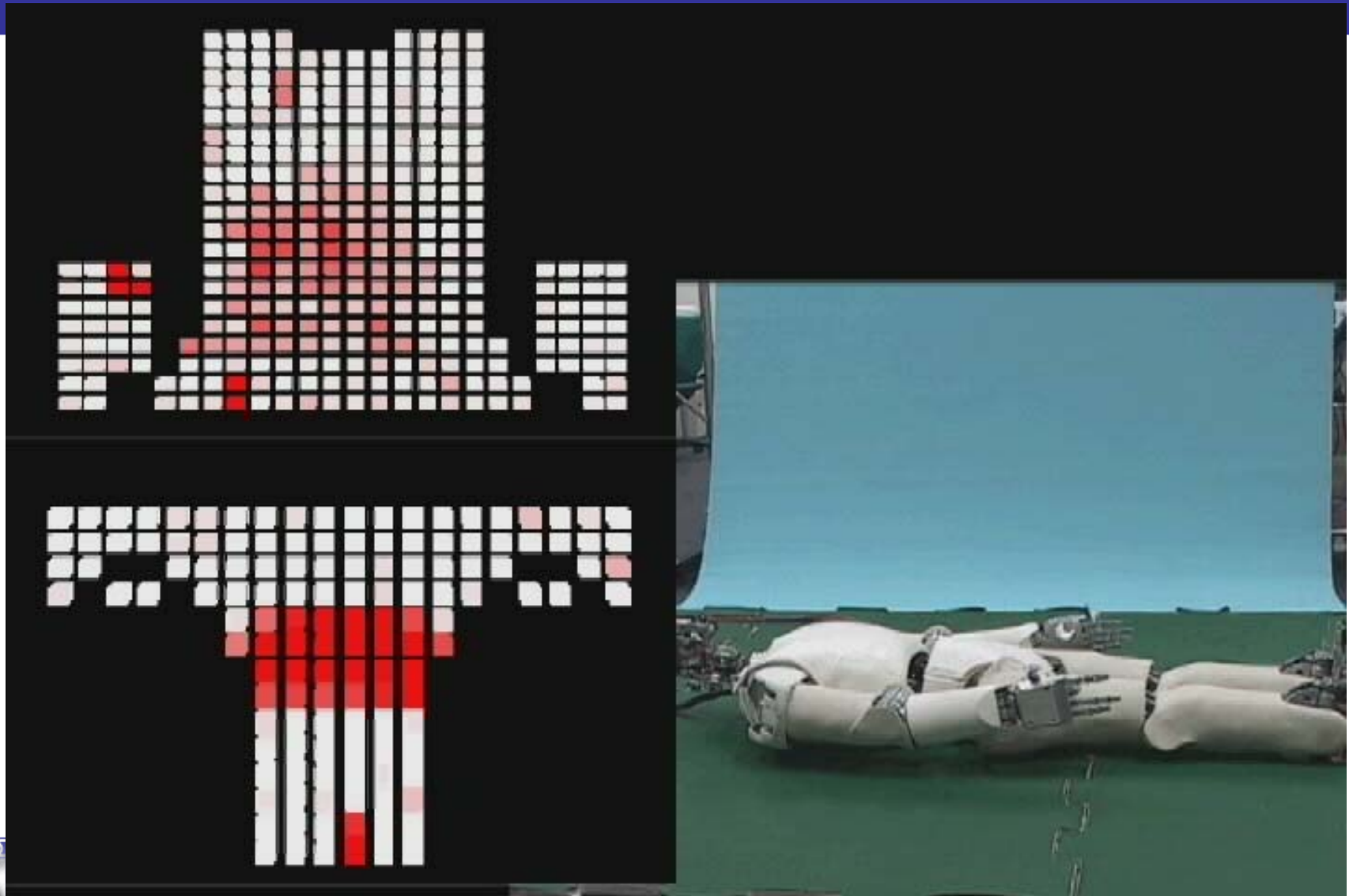




# 起き上がり動作実験

大村, 國吉 2006

大村吉幸, 國吉康夫: 分布触覚を利用したヒューマノイドの動的起き上がり動作,  
第24回日本ロボット学会学術講演会, CD-ROM, 2H22, 2006.





# Temporal focuses in understanding actions 行動認識の「目の付け所」

Yasuo Kuniyoshi, Yoshiyuki Ohmura, Koji Terada, Akihiko Nagakubo, Shin'ichiro Eitoku, Tomoyuki Yamamoto: Embodied Basis of Invariant Features in Execution and Perception of Whole Body Dynamic Actions --- Knacks and Focuses of Roll-and-Rise Motion, Robotics and Autonomous Systems, vol.48, no.4, pp.189-201, 2004.

# When do you know it's action X?

## Temporal localization of action information

ここにあった図版は、  
著作権処理の都合上、  
削除いたしました。  
ご了承ください。

# When do you know it's action “X”?

## Temporal localization of action information

Eitoku&Kuniyoshi 04

- 30S's (M23,F7)
  - 64 trials
- =2 performers x (2 succ.+ 2fail.) x 8 samples (diff. Length).
- Random display
  - Guess succ./fail.

ここにあった図版は、  
著作権処理の都合上、  
削除いたしました。  
ご了承ください。

情報の流入⇒  
正答率増大  
(エントロピー  
減少)

ここにあった図版は、  
著作権処理の都合上、  
削除いたしました。

ご了承ください。

ここにあった図版は、  
著作権処理の都合上、  
削除いたしました。

ご了承ください。

# 第1のまとめ

- 身体と環境の物理的相互作用が、情報を産み出す.
- 人間が互いの振る舞いを理解できたり、言葉で通じ合えることの根本原理を探っていくと、行動や概念がなぜ人々の間で共通性を持つか、という問題に直面します. その一番根底では、身体の類似性が大きな意味を持っていることがわかってきました.

# 身体が脳をつくる

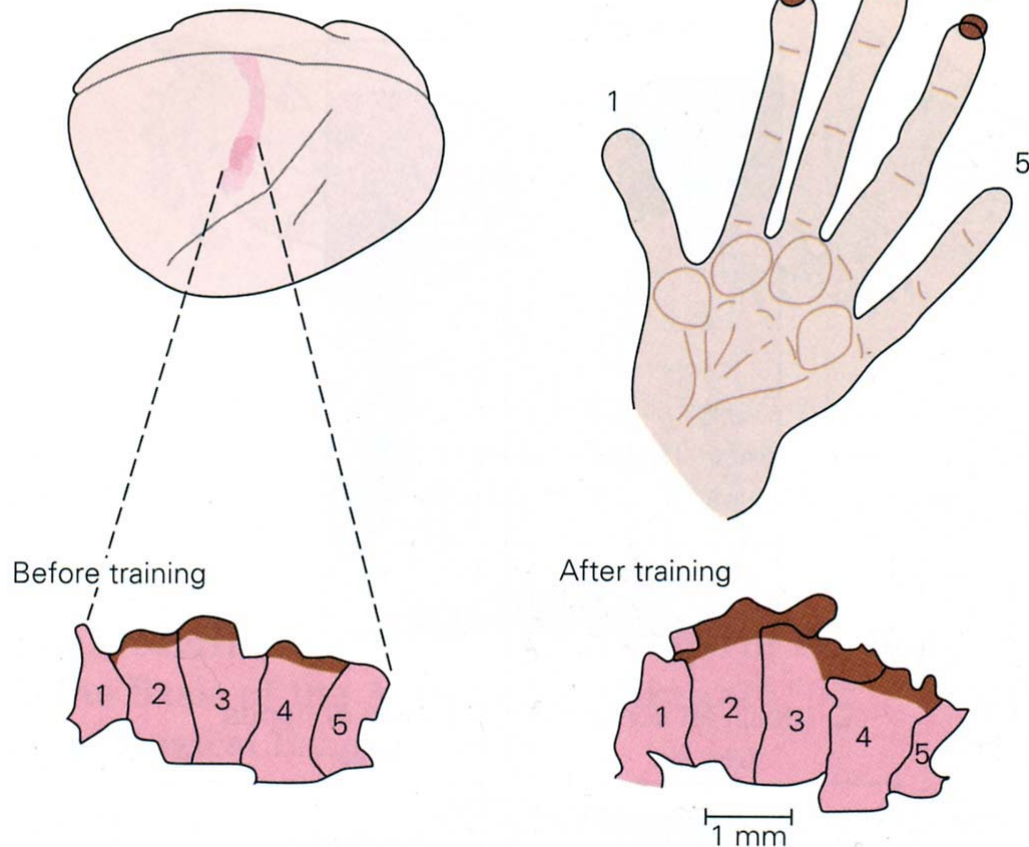
- 初期発達期の神経投射形成は活動依存性を有し[Crair 1999],
- 大脳皮質のコラム構造は自己組織モデルで説明できる.
- 体性感覚野はじめ多くの脳内表現の可塑性
- 制御遺伝子ネットワークを介して環境要因と遺伝子発現が相互作用. 遺伝子プログラムによる一方的支配という発達観は成立しない[リドレー 2004]. 個体の行動と学習はこの相互作用の一翼を担い, 当然に発達を左右する.
- 「言語遺伝子」として話題になったFOXP2は, 実は運動制御機能を司り, それが言語発達に作用する可能性が指摘されている[Johnson 2005].
- 運動制御の発達遅滞が自閉症の一因との説も.



# 体性感覚マップの可塑性

- サル: 指切断や神経切断にマップが変化: 隣接領域が入り込む。
- 2本指縫合により、境界消滅。
- ヒト: 先天癒着を分離10日後、指地図変化(脳誘発磁図)
- サル: 指先使う訓練後、領域拡大(右図)
- 弦楽奏者の左指領域大きい

A Cortical representation of fingers



# 仮説

- 身体・環境相互作用の構造が、神経系の自己組織化をガイドし、認知機構の構築に深く関与
  - 身体・神経系の大局構造は遺伝子支配、認知機能は情報駆動自己組織化.
  - 上記構造を探索し顕在化させ、学習・自己組織化に反映する仕組みを明らかにする.
- 運動機能の発達は、全ての認知機能の基盤
  - 運動により、一貫性ある学習情報が発生.
  - 運動随伴感覚は超様相的整合性を持つ.

# 胎児期の知覚・行動・学習

- 自発運動(Generalized movement):
  - 受胎後2ヶ月から. (Kisilevsky&Low98, Joseph00)
- 視覚:
  - 開眼: 受胎後20週から(Lecanuet&Schaal96), 34週で時間率40% (Birch&O' Conner01).
  - 光: 外光(赤)の10%が胎内に届く(動物で, Jacques et al.87)
  - 網膜: 受胎後7月で全細胞層形成, 30週で中間周辺視野が機能開始.
  - 視神経: 28週までに形成.
  - 認識: 32週(8月)の未熟児で選好注視
- 適応(学習?):
  - 馴化脱馴化: 音響信号に対する胎児の身体運動反応で観察(Madison et al 86).
  - 胎児期の刺激連合が出生後にも影響(Lecanuet&Schaal96).
- 神経回路網の相互結合性:
  - 胎児の脳では, 多量のランダム結合あり. 出生期付近にピーク. (Rakic et al.86)

# 胎児・新生児身体モデル

Sangawa & Kuniyoshi 05

- 筋骨格系 (筋198本)
- 筋肉特性モデル (He et al. 01, Hill 38)
- 寸法, 質量, 慣性を文献ベースに設定
- 関節可動限界, 自然位置の設定
- 成長する! ? (パラメータ: 週齢).

$$\frac{dq}{dt} = 18.8496(m - q)$$

$$u = \frac{q^2}{30^2 + q^2}$$

$$\frac{da}{dt} = 22(1 - 0.51a)^2(u - a)$$

ここにあった図版は、  
著作権処理の都合上、  
削除いたしました。

ご了承ください。

ここにあった図版は、  
著作権処理の都合上、  
削除いたしました。

ご了承ください。

# 中枢神経系の部分モデル

Sangawa & Kuniyoshi 06

SomatoSensory-Motor Area Model

Medulla Model

Spine Model

Sensory Organs Models

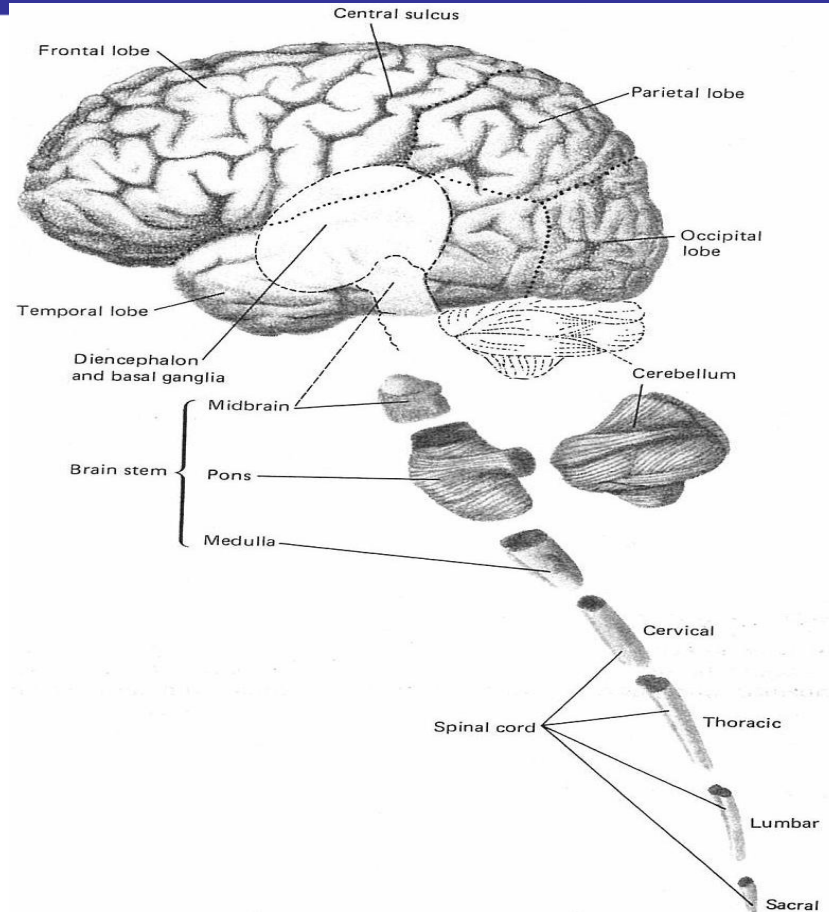


Fig. 1-2 The parts of the central nervous system. ‡

Eric R. Kandel (Editor), James H. Schwartz (Editor), B. Andrew Mudryk: Principles of Neural Science, London : Edward Arnold , 1981, ISBN: 0-444-00651-6.

# Spine Model

Sangawa & Kuniyoshi 06

Yasuo Kuniyoshi and Shinji Sangawa, Early Motor Development from Partially Ordered Neural-Body Dynamics -- Experiments with A Cortico-Spinal-Musculo-Skeletal Model, Biological Cybernetics, vol. 95, no. 6, pp. 589-605, Dec., 2006. Fig.7 の一部(p.597)

## ■ Stretch Reflex( Spindle $\rightarrow$ Ia $\rightarrow$ $\alpha$ $\rightarrow$ Muscle $\rightarrow$ Spindle)

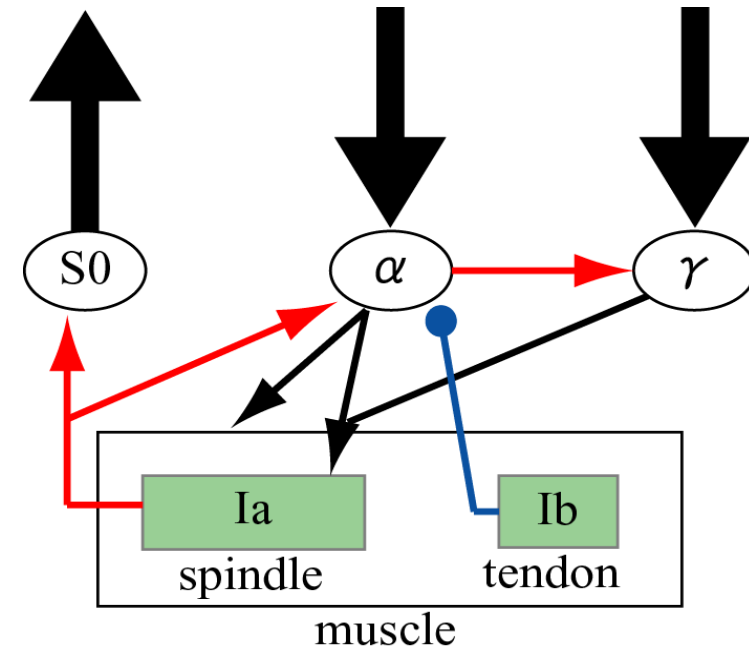
- Regulate muscle length.
- Postural control.

## ■ Ib inhibition( Tendon $\rightarrow$ Ib $\rightarrow$ $\alpha$ $\rightarrow$ Muscle $\rightarrow$ Tendon)

- Regulate muscle tension.

## ■ $\alpha$ - $\gamma$ linkage

- Simultaneous activation of  $\alpha$  and  $\gamma$ .
- Override feedback loop of stretch reflex.
- More force on contracted muscles.  
 $\rightarrow$  **Voluntary motion.**



Spinal neurons transfer function (He et al. 01):

$$\frac{o(s)}{i(s)} = \frac{1.5 \cdot \left(1 + s/33 + (s/33)^2\right)}{1 + 2(s/58) + (s/58)^2}$$

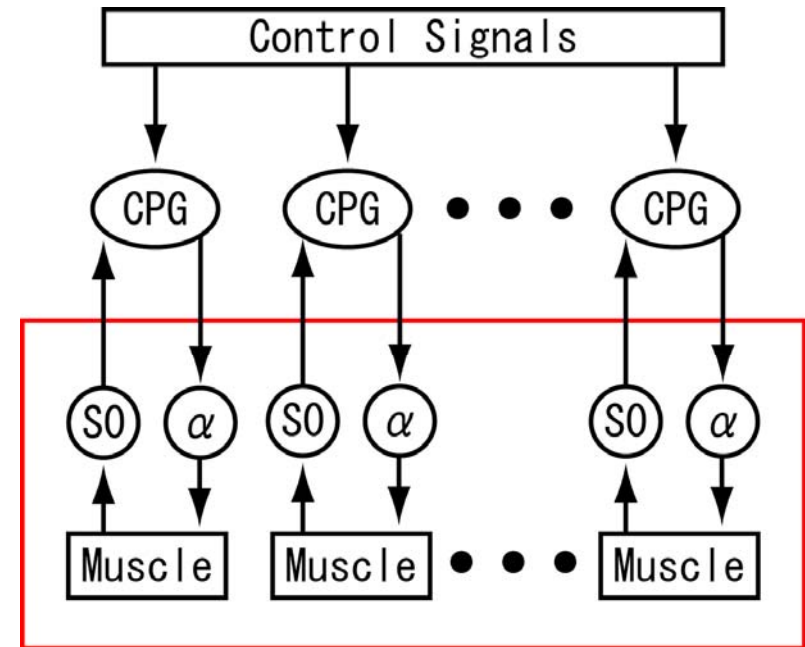


# Medulla Model

Sangawa & Kuniyoshi 06

Yasuo Kuniyoshi and Shinji Sangawa, Early Motor Development from Partially Ordered Neural-Body Dynamics -- Experiments with A Cortico-Spinal-Musculo-Skeletal Model, Biological Cybernetics, vol. 95, no. 6, pp. 589-605, Dec., 2006. Fig.3(p.593)

- Each neuron controls 1 muscle.
- No direct coupling between CPG's
- CPG coupling through the body.
- Periodic/chaotic movement depending on inputs (constant + M1 signal).



Body Coupling

$$\frac{dx}{dt} = c \cdot \left( x - \frac{1}{3}x^3 - y + in_{control} \right) + \delta \cdot (Ia - x)$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{1}{c} \cdot (x - b \cdot y + a) + \varepsilon \cdot Ia$$

$in_{control}$  : Control input.

$Ia$  : Spindle output.

$x$  : Muscle activation,

# Chaotic motor exploration

Sangawa & Kuniyoshi 06

- Coupled CPG's generate periodic / chaotic signals (Asai 03).
  - Periodic for uniform control inputs.
  - **Chaotic** for non-uniform control inputs.
- Motor exploration by couple chaotic system (Kuniyoshi&Suzuki 04)
  - Coupling of chaotic elements via embodiment.

$$\frac{dx_1}{dt} = c \cdot (x_1 - \frac{1}{3}x_1^3 - y_1 + z_1) + \delta \cdot (x_2 - x_1)$$

$$\frac{dy_1}{dt} = \frac{1}{c} \cdot (x_1 - b \cdot y_1 + a) + \varepsilon \cdot x_2$$

**1CPG**

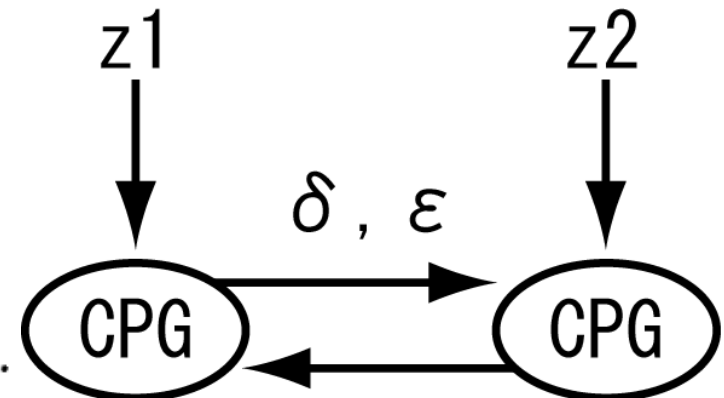
$$\frac{dx_2}{dt} = c \cdot (x_2 - \frac{1}{3}x_2^3 - y_2 + z_2) + \delta \cdot (x_1 - x_2)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = \frac{1}{c} \cdot (x_2 - b \cdot y_2 + a) + \varepsilon \cdot x_1$$

**1CPG**

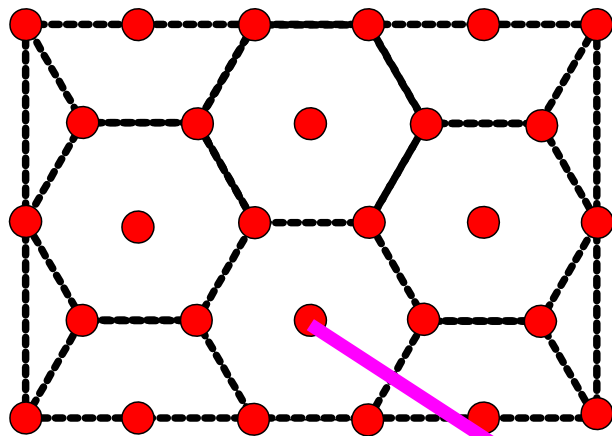
BVP eq.

$z_1, z_2$  : Control inputs.



# S1およびM1のダイナミクス

Yasuo Kuniyoshi and Shinji Sangawa, Early Motor Development from Partially Ordered Neural-Body Dynamics -- Experiments with A Cortico-Spinal-Musculo-Skeletal Model, Biological Cybernetics, vol. 95, no. 6, pp. 589-605, Dec., 2006. Fig.6(p.596)



S1

$$\frac{du_i}{dt} = G_u \left( -C_u \cdot u_i + \frac{\prod_{j \in S0} in_{ij}}{\sum_{k \in S1} \prod_{j \in S0} in_{kj}} + \sum_{k \in S1} inn_{ik} \right)$$

$$in_{ij} = \begin{cases} 1 - |y_j - w_{ij}| & (|y_j - w_{ij}| < 1.0) \\ 0.0 & (|y_j - w_{ij}| \geq 1.0) \end{cases}$$

$u_i$  : S1のニューロン*i*の活動電位

$in_{ij}$  : S0のニューロン*j*からS1のニューロン*i*への入力

$inn_{ik}$  : 隣接するS1のニューロン*k*からの入力

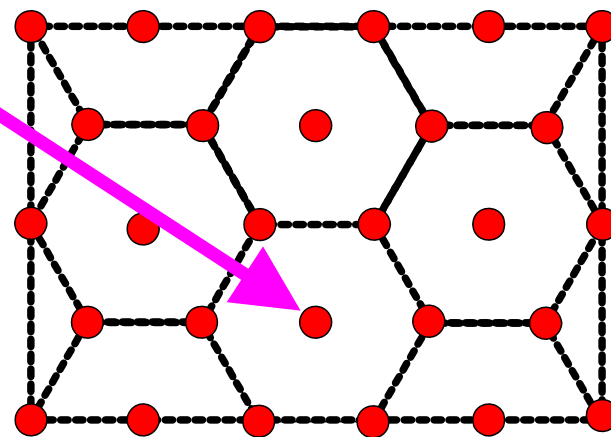
‡

$$\frac{du_i}{dt} = G_u \left[ -C_u \cdot u_i + w_{S1toM1} \left( y_j + \sum_{k \in S1} y_k \right) \right]$$

$u_i$  : M1のニューロン*i*の活動電位

$y_j$  : M1のニューロン*i*に対応するS1のニューロン*j*の出力

$y_k$  : S1のニューロン*j*と隣接するニューロンの出力



M1

‡

# ニューロン基本動作

## ■ 入力:

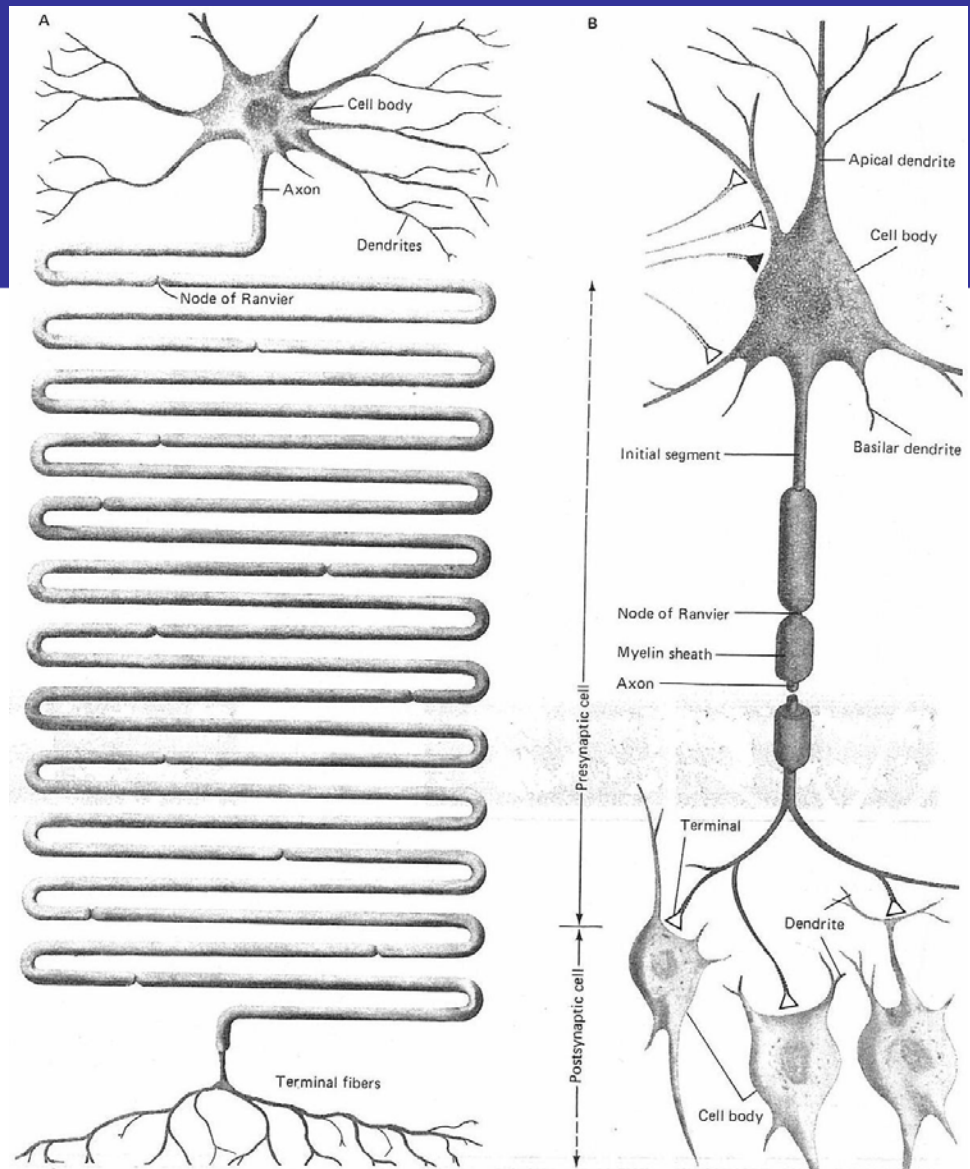
- シナプス→樹状突起
- シナプス効率, 重み (synaptic efficacies, weight)

## ■ 統合:

- 総和
- 細胞体(cell body)
- 膜電位(membrane potential)

## ■ 出力:

- 閾値(threshold)
- 軸索(axon)
- 活動電位(action potential)



Eric R. Kandel (Editor), James H. Schwartz (Editor), B. Andrew Mudryk: Principles of Neural Science, London : Edward Arnold , 1981, ISBN: 0-444-00651-6. Fig.2-2

# ニューロンモデル

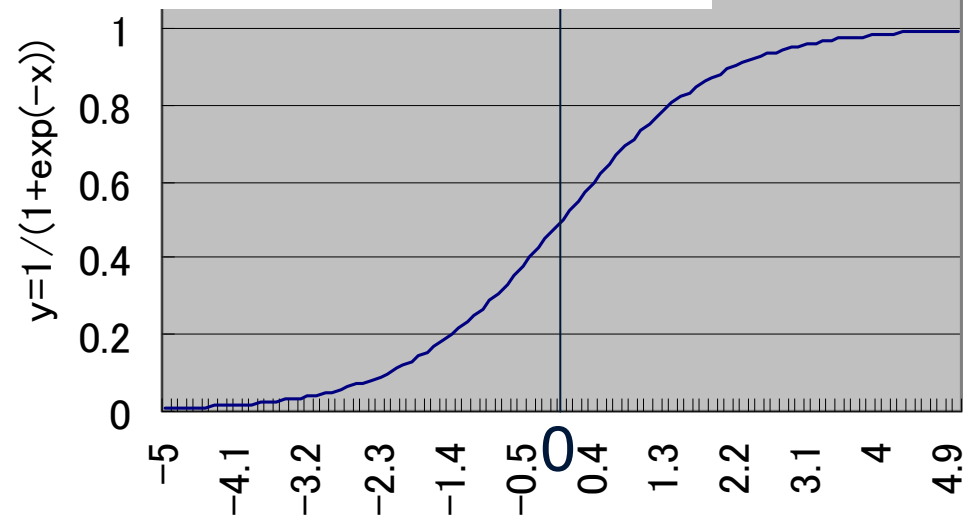
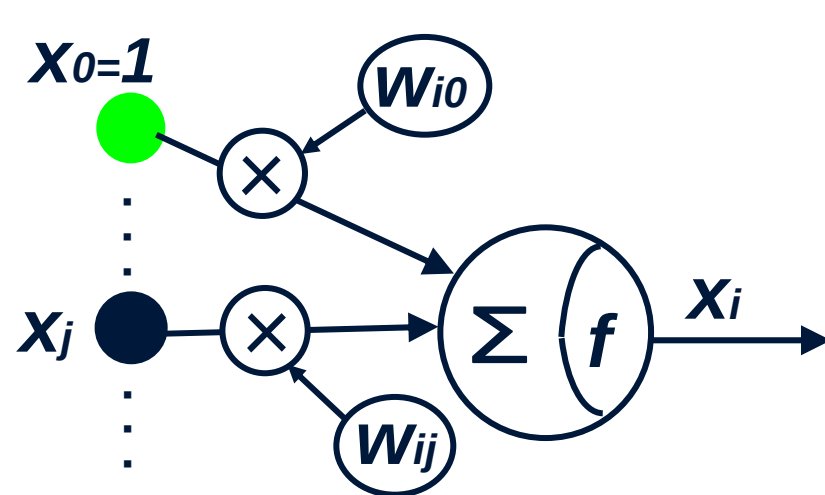
$x_j$ : ニューロン $j$ の出力値, ( $x_0$ : ニューロン $i$ 用バイアスノード)

$w_{ij}$ : ニューロン $j$ から $i$ への結合荷重 (シナプス荷重)

$u_i = \sum_j w_{ij} x_j$ : ニューロン $i$ の内部ポテンシャル

$x_i = f_i(u_i)$

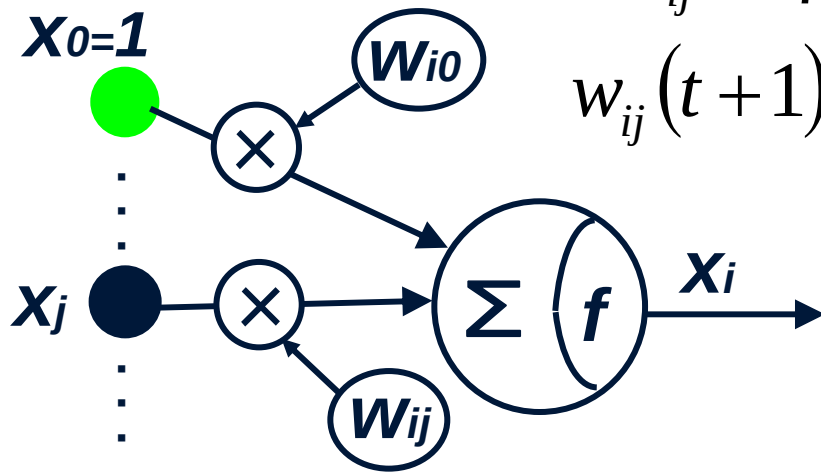
$f_i(u) = \begin{cases} \alpha u & \text{: 線形} \\ 1(u - \theta_i) & \text{: 単純閾値関数} \\ \frac{1}{1 + e^{-\beta_i u}} & \text{: シグモイド(sigmoid)関数} \end{cases}$ 
 または  
 または



# ニューロンモデルと学習

- Hebb学習: 2個のニューロンが同時に活性化すると, その間の結合が強化される
- 相関学習

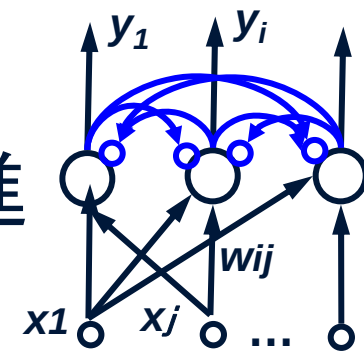
$$\Delta w_{ij} = \eta \cdot x_j \cdot x_i, \quad 0 < \eta = \text{学習効率}$$
$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij}$$





# 側抑制

- Mexican-hat function
- クラスタ化(似たモノを集める)を促進



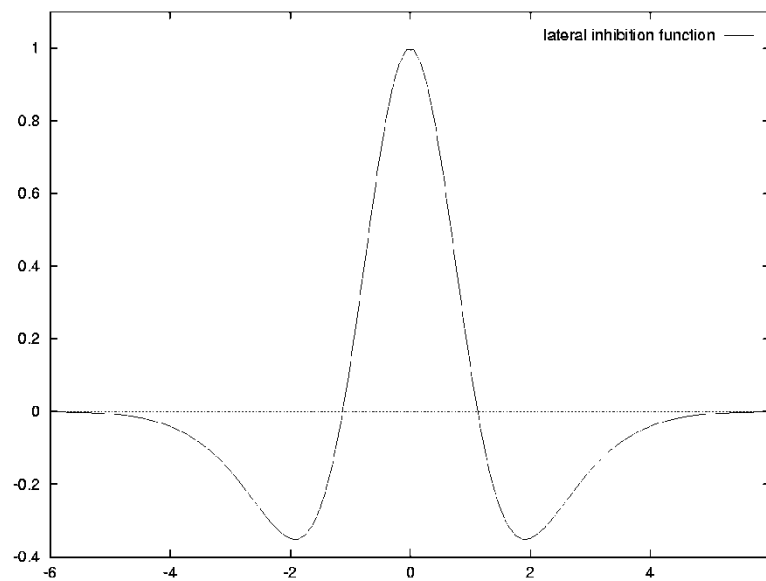
$$w_{ji} = (E + 1) \exp\left(-\frac{|i-j|^2}{2r_E^2}\right) - I \exp\left(-\frac{|i-j|^2}{2r_I^2}\right)$$

$i, j$ : ニューロンの位置

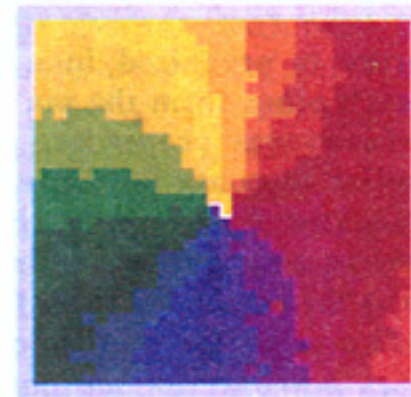
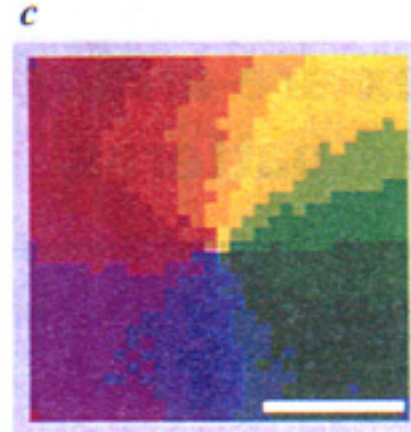
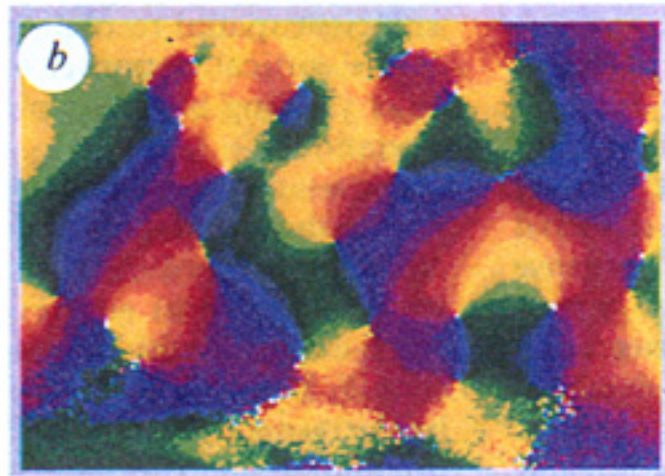
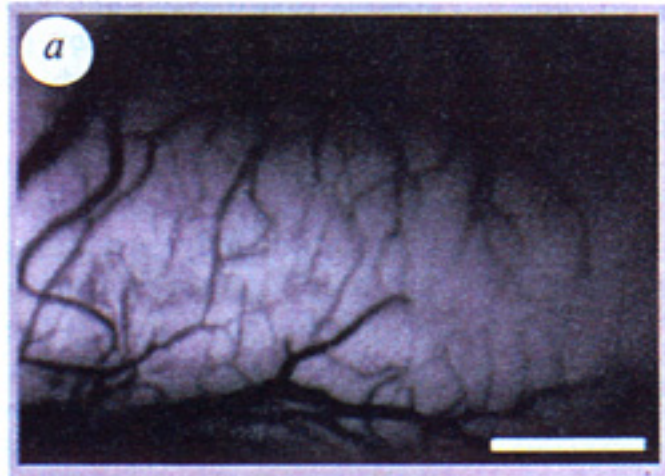
$E$ : 興奮性の強さ、 $I$ : 抑制性の強さ、

$r_E$ : 興奮性半径、 $r_I$ : 抑制性半径

Hebb学習と組み合わせると、自己組織化学習に.



# 大脳一次視覚野の特徴マップ



Bonhoeffer and Grinvald, 1991

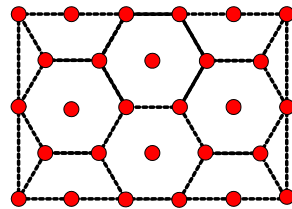
**Intelligent System and Informatics Lab.**

<http://www.isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp>

# Motor (M1)-SomatoSensory (S1) Areas Model

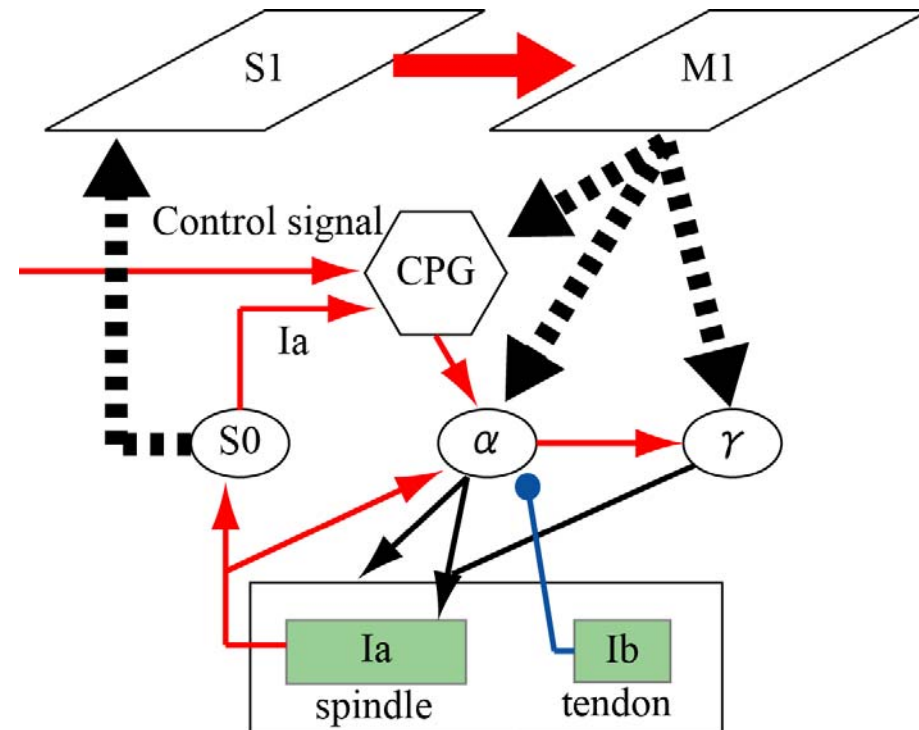
Sangawa & Kuniyoshi 06

- Self-Organizing Network with spatial structure (Chen 97)



- Somatosensory area (S1)
  - Competitive SOM
  - S0-S1: Modified Hebbian, fully connected.

- Motor area (M1)
  - Receptive field around corresponding point on S1
  - M1- $\alpha$ , M1- $\gamma$ , M1-CPG Modified Hebbian



$$\frac{dw_{ij}}{dt} = \eta \cdot y_i \cdot (y_j - w_{ij})$$

$y_i$  : Output of postsynaptic neuron  $i$ .

$y_j$  : Output of presynaptic neuron  $j$ .

$w_{ij}$  : Connection weight from  $j$  to  $i$ .

# 左右半球・・・

Sangawa & Kuniyoshi 06

## ■ 左右神経系

- S1, M1: 20x10 ニューロンずつ
- 脊髄・延髄: 99ニューロン
- 脳梁: 左右S1, M1を結合
- 全結合(興奮性)
- ヘップ則(変型版)

## ■ 制御入力

- 一定値(0.5)
- 滑らかな動き

ここにあった図版は、  
著作権処理の都合上、  
削除いたしました。

ご了承ください。



Intel

寒川新司, 國吉康夫: 胎児・新生児の身体・脳脊髄モデルと体性感覚野・運動野  
の自己組織化, 第24回日本ロボット学会学術講演会, CD-ROM, 2L24, 2006.

# 胎児・新生児環境

Sangawa & Kuniyoshi 06

- 胎児(受胎後35 週想定)
  - 子宮環境: 重力・浮力, 流体抵抗, 臍帯(身体を臍の一点で拘束)
  - 子宮壁: 非線形バネ・ダンパモデル
- 新生児(生後0週想定)
  - 通常重力
  - 平らな床
  - 柵で囲う

ここにあった図版は、  
著作権処理の都合上、  
削除いたしました。

ご了承ください。

ここにあった図版は、  
著作権処理の都合上、  
削除いたしました。

ご了承ください。



Intel  
1

寒川新司, 國吉康夫: 胎児・新生児の身体・脳脊髄モデルと体性感覚野・運動野  
の自己組織化, 第24回日本ロボット学会学術講演会, CD-ROM, 2L24, 2006.

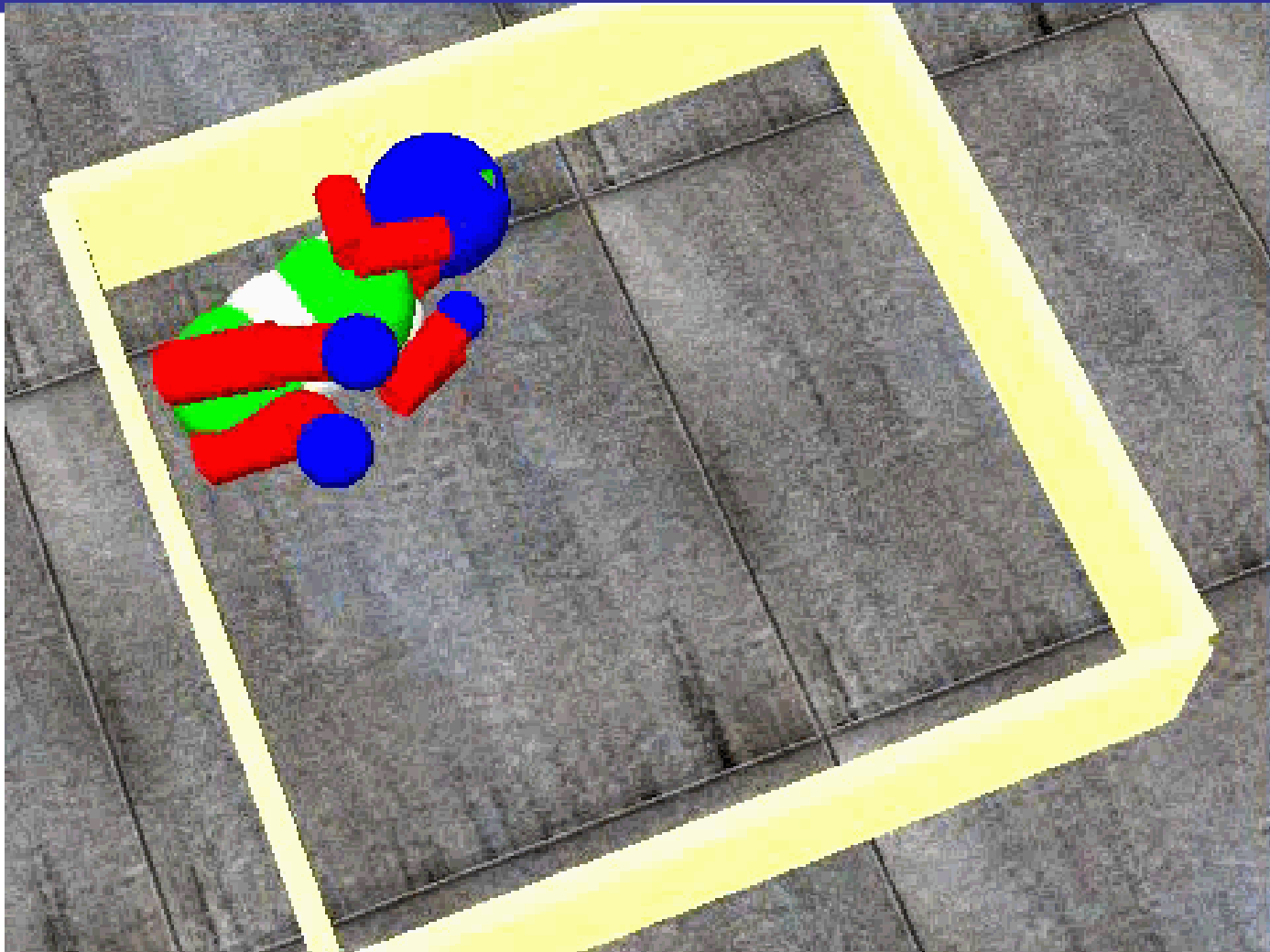
# 胎児モデルの運動

Sangawa & Kuniyoshi 06



# 新生児モデルの運動

Sangawa & Kuniyoshi 06





# 運動から認知へのステップ

- GM→身体・環境ダイナミクスによる構造化→行動単位へ
- 身体図式, 視覚との統合, 身体像へ
- 運動随伴感覚の予測と分節化, 注意, 意識
- 他者運動への注目とターンテイキング
- 身体図式相関による他者身体図式獲得
- 他者同一化の動機付けと模倣的試行
- つかまり立ち
- 言語獲得

# 総括

- 神経—身体—環境 相互作用から発生する情報構造.
- それを駆動し, 学習する神経系.
- 脳内に自己組織化した情報が, 他者とコミュニケーションし, 情報を解釈し, 行動を決定する.
- 発達するロボットを考えることで, 情報の発生から解釈, 利用までの全体を閉じた系として考えることができる.
- 人間と本当に通じ合えるロボットへ...