

情報が世界を変える
情報とロボットと生命

生命を知るロボットの情報学

⚠: 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。

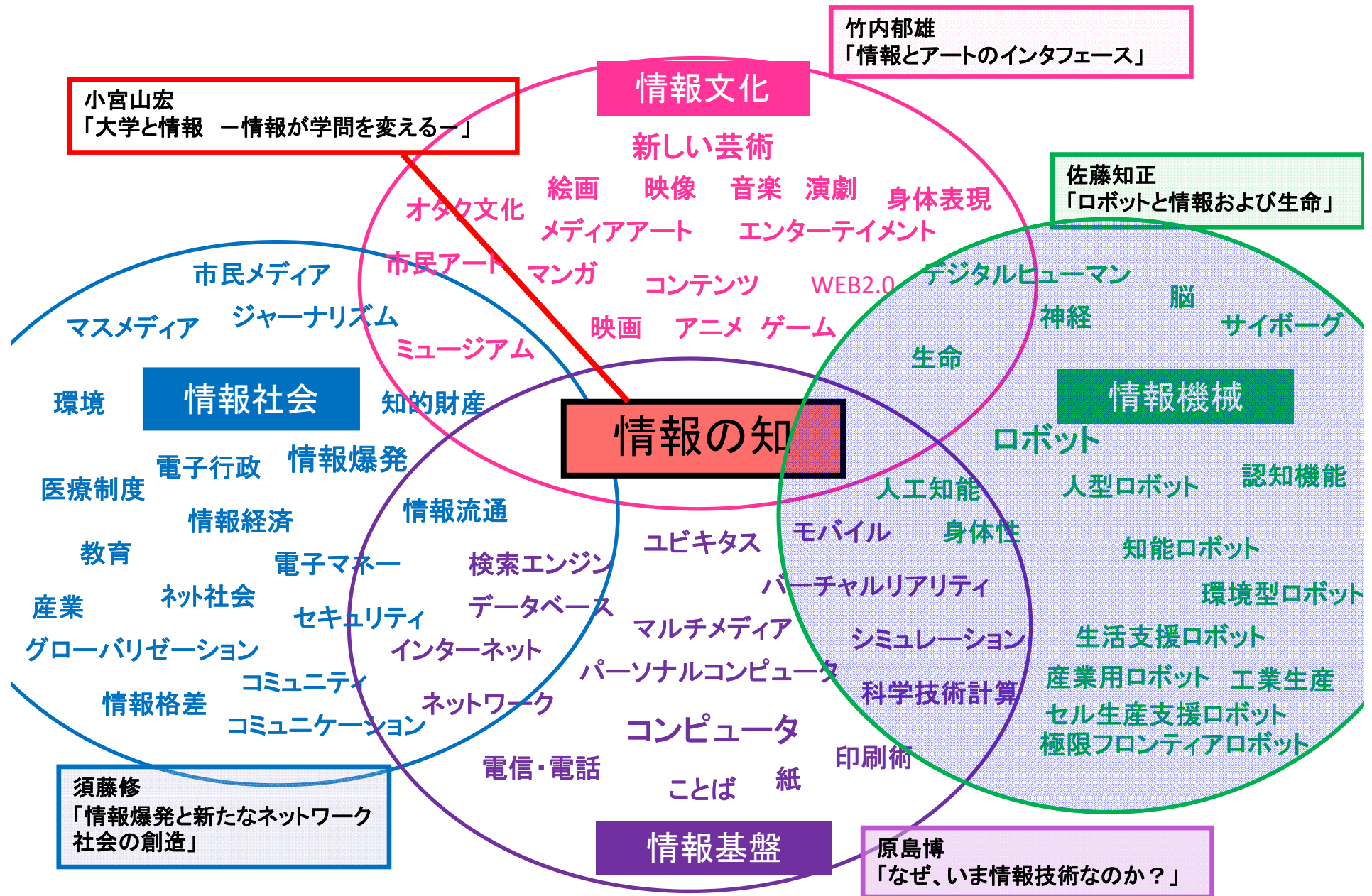


神崎亮平 情報理工学系研究科

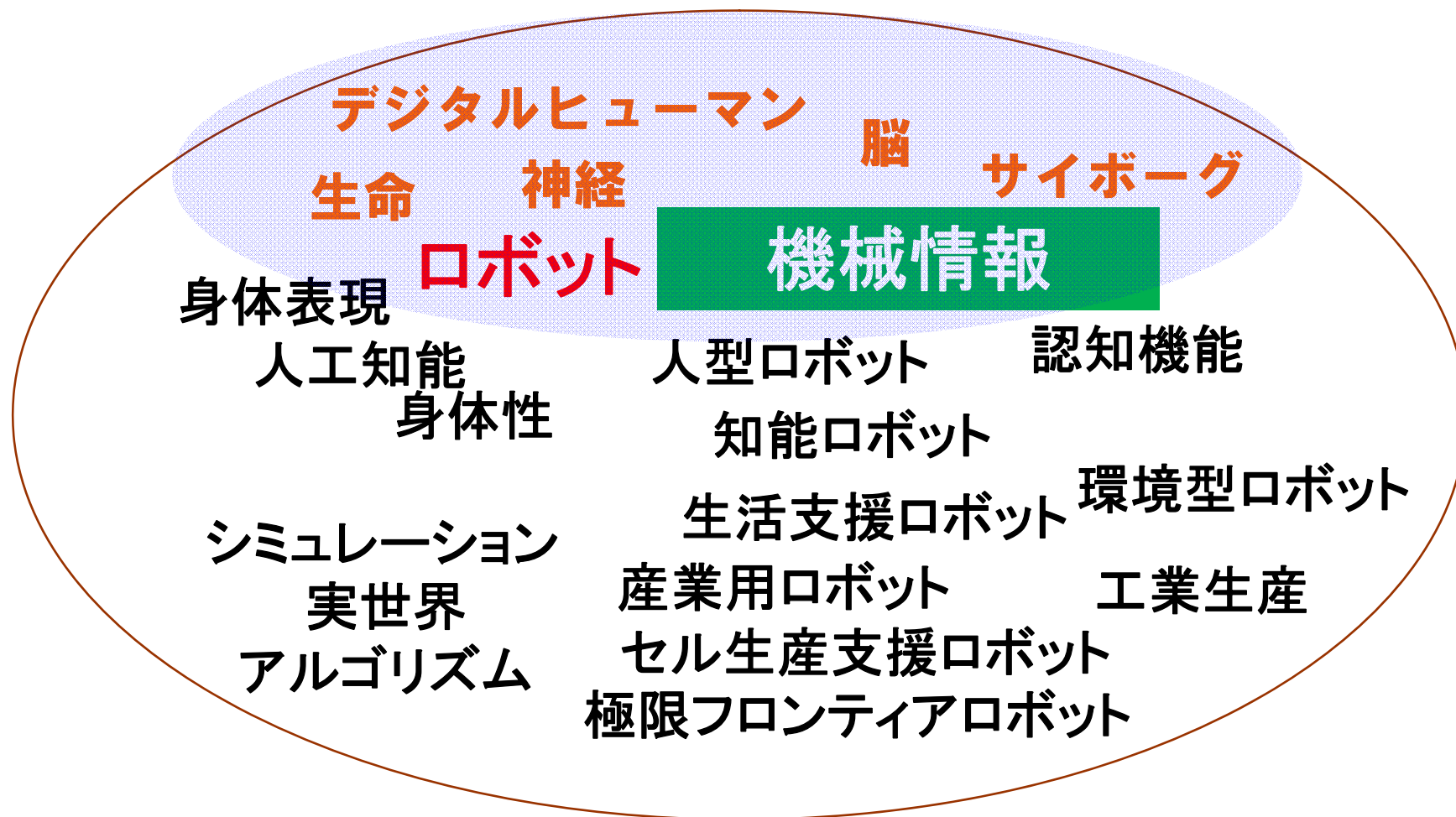
先端科学技術研究センター

Research Center for Advanced Science and Technology

情報が世界を変える ―俯瞰図―



ロボティクスのカバー範囲(拡大図)



情報とロボットおよび生命

生命を知るロボットの情報学

視覚

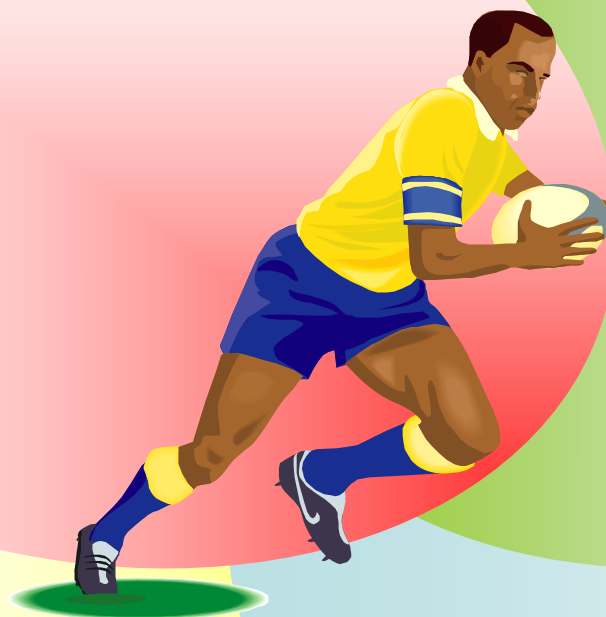
嗅覚

触覚

聴覚

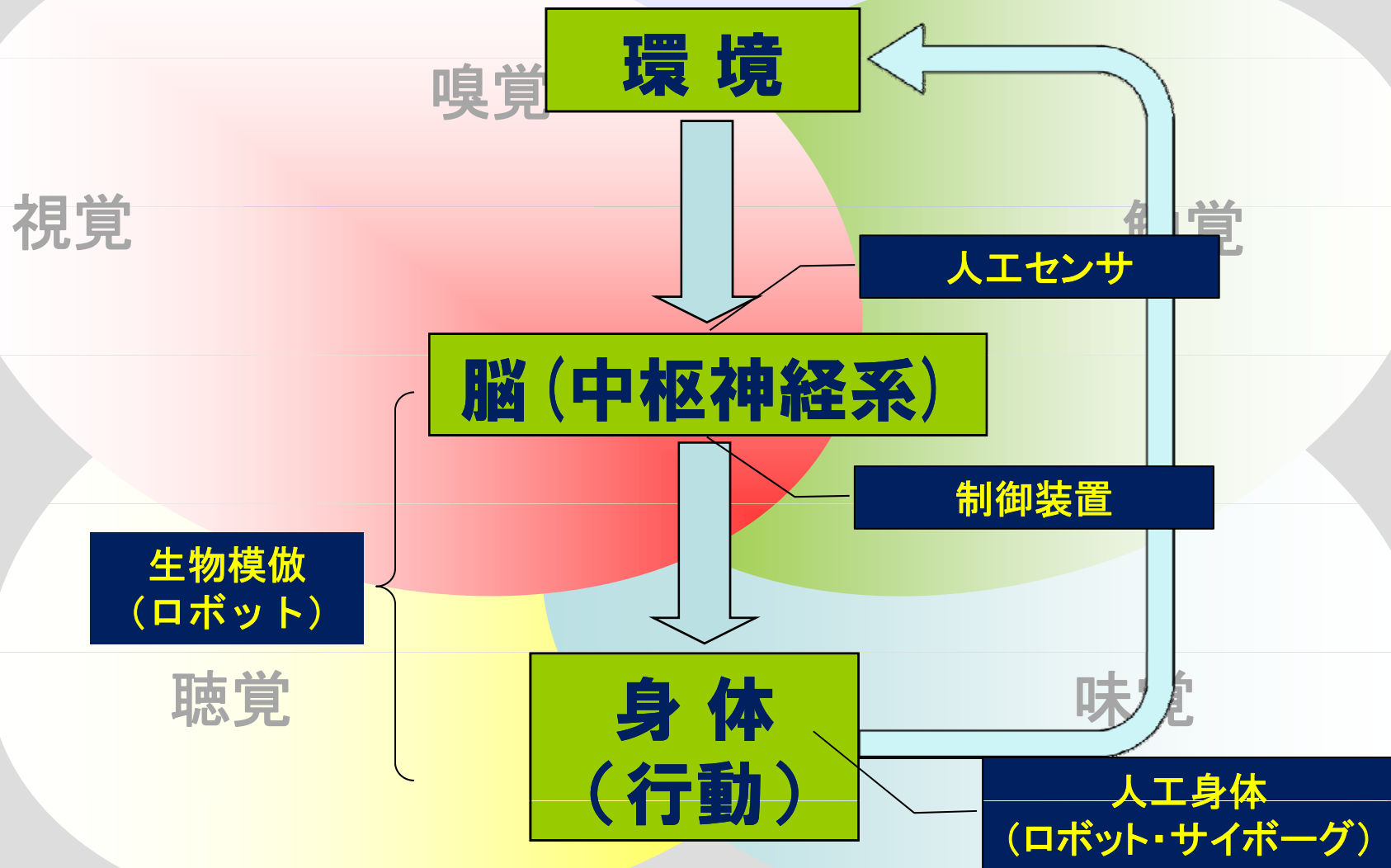
その他

味覚



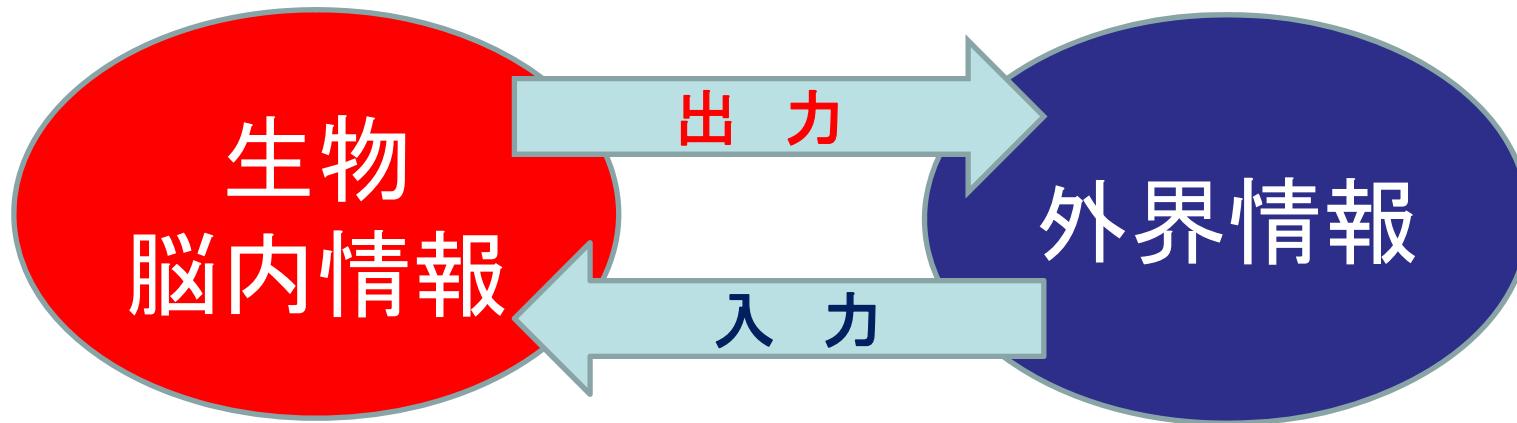
情報とロボットおよび生命

生命を知るロボットの情報学



生物（脳）と外界を繋ぐ ブレインマシンインターフェース

Brain Machine Interface (BMI)とは、
脳と外界との情報の直接入出力を可能とする技術



生物学・情報学・工学の融合がもたらす
情報世界の俯瞰

情報とロボットおよび生命

生命を知るロボットの情報学

1. 生物と外界をつなぐ情報
 - ・ 感覚と行動
2. 環境世界
 - ・ 感覚、時間、サイズ情報
3. 環境と脳と身体をむすぶ情報
 - ・ 神経と脳
 - ・ 生物・機械融合システム
(BMI、サイボーグ)



地球に生きるさまざまな動物



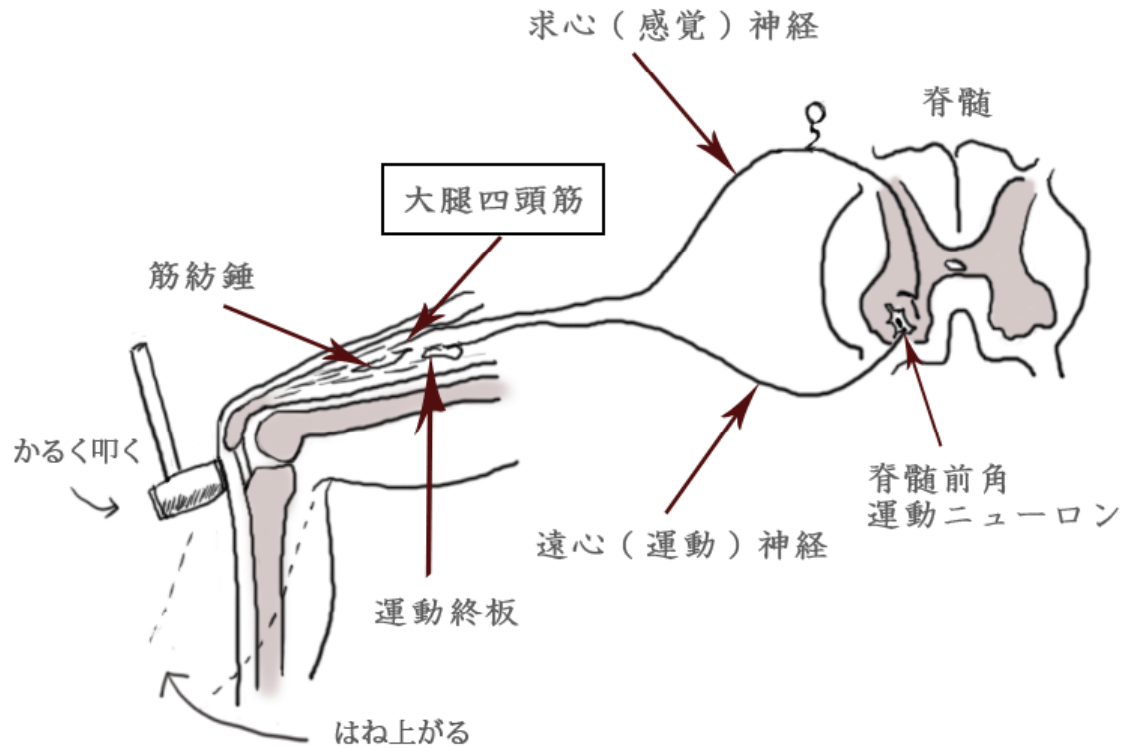
動物行動学

行動 (behavior)とは？

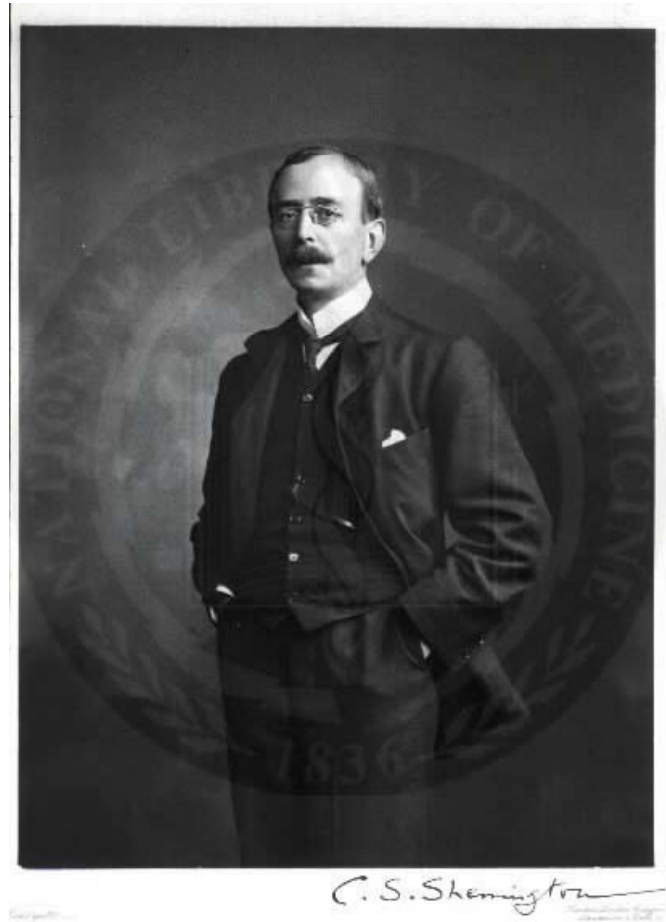
動物の個体が外界に対して能動的に示す(運動)、その個体の生活になんらかの意味が裏付けられているような動き(適応的)

行動の単位は？

行動の単位：反射



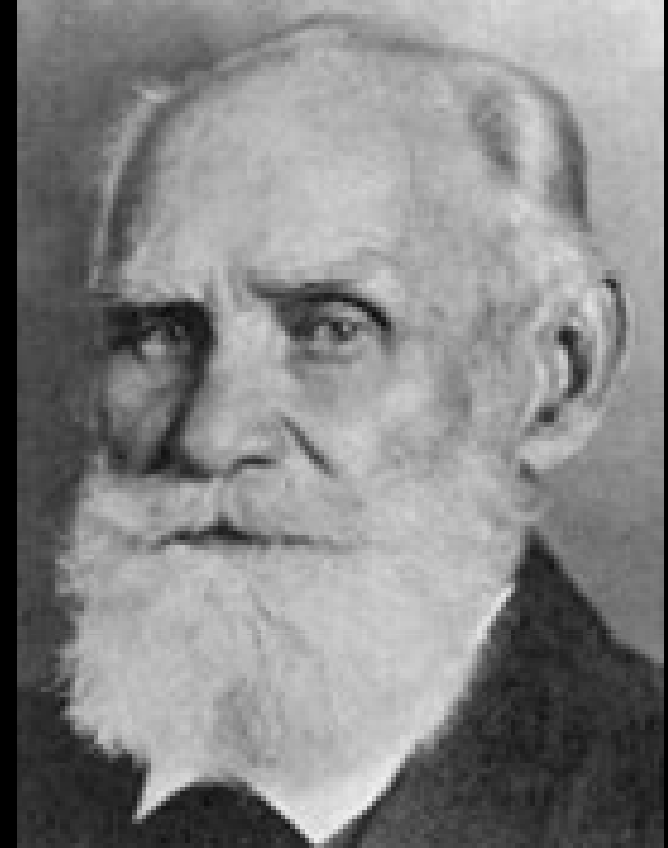
反射
(reflex)



Charles Sherrington
(1857~1952)

イワン パブロフ

(1849~1936)



条件反射
(conditioned reflex)

行動型ロボット (Behavior-Based Robot)

知覚したセンサ情報に基づいて、単純な反射的行動を出力するモジュールを、並列的に実行する。小規模な処理を並列して実行することにより、素早い判断や実環境に適した柔軟な行動が可能となる。

単純な行動の相互作用により、複雑な行動が創発される。



行動の単位：生得的行動パターン

動物行動学を築いた3人の研究者

1930-50年代



ティンバーゲン
(1907-1988)
『本能の研究』

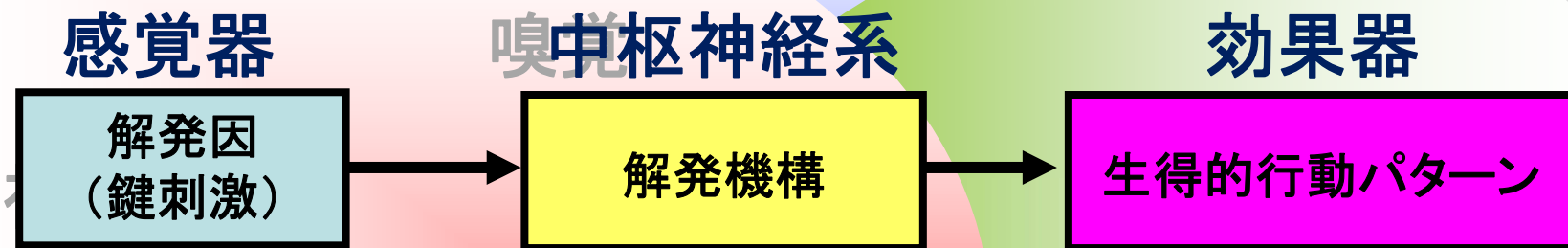


ローレンツ
(1903-1989)
ガチョウの刷り込み



フリッシュ
(1886 - 1982)
ミツバチの
ダンス言語

行動の単位：生得的行動パターン



1. 感受器(解発因(リリーサ)、鍵刺激)
2. 中枢神経系(解発機構)
3. 効果器(生得的行動パターン)

聴覚

その他

味覚

環境にはどのように動けばよいかの情報がある。
一部の環境情報（鍵刺激）で動き方がきまる。

ウミウシの逃避行動

著作権処理の都合で、
この場所に挿入されていた
“ウミウシの逃避行動の動画”を
省略させていただきます。

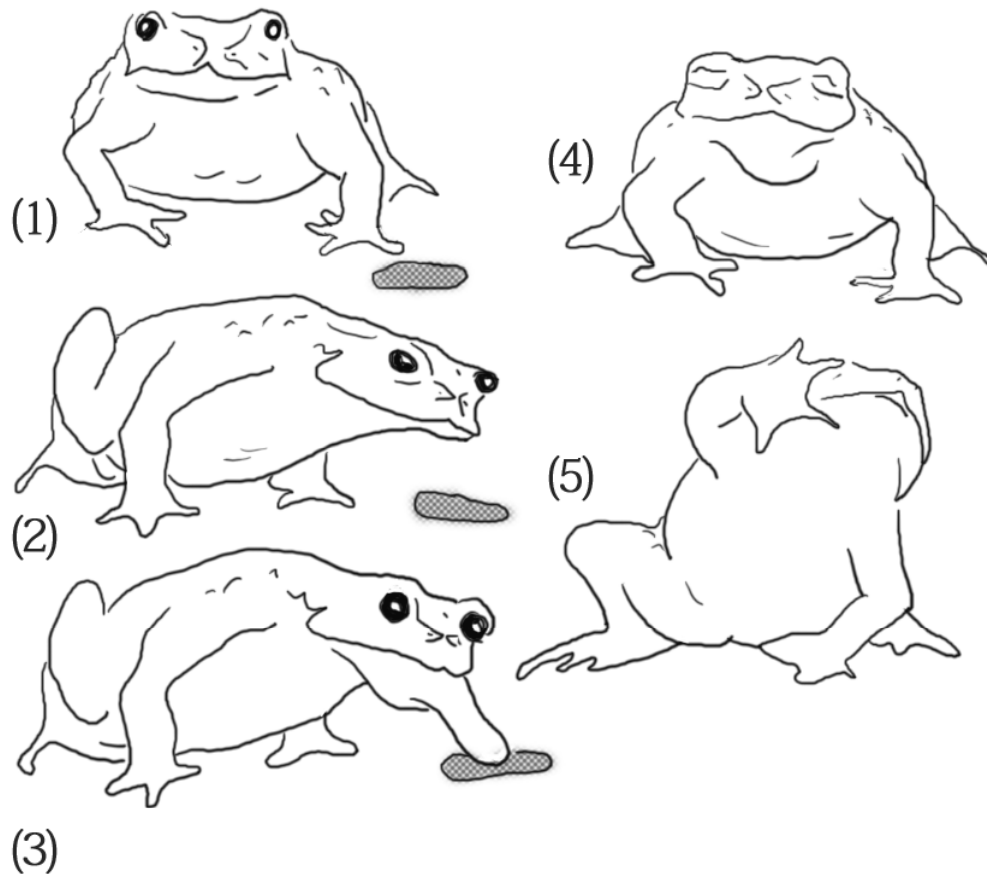


出典：BBC Nerve

参考：ウミウシの写真
(Wikipediaより)

軟体動物門マキガイ綱ウミウシ目

行動の単位：反射とプログラム行動



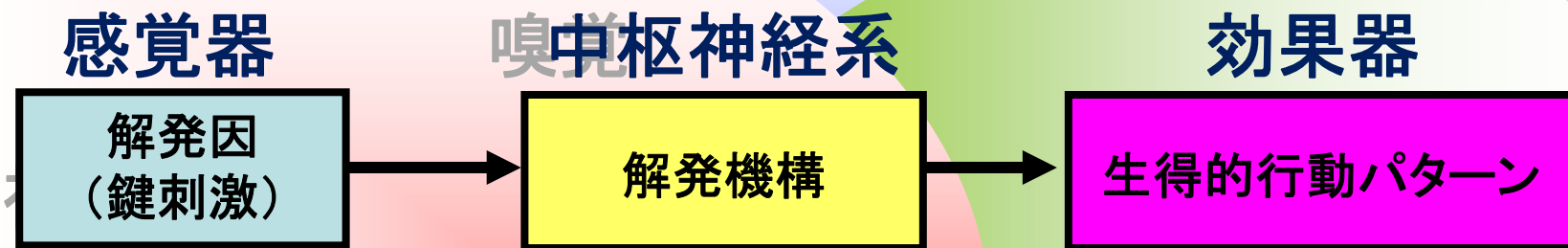
ヒキガエルの捕獲行動

- 1) 獲物の動きを検出
- 2) 獲物に向き直り、両岸の視野に獲物を固定
- 3) 舌を伸ばしてからめ獲る
- 4) 飲み込む
- 5) 前肢で口をぬぐう

1)から5)へと行動が連鎖的に
おこる。しかし、獲物を捕獲する
直前に獲物を取り除いても、捕
獲から口をぬぐう行動起こる

- 1)2)は、**反射行動**
3)から5)は**プログラム行動**

環境情報(鍵刺激)



1. 感覚器(解発因(リリーサ)、鍵刺激)
2. 中枢神経系(解発機構)
3. 効果器(生得的行動パターン)

聴覚

その他

味覚

環境にはどのように動けばよいかの情報がある。
一部の環境情報(鍵刺激)で動き方がきまる。

イトヨの配偶行動・攻撃行動

著作権処理の都合で、
この場所に挿入されていた
“イトヨの配偶行動・攻撃行動の動画”を
省略させていただきます。



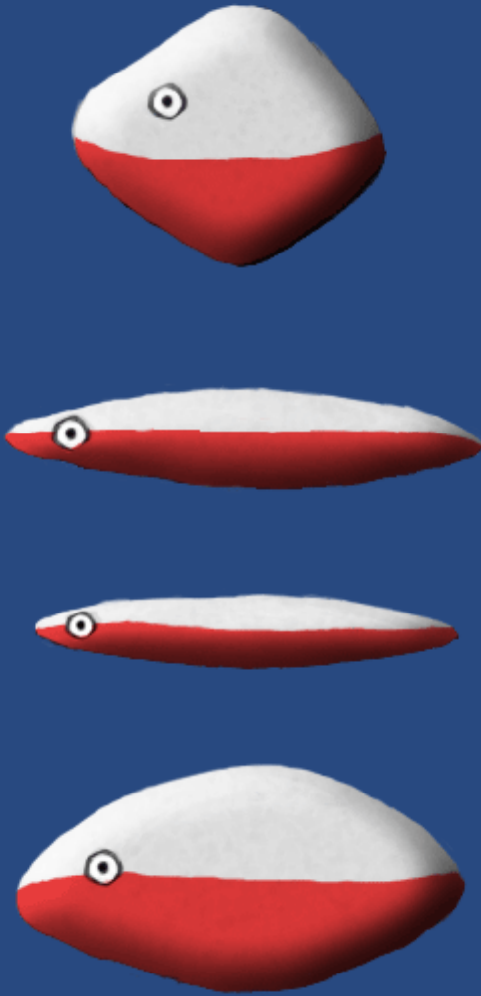
参考：イトヨの写真

出典：IPA「教育用画像素材集サイト」

<http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>

鍵刺激

全て攻撃対象



イトヨの雄の闘争行動

トゲウオでは、赤い腹部がすべて必要なのではなく、本質的には、赤い色が鍵刺激となる。ライバル雄の赤い腹が背側にあると意味がない。

著作権処理の都合で、
この場所に挿入されていた
“イトヨの配偶行動・攻撃行動の動画”を
省略させていただきます。

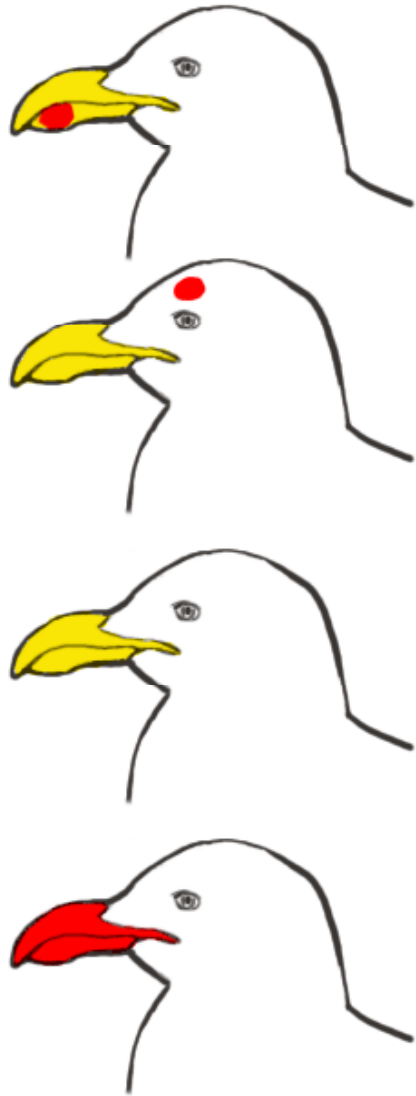
セグロカモメ 雛の餌ねだり行動

著作権処理の都合で、
この場所に挿入されていた
“セグロカモメの餌ねだり行動の動画”を
省略させていただきます。



参考：セグロカモメの写真
(Wikipediaより)

鍵刺激



100

カモメの仲間は、素嚢に多くの食物を蓄えることができる。これを吐き出して、つがいの相手やヒナに餌を与える。

25

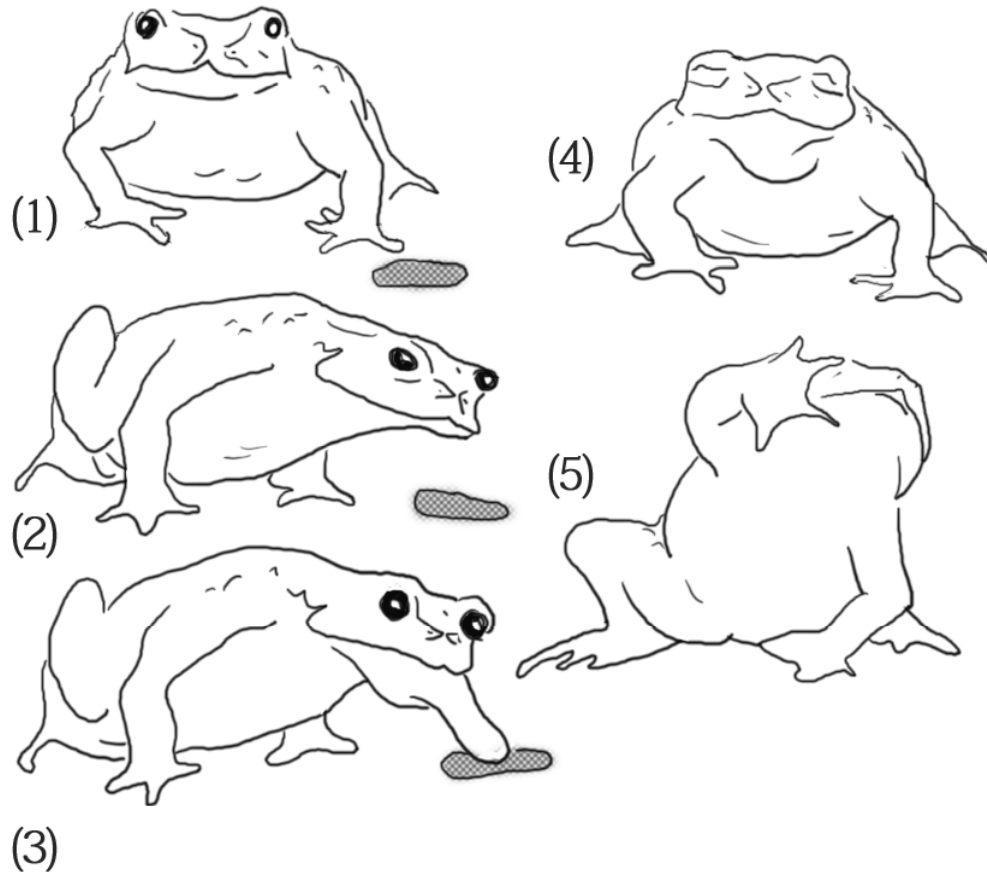
行動の鍵となる刺激は、黄色いくちばしの赤いスポット。

40

著作権処理の都合で、
この場所に挿入されていた
“セグロカモメの餌ねたり行動の動画”を
省略させていただきます。

80

環境(刺激)の意味



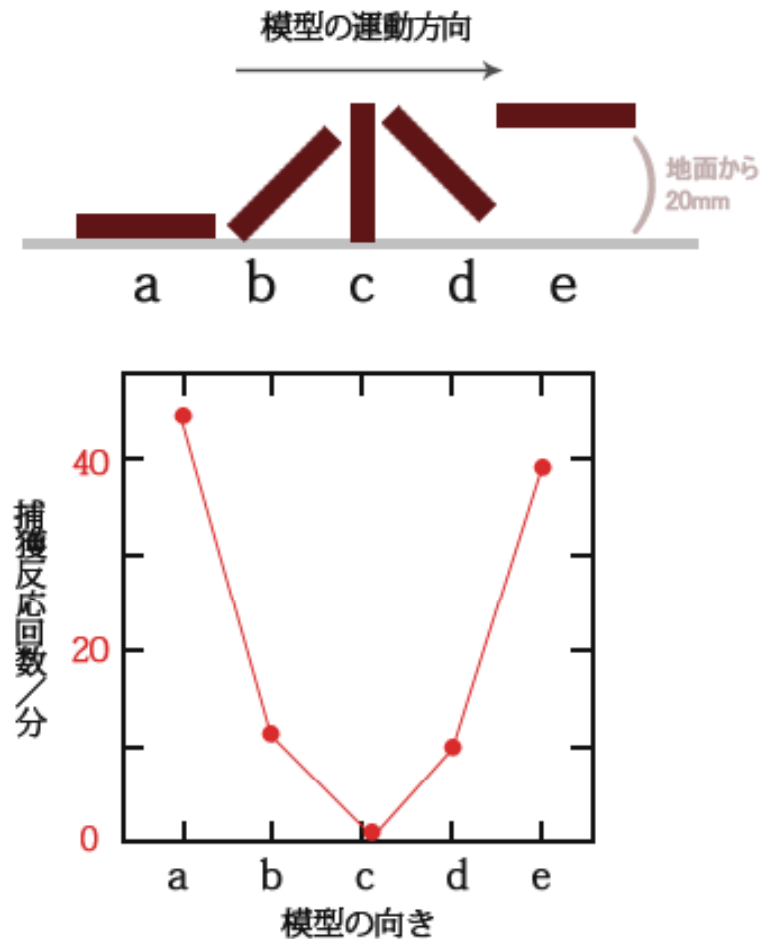
ヒキガエルの捕獲行動

- 1) 獲物の動きを検出
- 2) 獲物に向き直り、両岸の視野に獲物を固定
- 3) 舌を伸ばしてからめ獲る
- 4) 飲み込む
- 5) 前肢で口をぬぐう

1)から5)へと行動が連鎖的に
おこる。しかし、獲物を捕獲する
直前に獲物を取り除いても、捕
獲から口をぬぐう行動起こる

- 1)2)は、**反射行動**
3)から5)は**プログラム行動**

環境(刺激)の意味



小さい物体が動いているとそれに対して捕食行動を起こす。

モデルが虫のように横方向に動くとき: 餌として認識

立った形で横に動くとき:
”恐れ”例えばヘビと認識

ゲシュタルト受容型の例
ヒキガエル(Bufo bufo) 捕獲行動

情報とロボットおよび生命

生命を知るロボットの情報学

1. 生物と外界をつなぐ情報
 - ・ 感覚と行動

2. 環境世界

- ・ 感覚、時間、サイズ情報

3. 環境と脳と身体をむすぶ情報

- ・ 神経と脳
- ・ 生物・機械融合システム
(BMI、サイボーグ)



環境世界

- 感覚の世界
- 時間の世界
- サイズの世界

感覚の世界

感 覚 sense

動物が体の各受容器(感覚器)で受け取った刺激が感覚神経により脳に伝えられるとき、そこに生じた刺激に対する反応

岩波生物学辞典第4版を簡略

感覚のパラメータ

種類: modality

視覚、聴覚、嗅覚、味覚、触覚

質: quality

波長(色)、頻度(調子)、波形(音色)

量: quantity

強さ、振幅、濃度

動物によって異なる感覚能力

1. 紫外線、偏光を感知するミツバチの複眼
2. 1Hzの音を感知するゾウ
3. 8万Hzの音を感知するネズミ
4. ヒトの100万倍の匂い(汗に含まれる酒石酸など)感知能力をもつイヌ
5. 100個の目をもつホタテガイ
6. 360度の視野を持つヤマシギ(ヒトは260度)

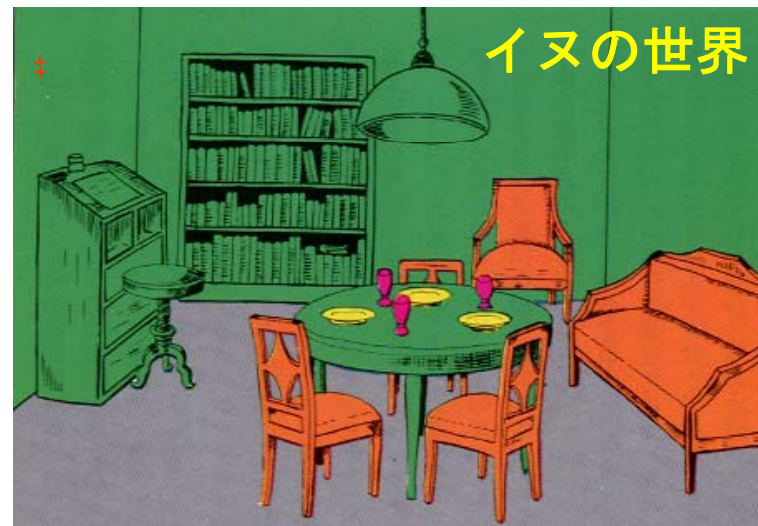
ヤーコブ・フォン・ユクスキュル

Jakob Johann Baron von Uexküll (1864– 1944)

著作権処理の都合で、
この場所に挿入されていた
“ユクスキュルの写真”を
省略させていただきます。



感覚の世界



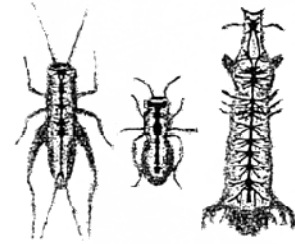
『生物から見た世界』 ユクスキュル, 1933, 新思索社

地球に生きるさまざまな動物

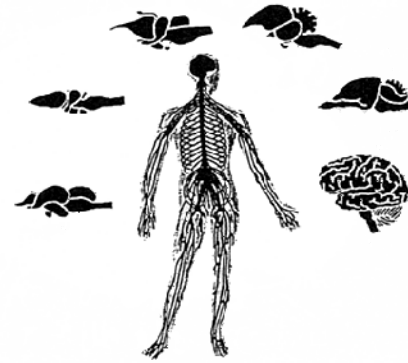
地球に生きる
生物の種類の
70%以上が昆虫



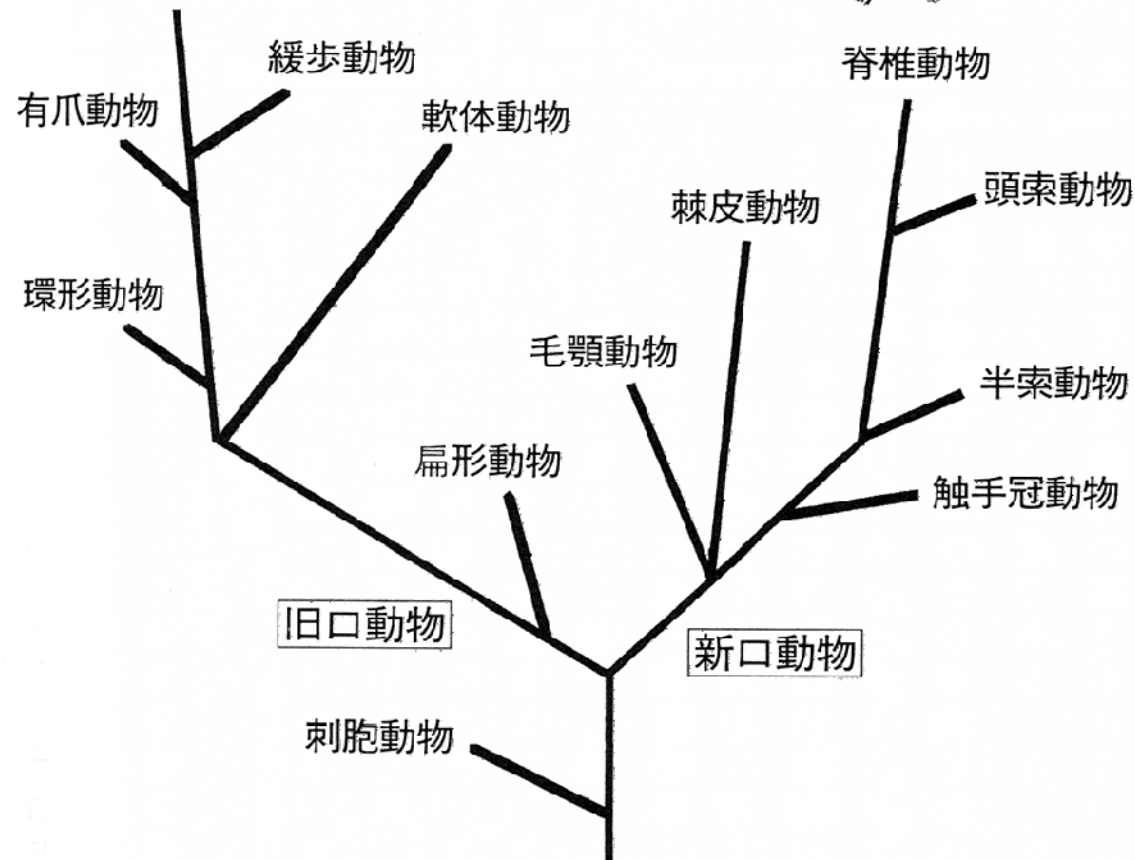
ヒトと系統進化の対極をなす昆虫



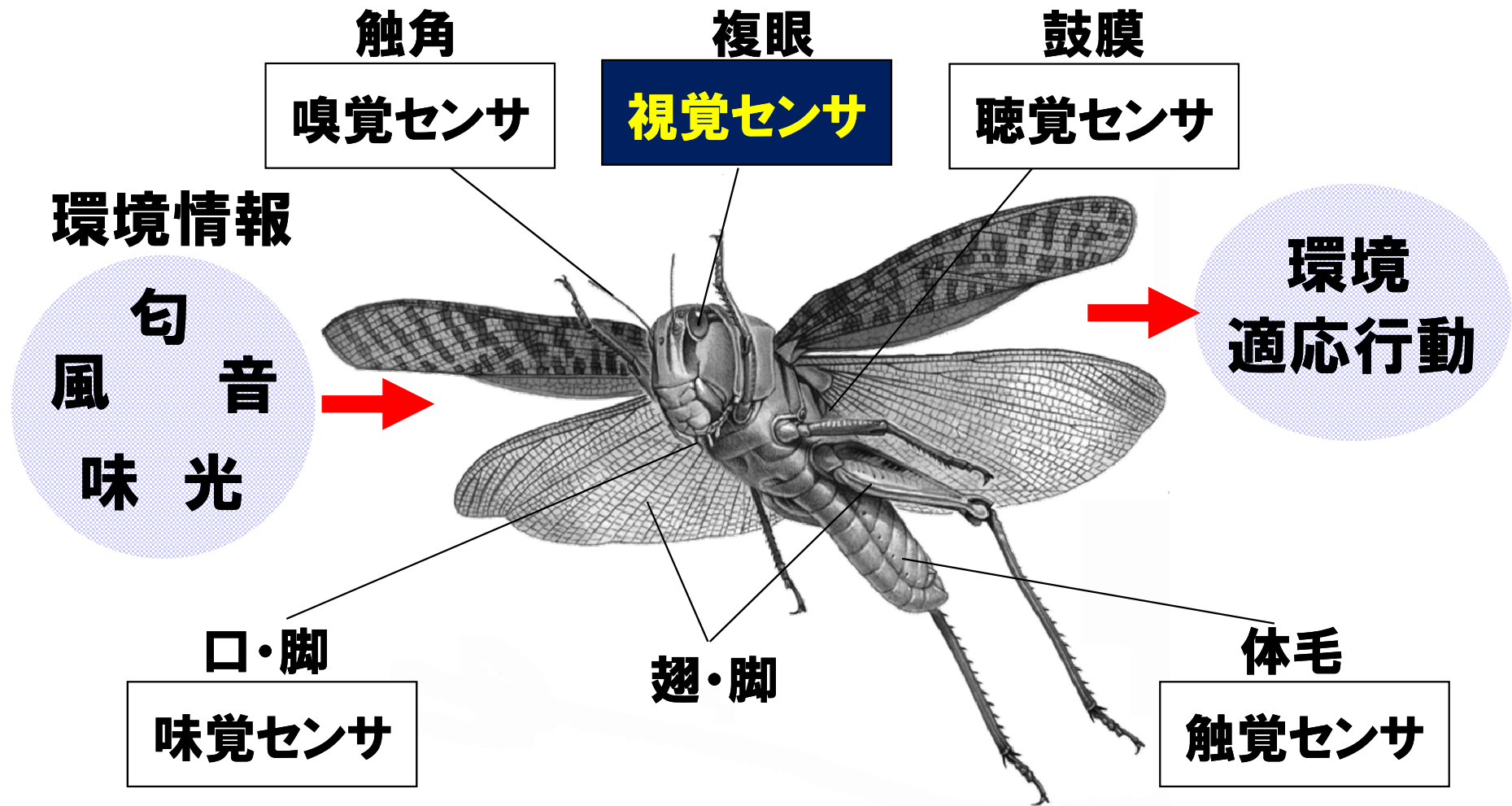
節足動物



脊椎動物



昆虫の感覚世界（視覚センサ）



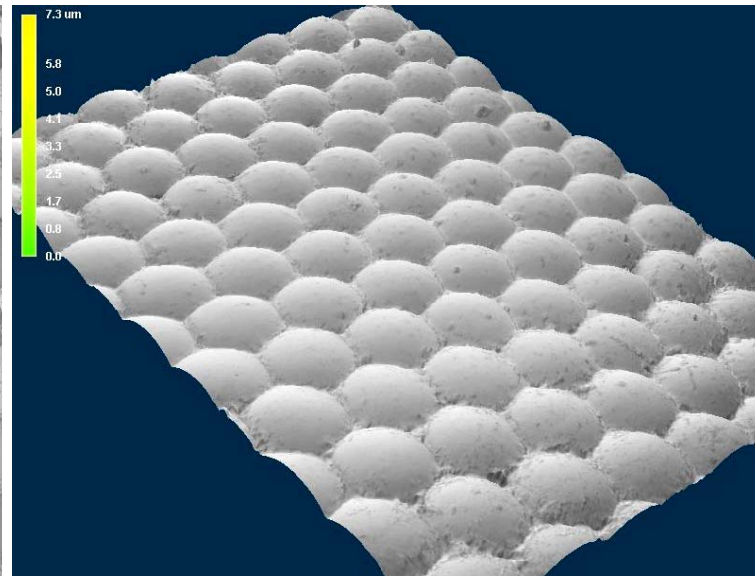
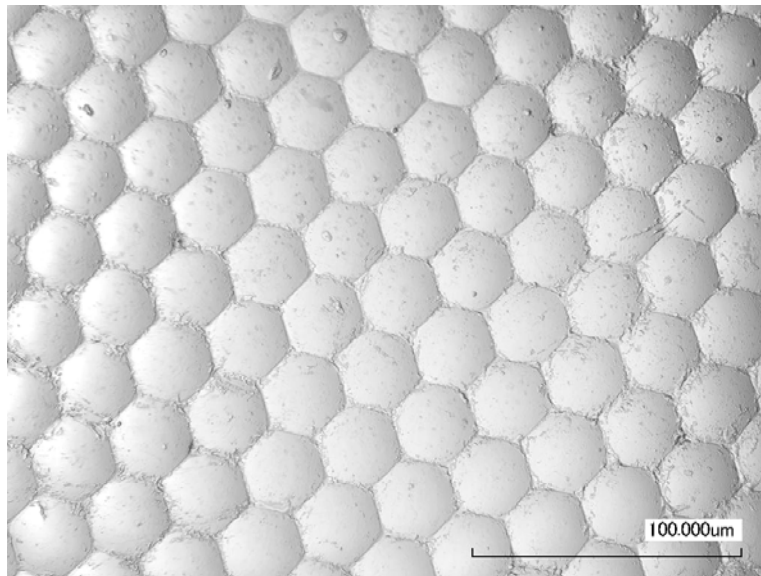
昆虫の視覚センサ（複眼）



クロマルハナバチの複眼



クロマルハナバチ



昆虫の視覚センサ（複眼）



著作権処理の都合で、
この場所に挿入されていた
“複眼の模式図”を
省略させていただきます。

捕獲・障害物回避：複眼情報処理

低い空間分解能センサによる高速・適応処理

視野角：2度（視力<0.01）



画像出典：Wikipedia

- 1) オプティカルフロー
- 2) 対象物検知
- 3) 視運動反射

低空間分解能

距離情報：立体視を構造上使えない



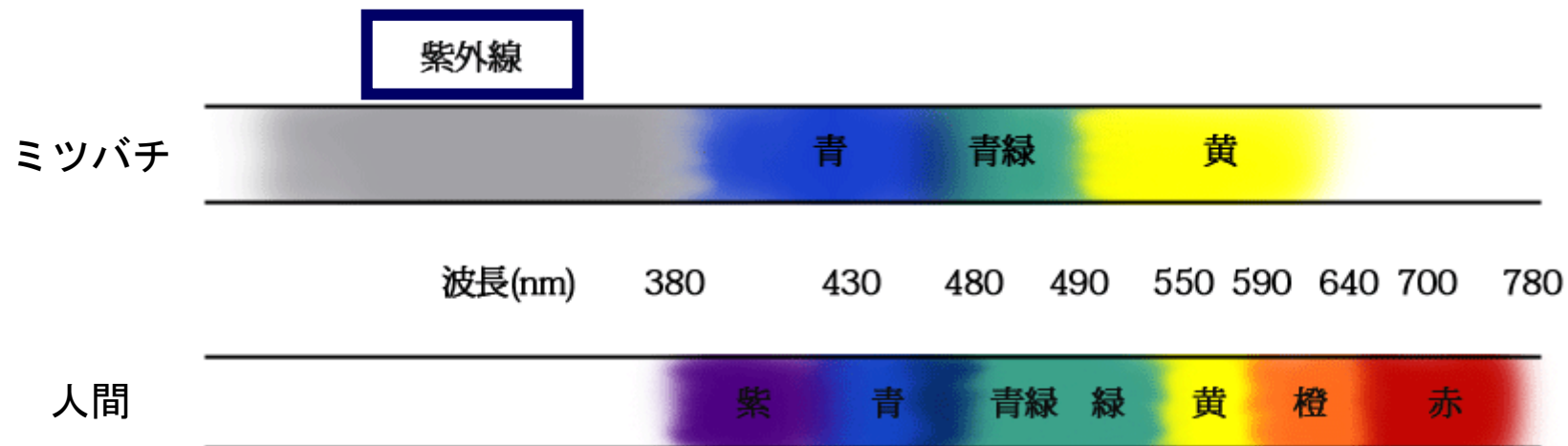
ヒトとは異なる設計デザインを獲得

識別波長域（波長分布特性）



著作権処理の都合で、
この場所に挿入されていた
“ミツバチの眼の仕組みの図”を
省略させていただきます。

視力は、0.01以下



ミツバチがみたアブラナ

著作権処理の都合で、
この場所に挿入されていた
“紫外線フィルターを通したアブラナの動画”を
省略させていただきます。



参考：アブラナの写真
素材提供：EyesPic
<http://eyes-art.com/pic/>

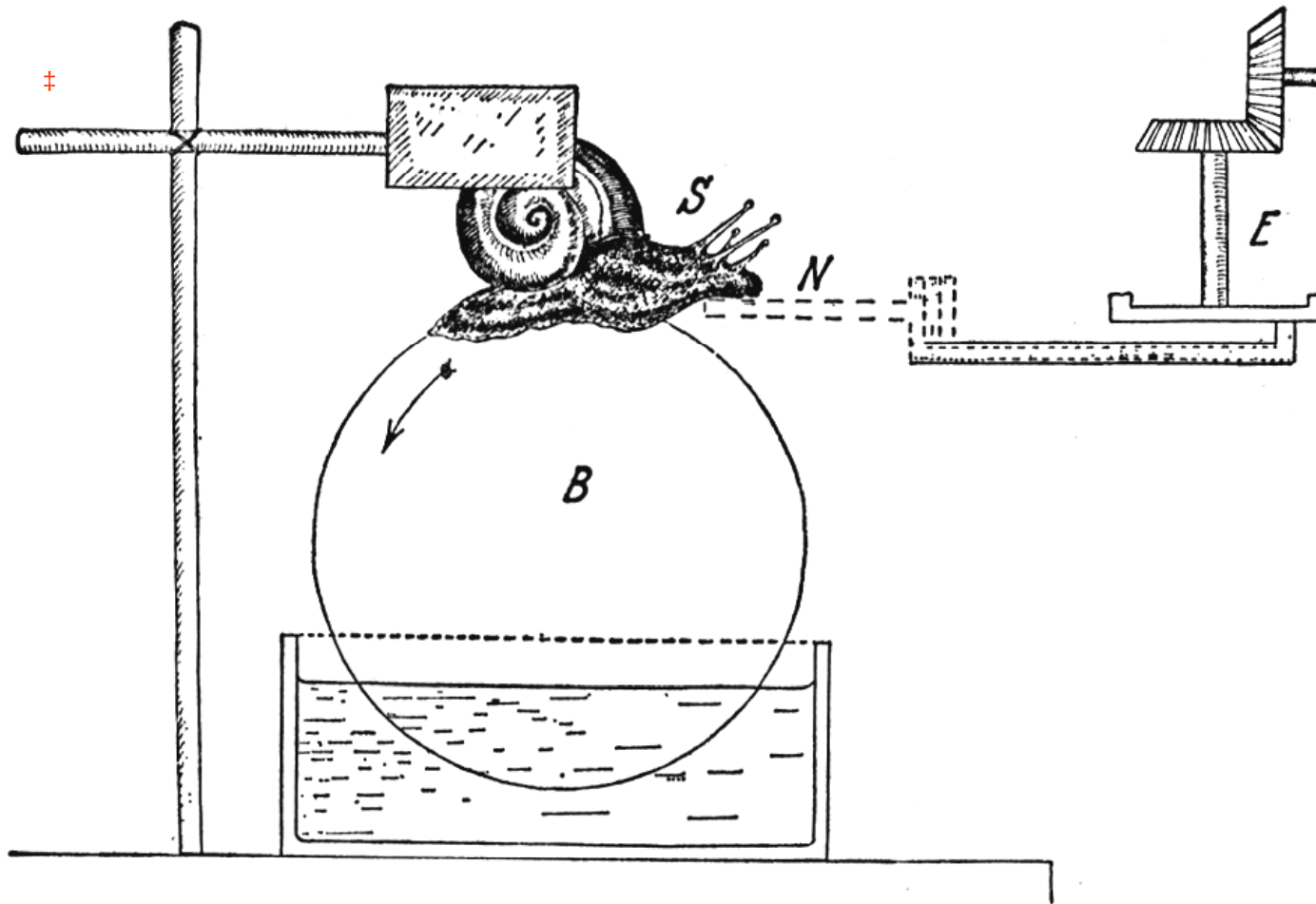
モンシロチョウの配偶行動

著作権処理の都合で、
この場所に挿入されていた
“紫外線フィルターを通した
モンシロチョウのオス・メスの動画”を
省略させていただきます。



参考：モンシロチョウの写真
(Wikipediaより)

時間の世界



第16図 カタツムリの瞬間 B：ゴム球，E：偏心輪，N：棒，
S：カタツムリ

『生物から見た世界』 ユクスキュル, 1933, 新思索社

— 瞬

ユクスキュル（生物学的一瞬） 一瞬の長さは動物ごとに異なる

CFF

critical fusion frequency

**臨界融合頻度：
視覚の時間分解能**

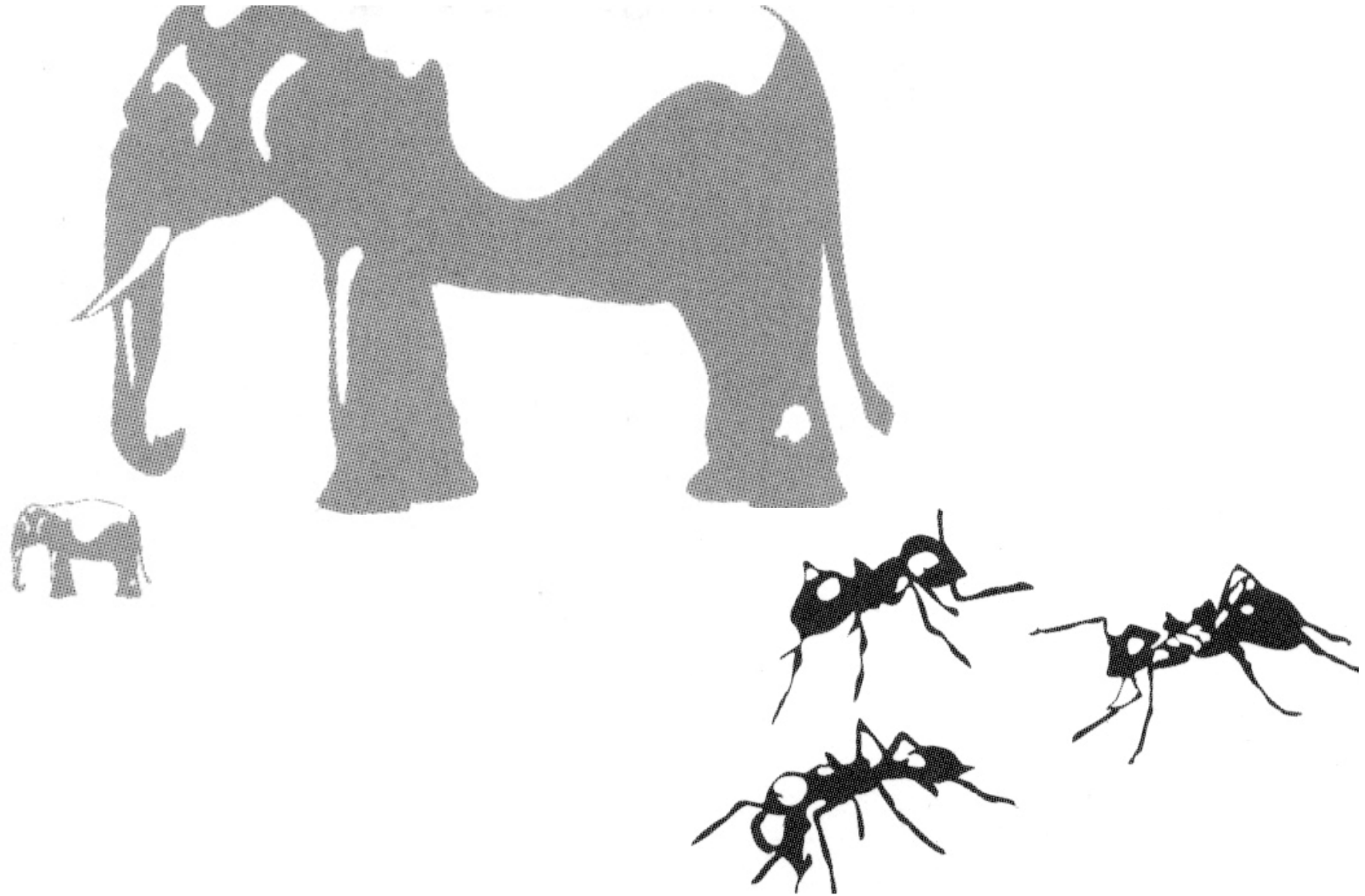
著作権処理の都合で、
この場所に挿入されていた
“ミツバチの羽ばたく動画”を
省略させていただきます。

さまざまな動物のCFF

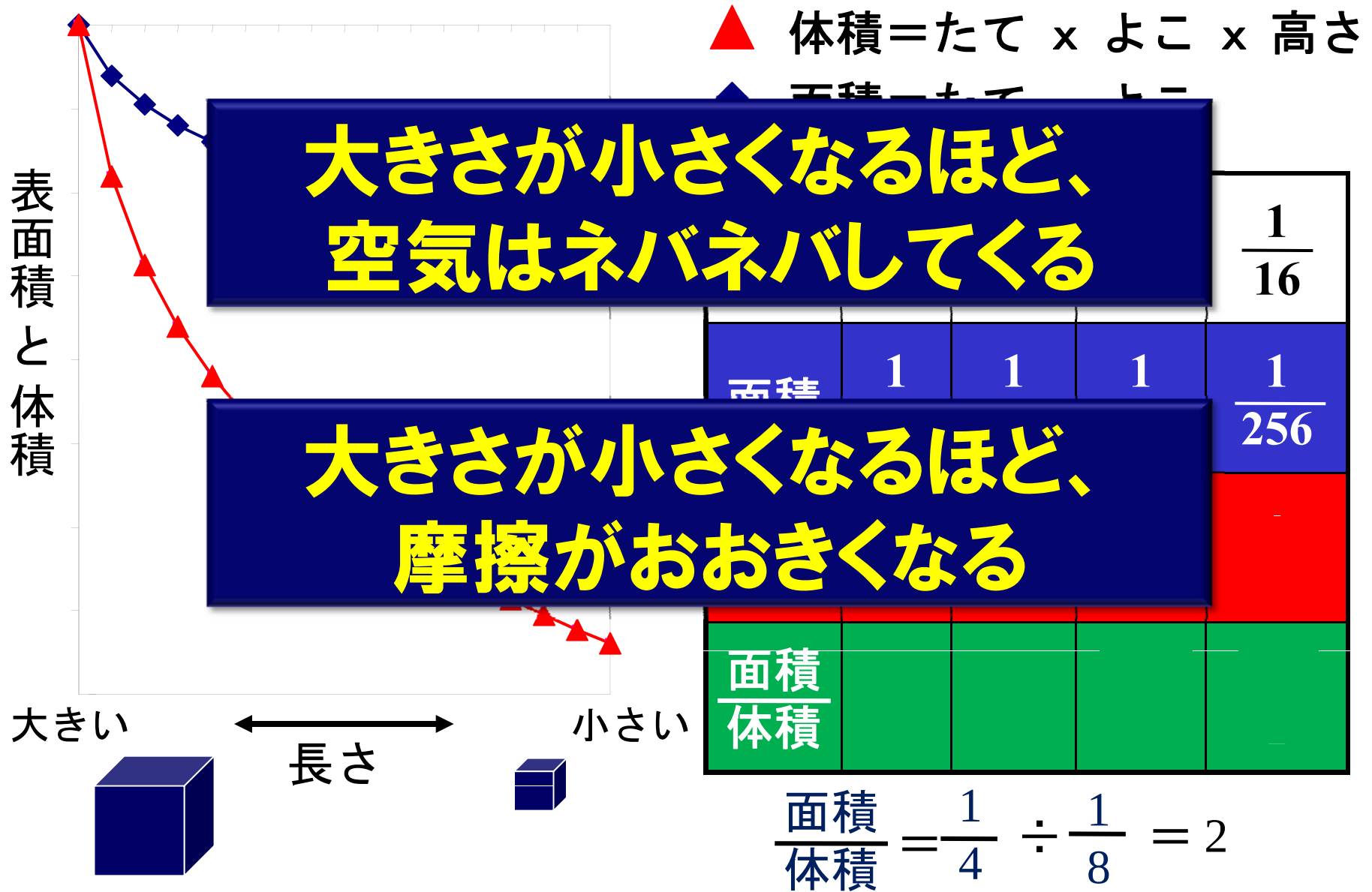
(照明弱 - 強。値がひとつのものは照明強の場合。)

	C F F (Hz)
ホニユウ類	
人間	15—60 (網膜中心) 5—20 (網膜周辺 15 度)
ネコ	15—60
モルモット	10—40
鳥類	
ハト	150
魚類	
コイ	14—18
スナキュウリウオ	67
昆虫	
ミツバチ	60—310
ハエ (クロバエ)	60—260
チョウ (ミドリヒョウモン)	150
コオロギ	5—40
頭足類	
タコ	20—70

サイズの世界



寸法 (スケール) 効果

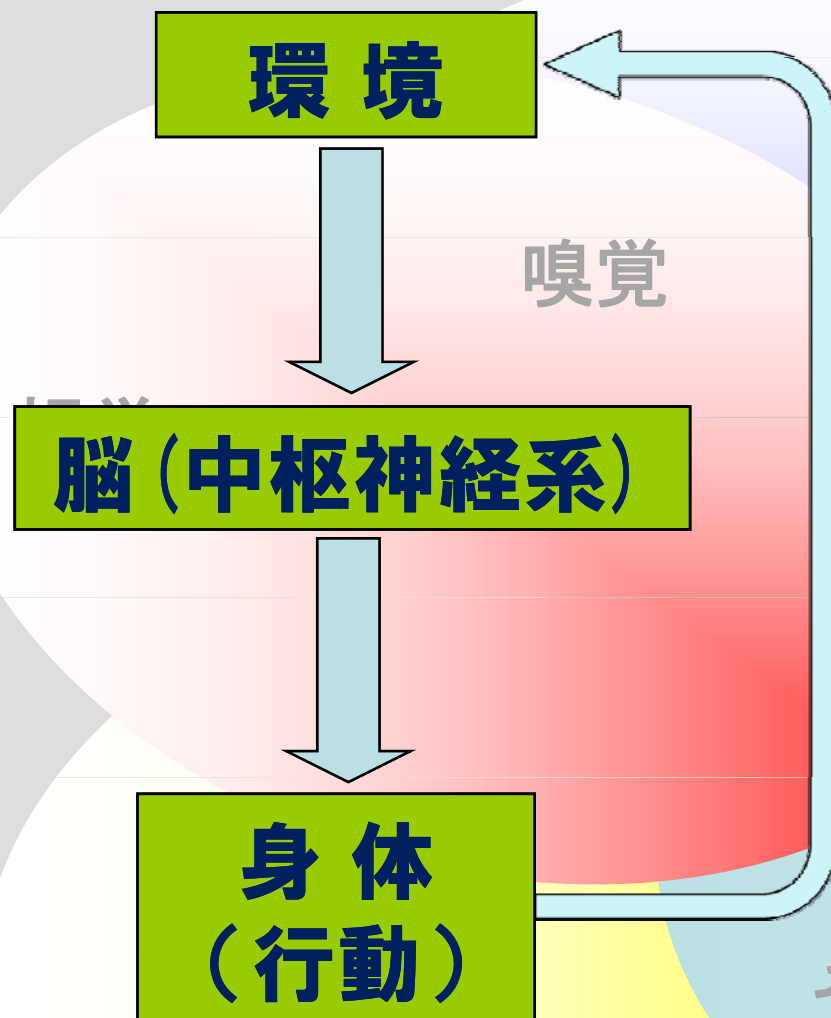


情報とロボットおよび生命

生命を知るロボットの情報学

1. 生物と外界をつなぐ情報
 - ・ 感覚と行動
2. 環境世界
 - ・ 感覚、時間、サイズ情報
3. 環境と脳と身体をむすぶ情報
 - ・ 神経と脳
 - ・ 生物・機械融合システム
(BMI、サイボーグ)





環境世界

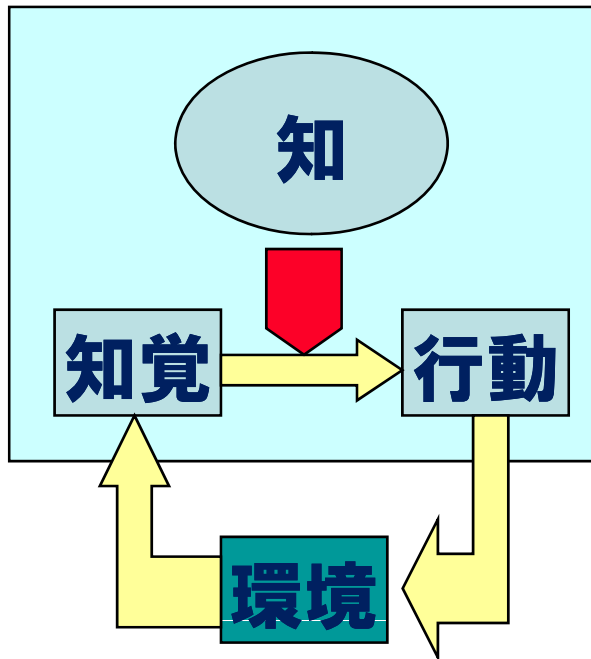
- 感覚の世界
- 時間の世界
- サイズの世界

環境にはどのように動けばよいかの情報がある。
一部の環境情報（鍵刺激）で動き方がきまる。

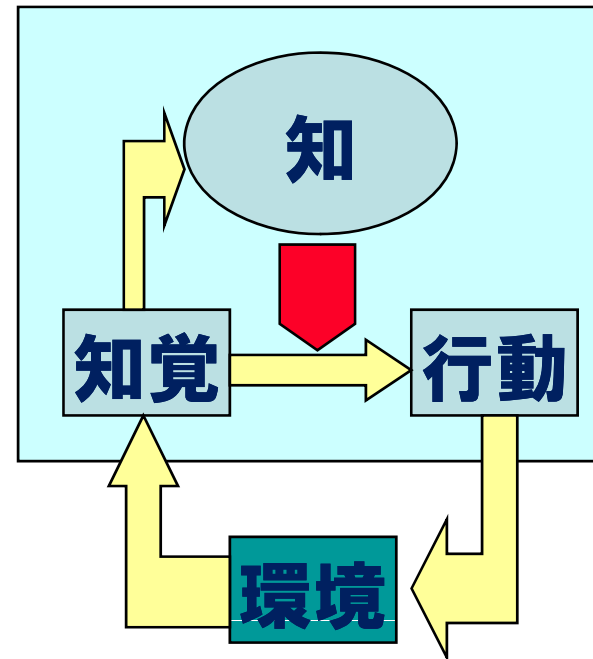
知能に関する考え方

ロボティクスと移動知

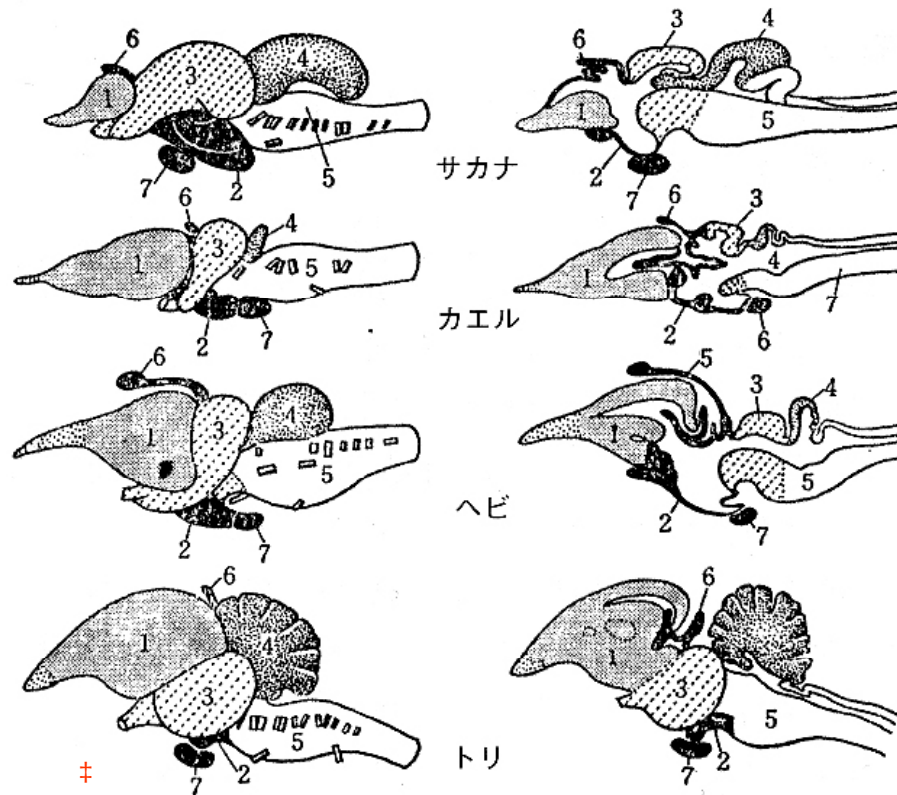
従来のロボティクス



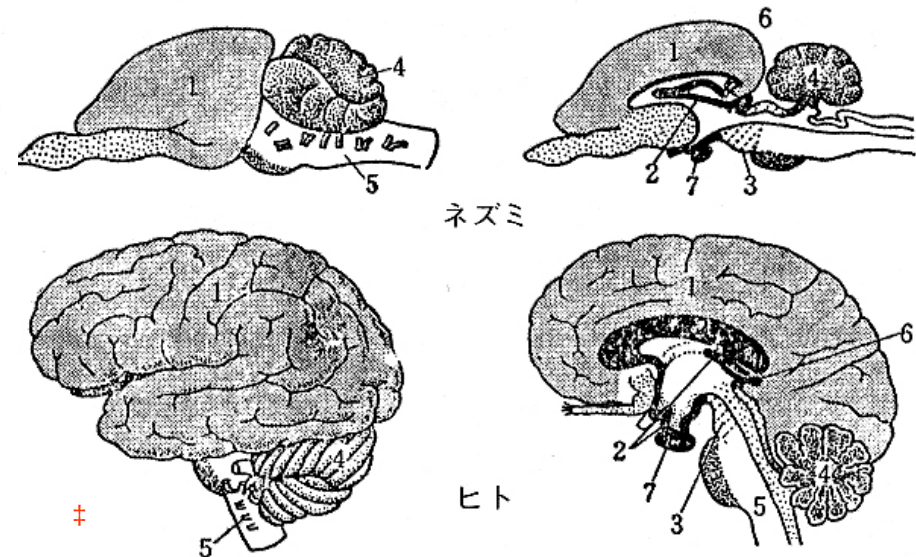
移動知



さまざまな動物の脳



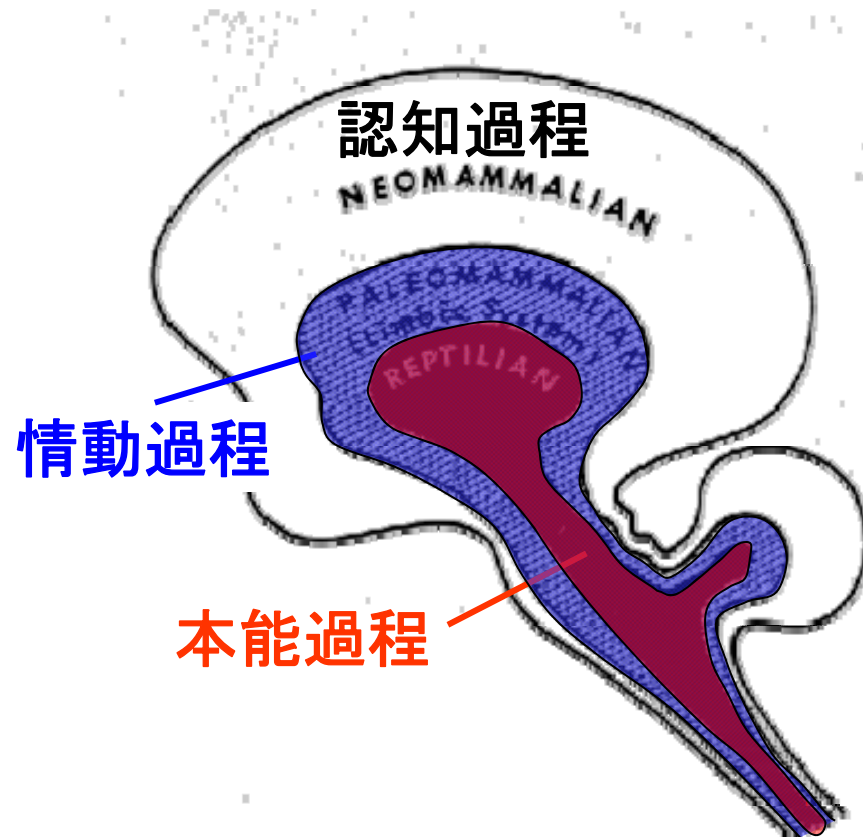
大脳 (1)
 小脳 (4)
 脳幹 (2, 3, 5)
 (延髄・橋・中脳・間脳)



脳の話、岩波新書、p22、図8

図1-1 脊椎動物の脳の系統的進化。1：大脳半球，2：間脳，3：中脳，4：小脳，5：延髄，6：松果体，7：下垂体（時実より）

脳の階層的な構成



P.D. マクリーン
(Paul D. MacLean) の
「内臓脳」 / 「辺縁系」と
「三型階層性脳」説

新哺乳類脳：新皮質
認知過程

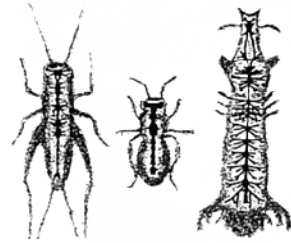
旧哺乳類脳：辺縁系
情動過程

原始爬虫類脳：脳幹
反射・定型的行動

動物の古い脳の上に
新しい脳が付加され
る進化の道筋

動物の系統と脳の進化

微小脳



節足動物

巨大脳



脊椎動物

有爪動物

緩歩動物

軟体動物

環形動物

棘皮動物

頭索動物

毛嚢動物

半索動物

扁形動物

触手冠動物

刺胞動物



オワンクラゲ

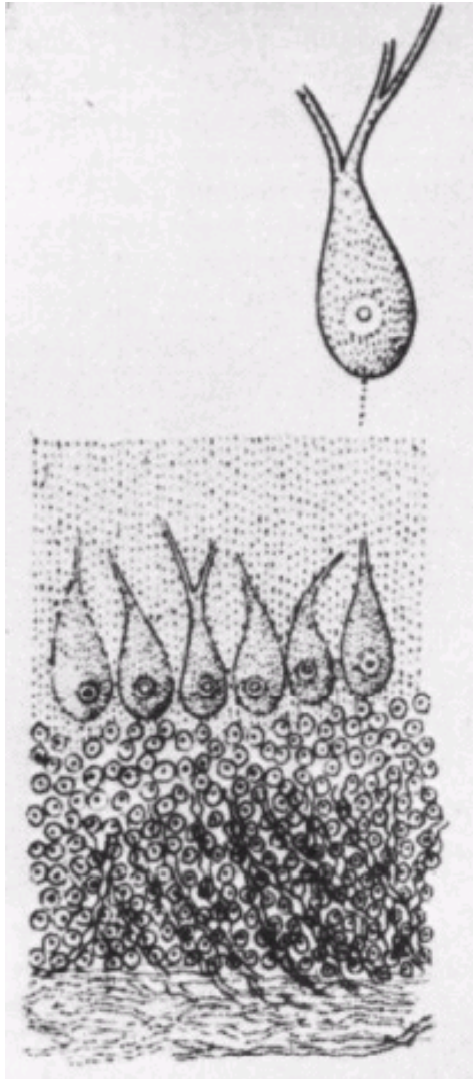
旧口動物

新口動物

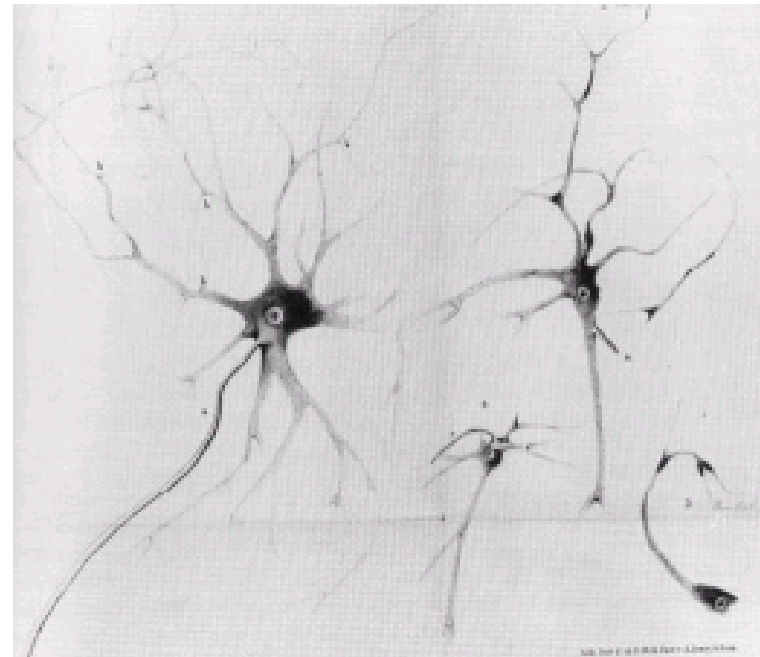
刺胞動物

87

ニューロンの発見



1837年にPurkinjeが観察した小脳の神経細胞



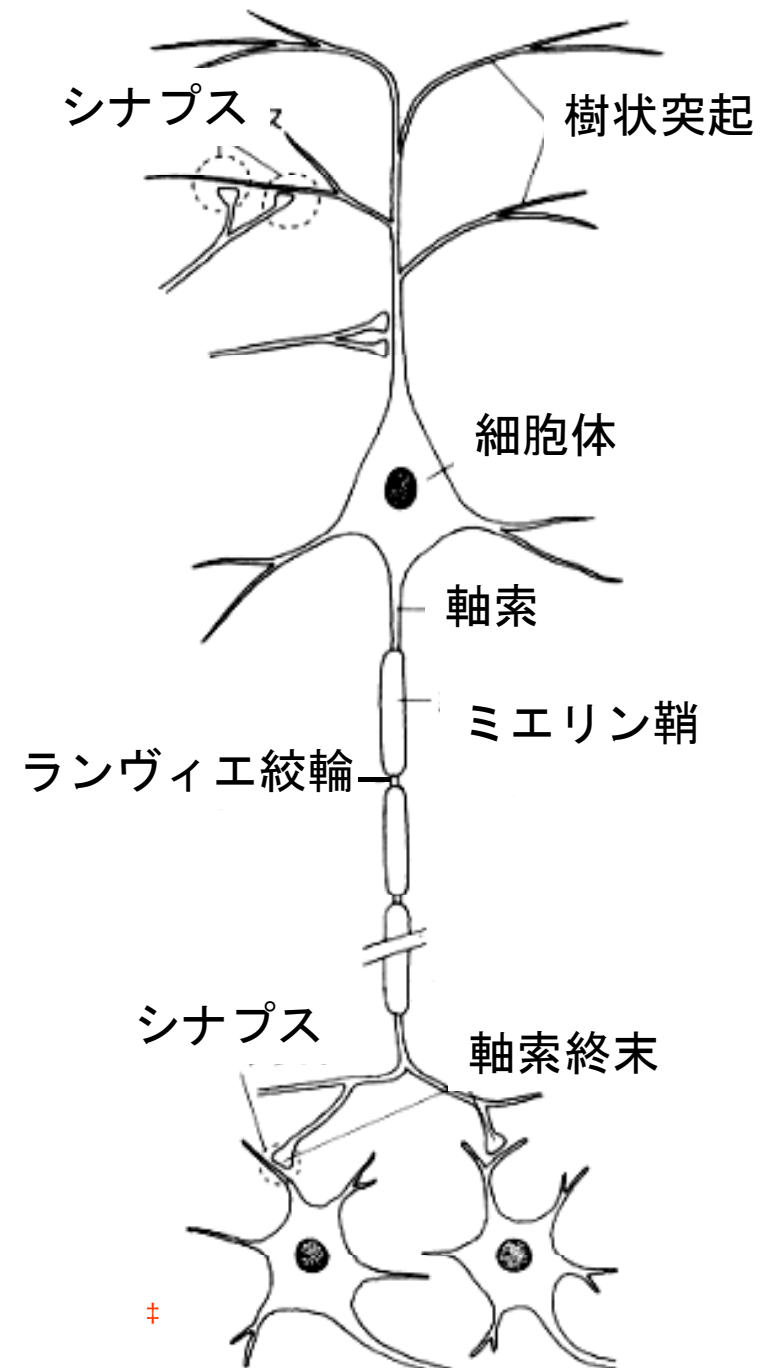
1865年にDeitersが観察した大型の脊髄運動ニューロン

ニューロンの形態



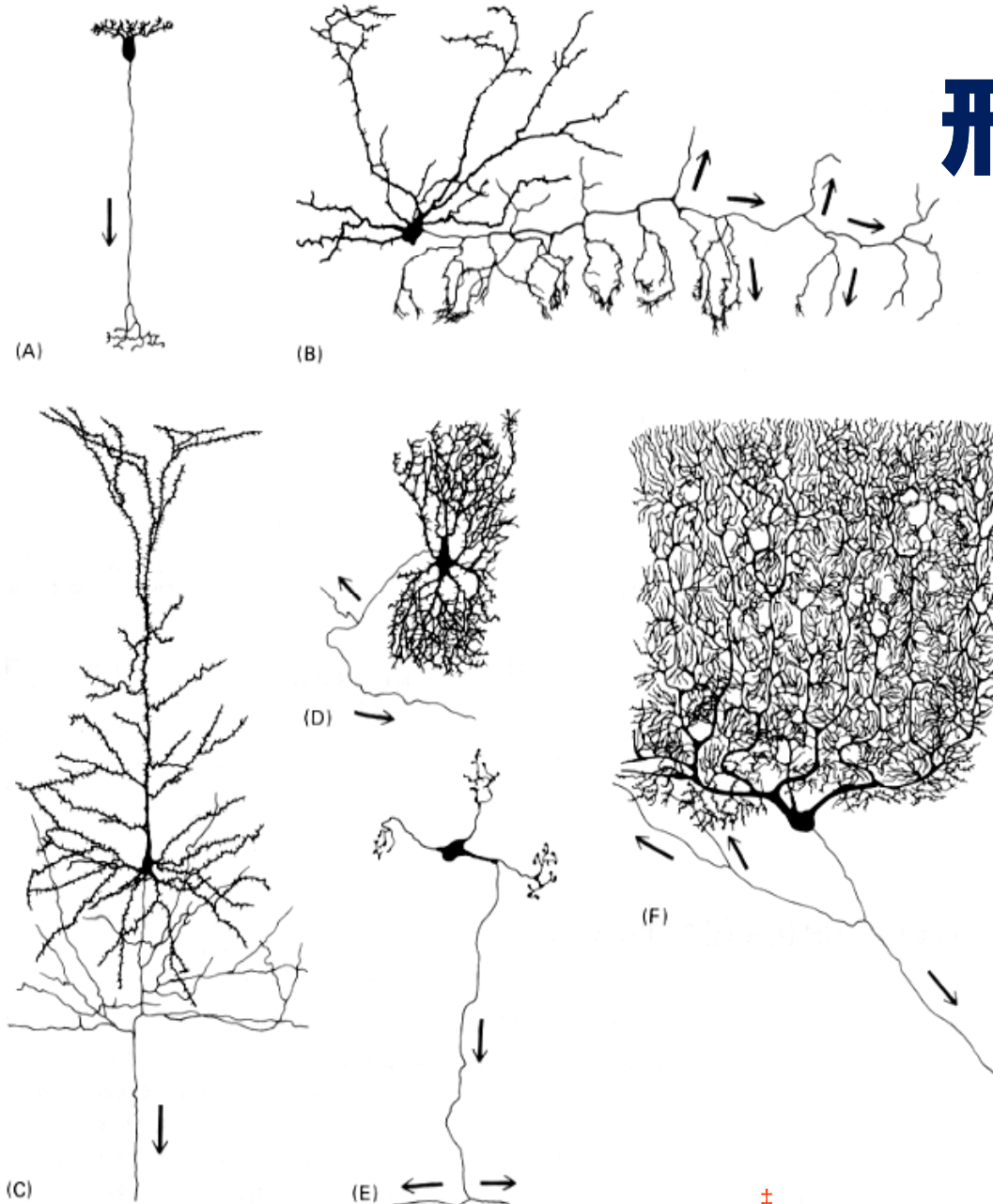
Santiago Ramon y Cajal

出典：wikipedia



脳・神経と行動、岩波書店、p2、図1-1

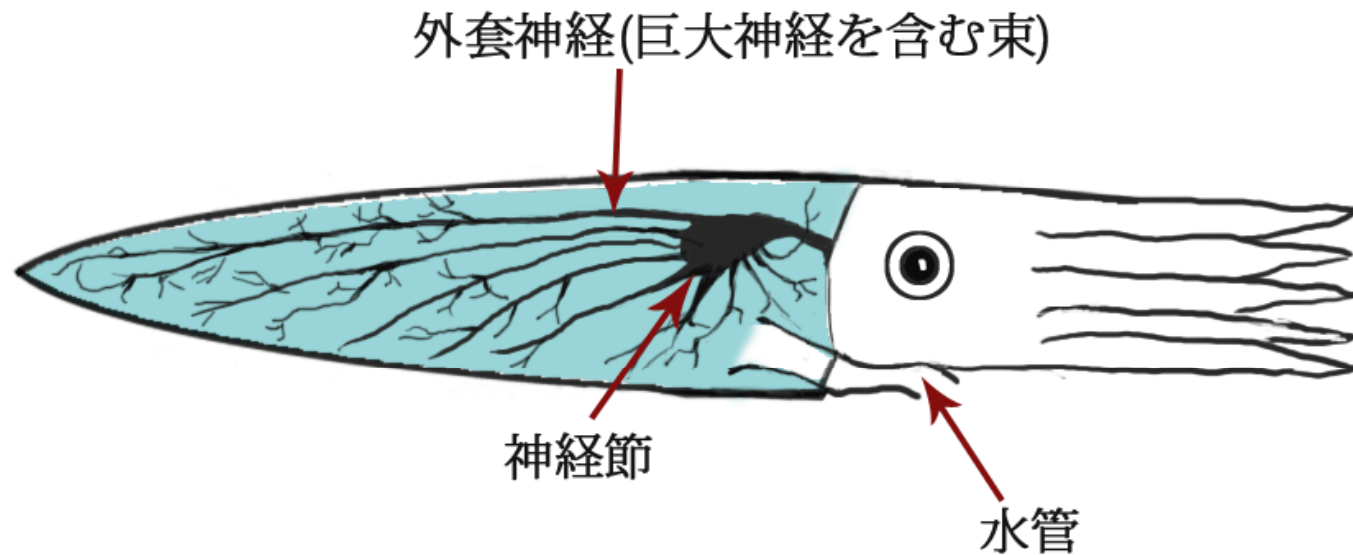
さまざまな 形態のニューロン



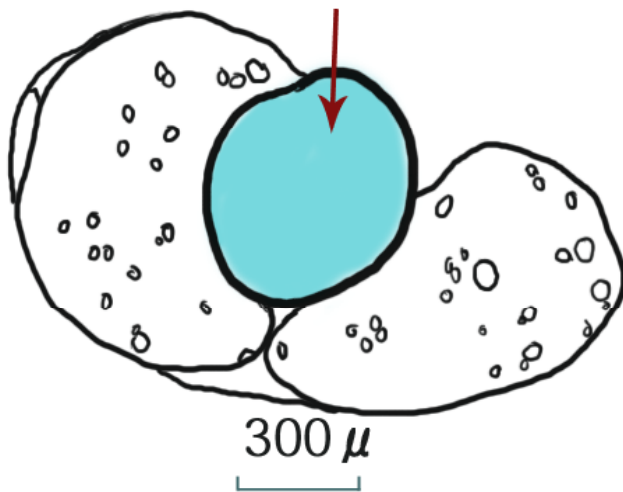
- A) トカゲ網膜双極細胞
- B) マウス小脳籠細胞
- C) ウサギ大脳皮質錐体細胞
- D) ヒト脳幹の細胞
- E) ネコ小脳顆粒細胞
- F) ヒト小脳プルキンエ細胞

神経情報：活動電位

A



B



ヤリイカの巨大神経軸索

著作権処理の都合で、
この場所に挿入されていた
“ヤリイカの解剖の動画”を
省略させていただきます。

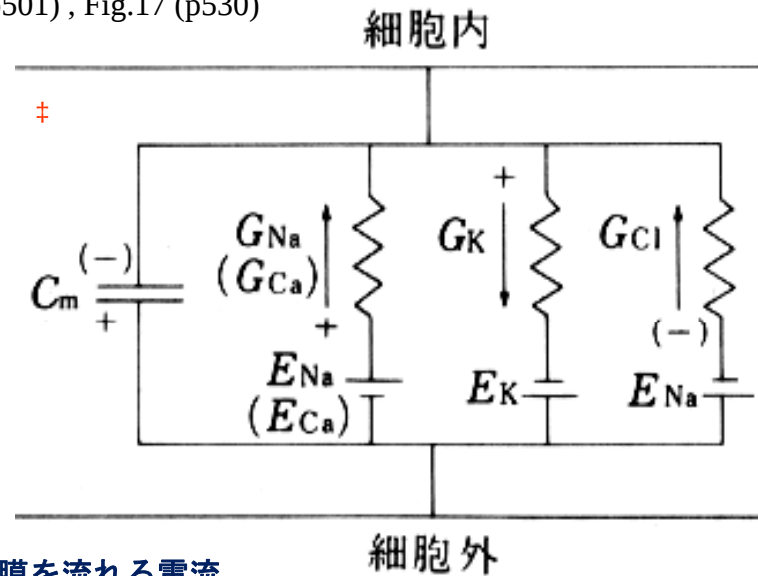
出典：nerve

A. L. Hodgkin and A. F. Huxley
A Quantitative Description of Membrane Current
and its Application to Conduction and Excitation
in Nerve.

Journal of Physiology, 117, 500-544, 1952. Fig.1
(p501), Fig.17 (p530)

神経興奮現象の定量的記述

Hodgkin & Huxley, 1952



膜を流れる電流

- 1) イオン電流 と 容量性電流
- 2) イオン電流 : Na, K, Cl
- 3) イオン電流 : 駆動力と膜コンダクタンスによって決まる
コンダクタンスは、膜電位と時間によって変化する。

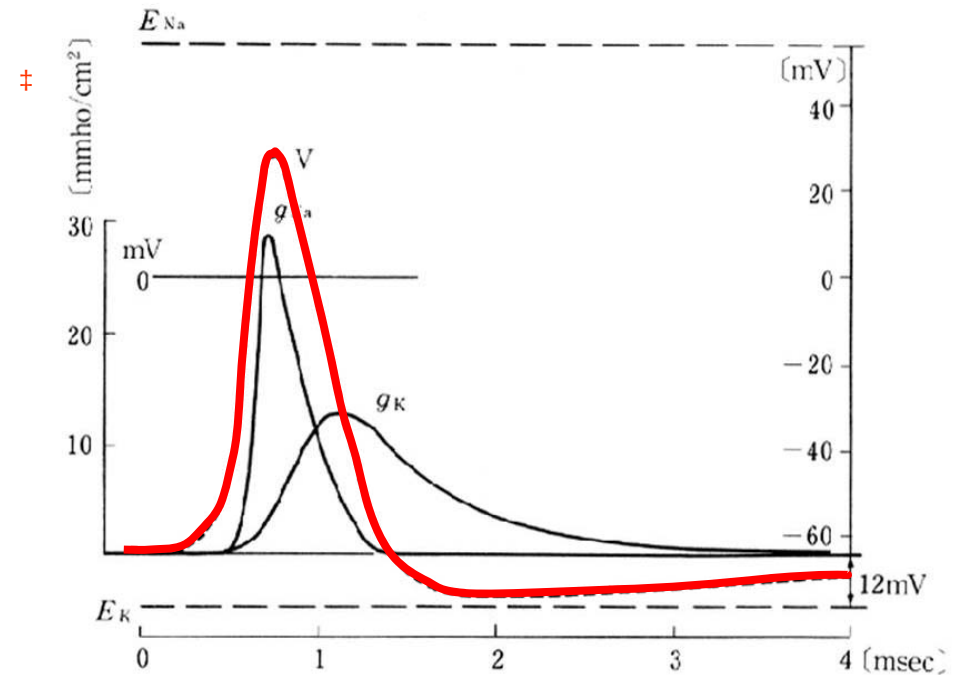


図 2・6 g_{Na} と g_K の変化と活動電位 [Hodgkin, A.L. and Huxley, A.F., 1952b]

$$I = C_m \frac{dV}{dt} + \bar{g}_{Na} \cdot m^3 h \cdot (V - V_{Na}) + \bar{g}_K \cdot n^4 \cdot (V - V_K) + \bar{g}_L \cdot (V - V_L) \quad (1.4)$$

$$\frac{dm}{dt} = \alpha_m(V) \cdot (1 - m) - \beta_m(V) \cdot m \quad (1.5)$$

$$\frac{dh}{dt} = \alpha_h(V) \cdot (1 - h) - \beta_h(V) \cdot h \quad (1.6)$$

$$\frac{dn}{dt} = \alpha_n(V) \cdot (1 - n) - \beta_n(V) \cdot n \quad (1.7)$$



神経回路：神経による情報処理

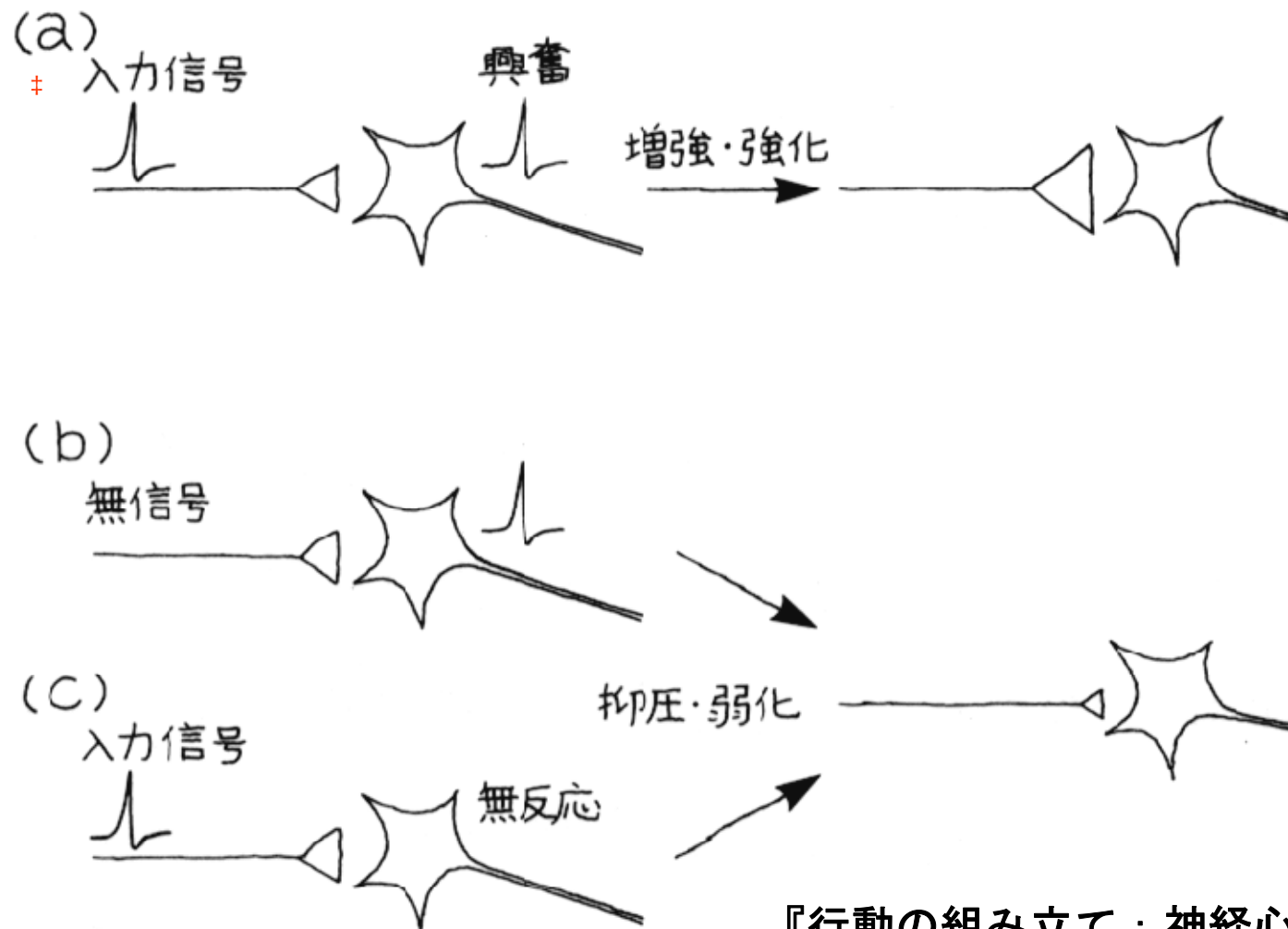
著作権処理の都合で、
この場所に挿入されていた
“軸索の末端が他のニューロン上に
シナプスを形成している様子の写真”を
省略させていただきます。

ヘブ型学習



ドナルド・ヘップ
(1904-1985)

櫻井芳雄：考える細胞ニューロンより



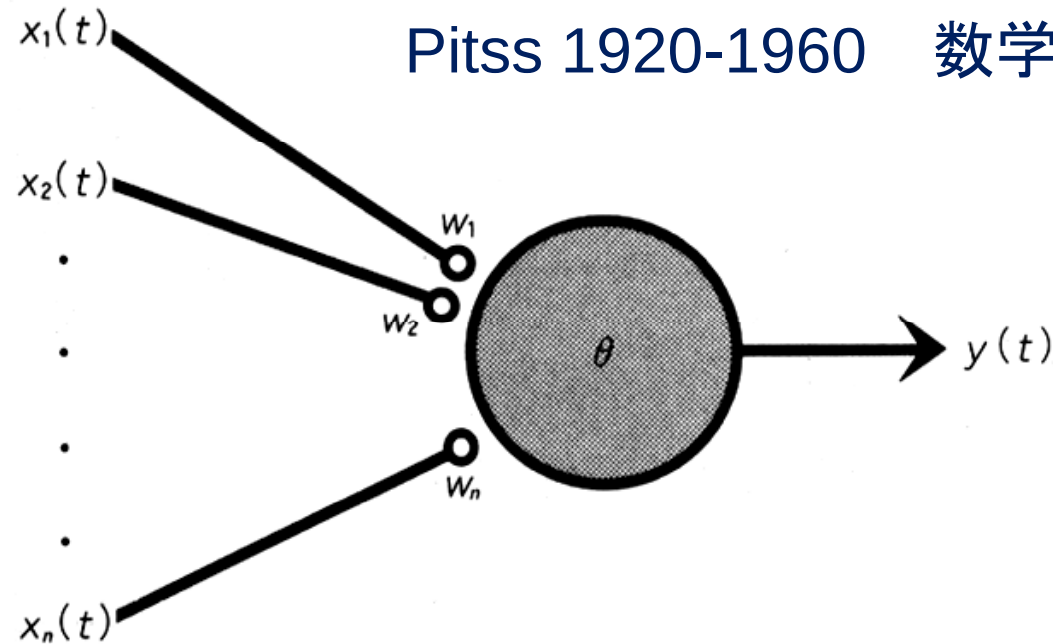
『行動の組み立て：神経心理学の理論』(1949)

図 9-10 ヘップ型(a)および逆ヘップ型(b, c)の可塑性シナプス。入力繊維のシナプス終末が大きくなる変化はシナプス接続の増強・強化を，小さくなる変化はシナプス接続の抑圧・弱化を意味している。「脳・神経と行動」より

神経回路モデル

マツカロ・ピッツ モデル (1943)

McCulloch 1898-1969 生物学者
Pitss 1920-1960 数学者



$$y(t+1) = 1[\sum w_i x_i(t) - \theta]$$

ただし,

$$1[u] = \begin{cases} 1 & (u \geq 0) \\ 0 & (u < 0) \end{cases}$$

神経細胞の振る舞いを抽象化した単純な素子を結合すれば、脳のような機械を作ることができる

ニューロンの線形閾値素子モデルを提案

生物に共通の神経信号

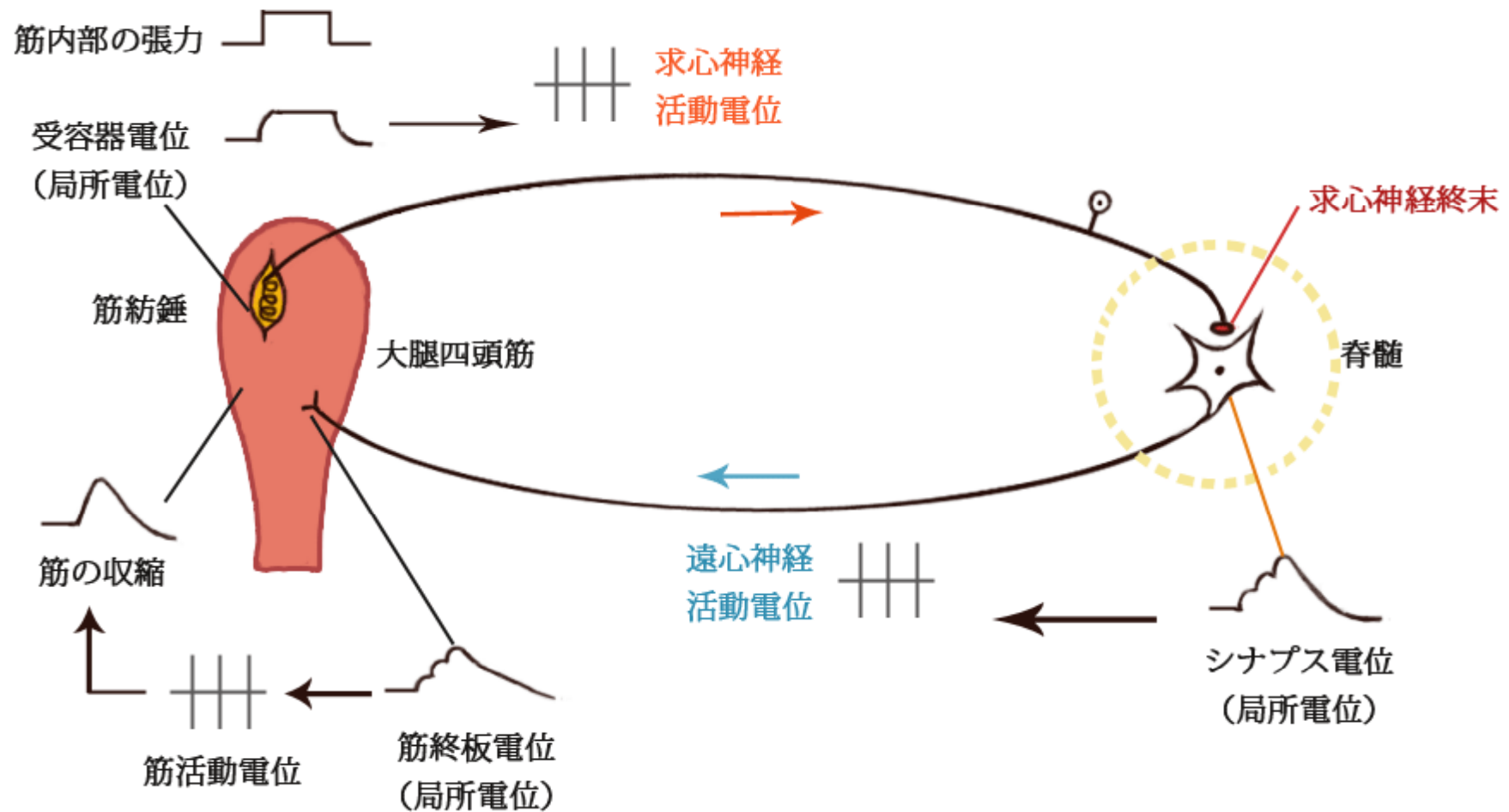
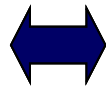


図 膝蓋腱反射で用いられるシグナル

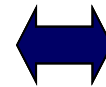
センサ・脳研究の研究技術

感覚入力から行動出力までのシステム

感 覚



脳



運 動

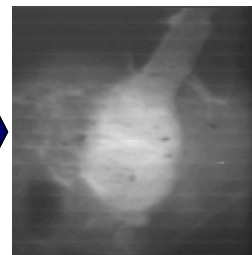
異なったレベルからのアプローチ



遺伝子



ニューロン



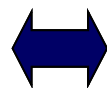
神経回路



行動

分析と統合によるアプローチ

分子
生物学



神経生理学
行動学



コンピュータシ
ミュレーション



ロボ
ティクス



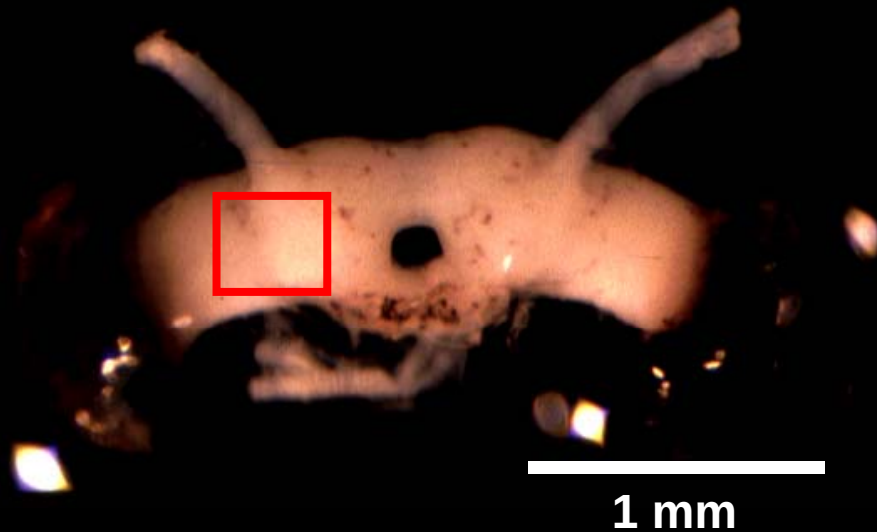
分析



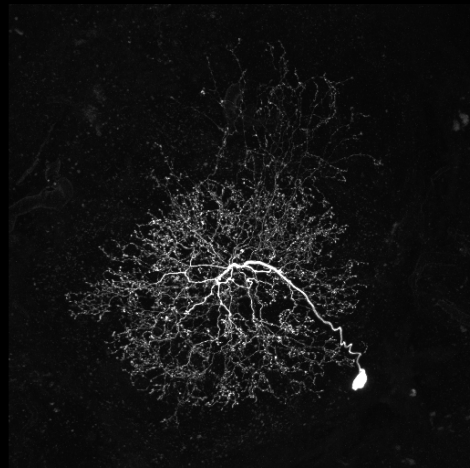
統合



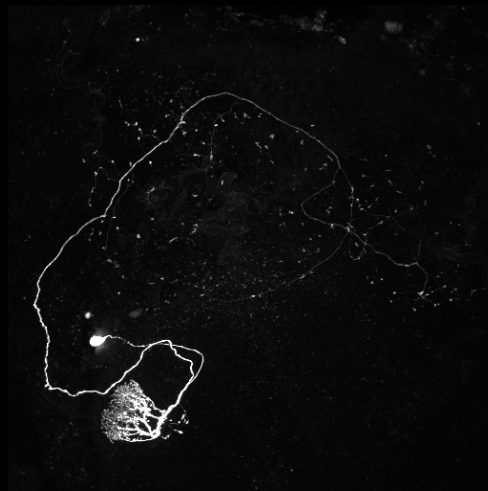
モデル脳と単一神経細胞の可視化



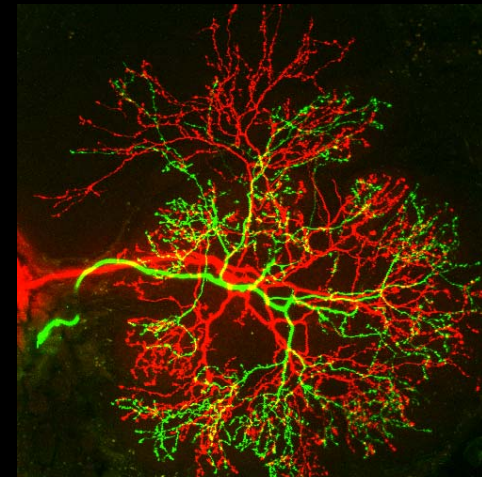
微分干渉顕微鏡映像



局所介在神経



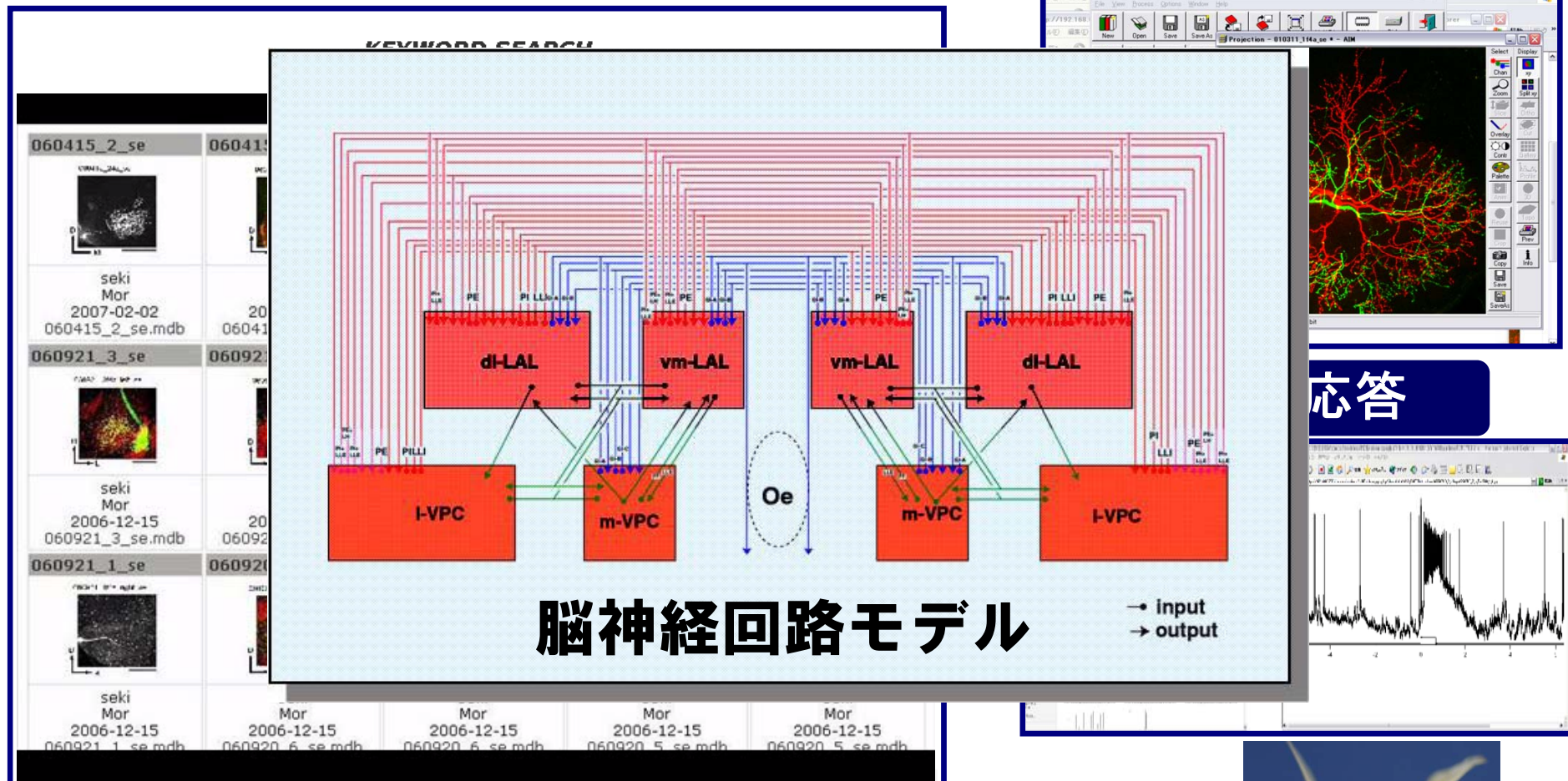
出力神経



モデル脳構成ニューロンの網羅的データベース化

ニューロンデータベース

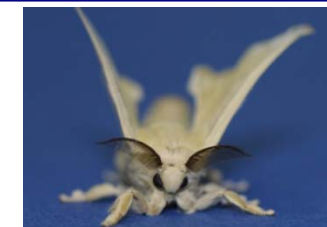
神経形態



応答

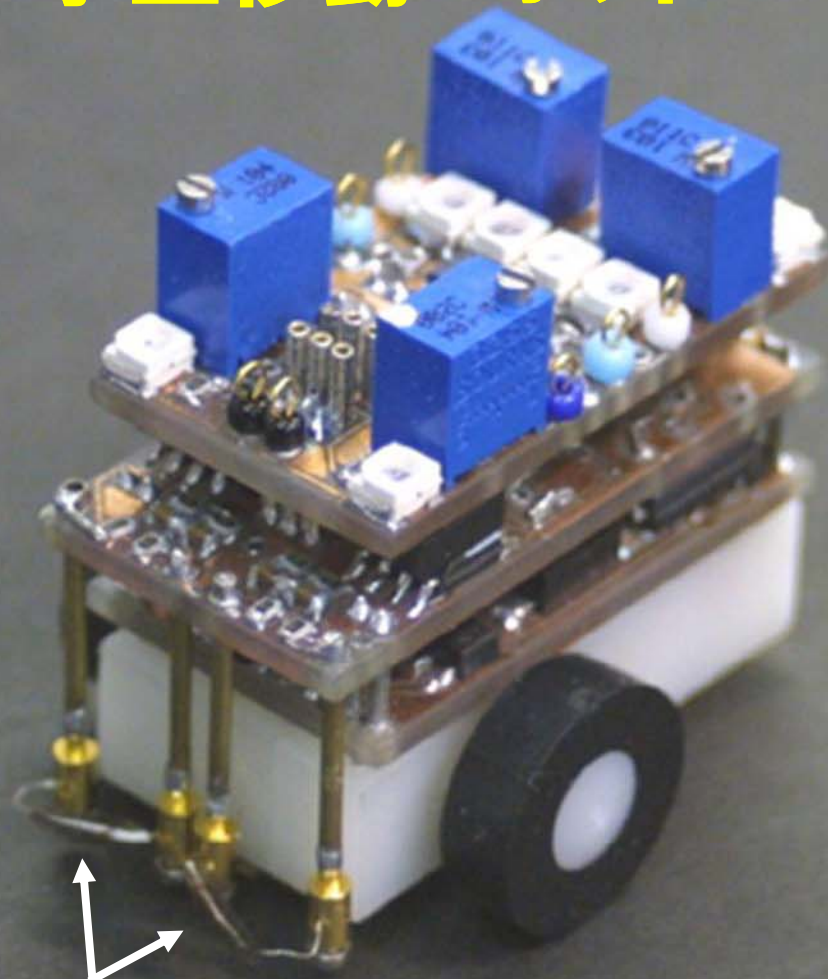
形態学
生理学
イメージング
免疫組織化学

: 単一神経細胞、細胞体群
: 嗅覚、視覚、機械感覚応答など
: 膜電位感受性色素、カルシウム感受性色素
: GABA, 5HT, FMRFamide, tyramine, histamine

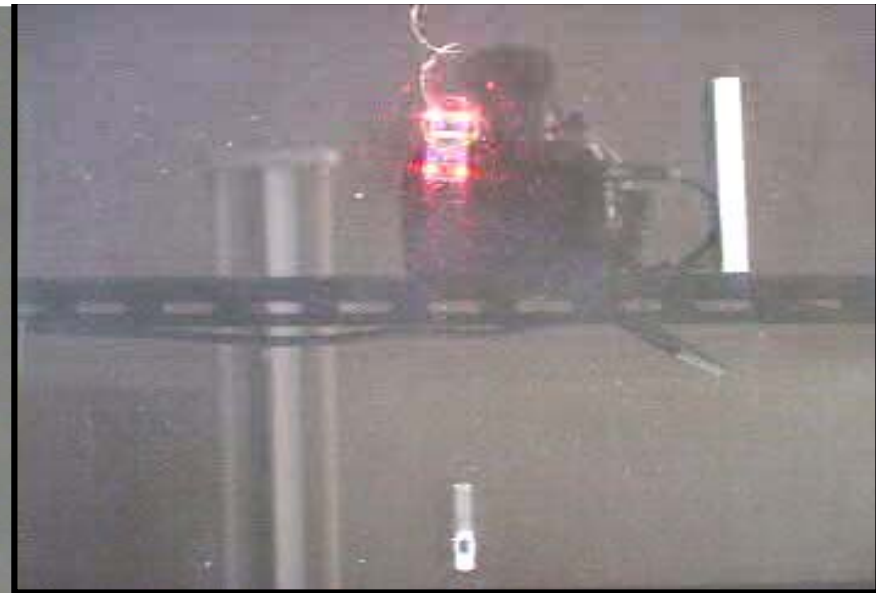


カイコガ (*Bombyx mori*)

匂いを追跡する 小型移動ロボット



触角



触角

情報とロボットおよび生命

生命を知るロボットの情報学

1. 生物と外界をつなぐ情報
 - ・ 感覚と行動
2. 環境世界
 - ・ 感覚、時間、サイズ情報
3. 環境と脳と身体をむすぶ情報
 - ・ 神経と脳
 - ・ **生物・機械融合システム
(BMI、サイボーグ)**



脳を活かす

『脳を読む』 『脳を繋ぐ』 『脳と社会』

神経生理学者、計算理論家、臨床医、脳計測技術者、コンピュータサイエンティスト、ロボット研究者、制御科学者、医用電子技術者、経済学者、企業、文筆家等々、様々な専門家が所属と分野の壁を乗り越えて、議論、研究、技術開発を積み重ねることから国際競争力のある研究が生まれます。

<http://www.cns.atr.jp/nou-ikasu/index.html>

『脳を読む』

脳信号から必要な情報を抽出し、
デコーディング(復号化)する。

応用

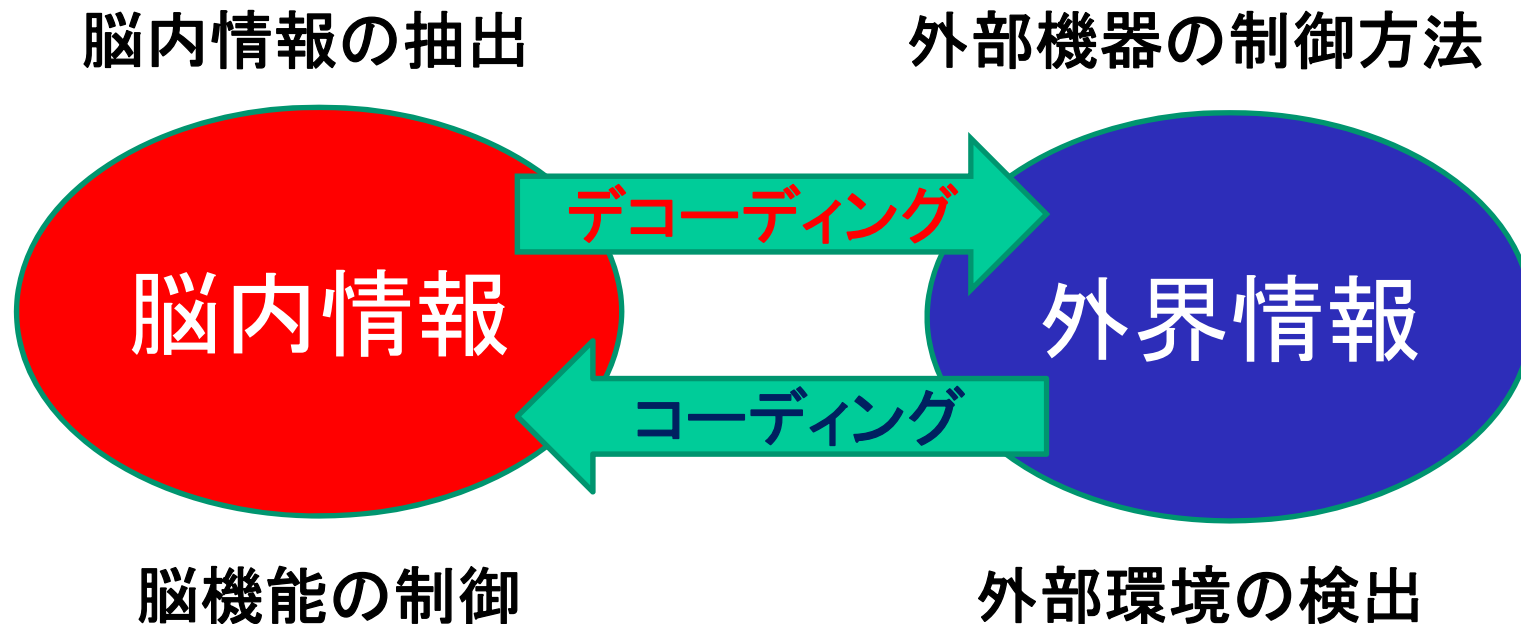
- ① 人の主観的な意識や
意図、さらに無意識下
の情報までを脳から読
み出す
- ② ニューロエコノミクス、
ニューロマーケティング
等 商品開発、宣伝、
人材のリクルートなど

著作権処理の都合で、
この場所に挿入されていた
“**Functional MRI**による
脳の測定の動画”を
省略させていただきます。

<http://viperlib.york.ac.uk/index.asp>

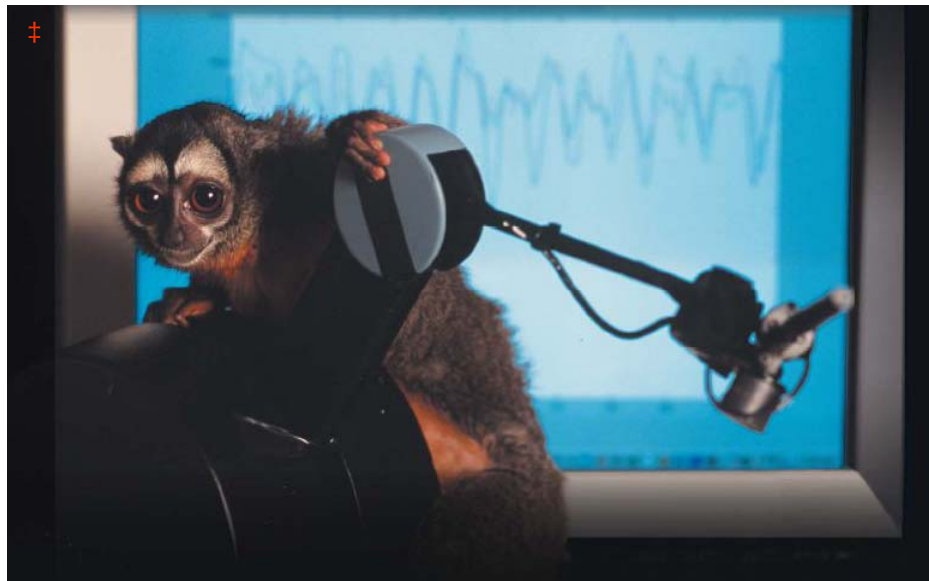
『脳を繋ぐ』 BMI

Brain Machine Interface (BMI)とは、脳と外界との情報の直接入出力を可能とする技術



Brain Machine Interface

1. 脳の出力を機械に送り制御する
2. 機械の信号を脳に直接送りこみ
脳活動进行操作する技術



考えただけで別室に設置されたアーム
を操作するヨザルのベル。



BMIの分類

■感覚入力型（人工感覚）

脳内に信号を送り、さまざまな感覚を生起あるいは増強する

- ・人工感覚器 (Artificial Sensory Organ)
- ・人工内耳 (Cochlear Implant)
- ・人工視覚 (Visual Prosthesis)
- ・人工触圧 (Artificial Sensation)

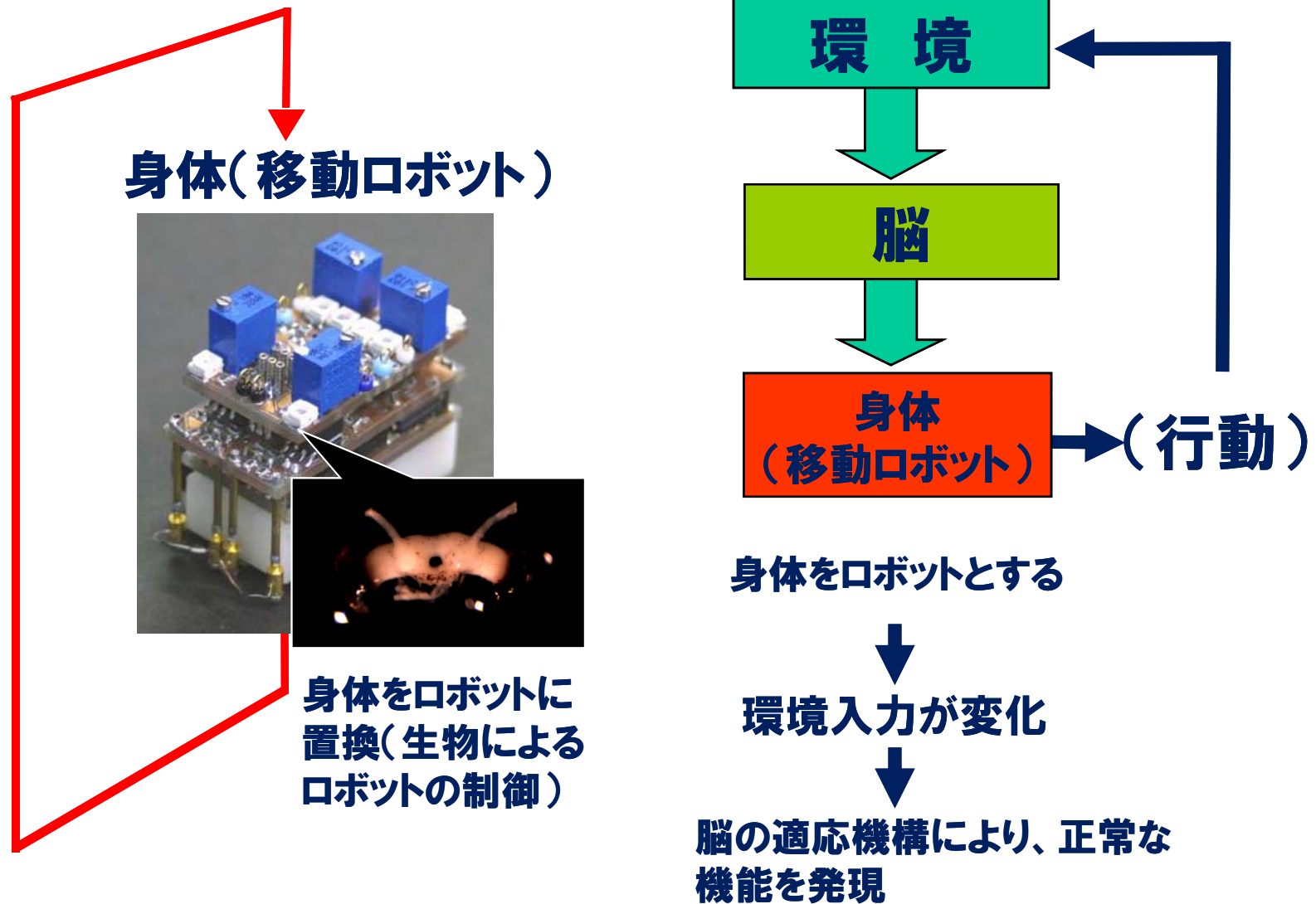
侵襲・非侵襲

■運動出力型

脳神経活動から運動出力を表現する活動を検出して、ロボットなどの外部装置を制御する

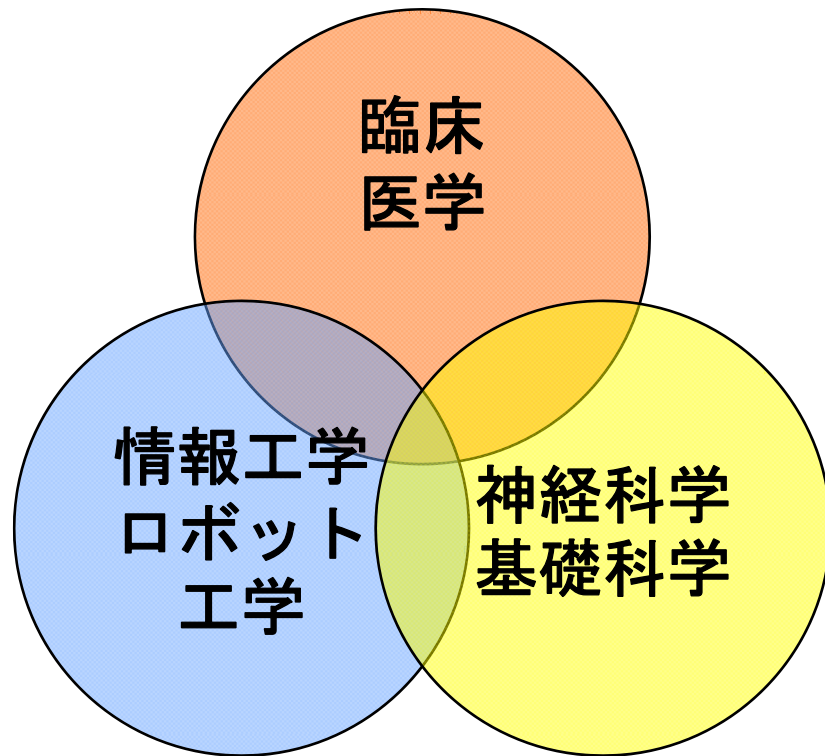
■脳深部刺激 Deep Brain Stimulation (DBS)

BMIの原理



BMIの目的

BMIによって「身体により制限されている人間の能力の拡大」を実現する



臨床医学

- ・ 身体的な障害の克服
- ・ 脊髄損傷患者の歩行補助
- ・ ヒハビリテーション
- ・ 人工網膜による視覚回復

情報工学・ロボット工学

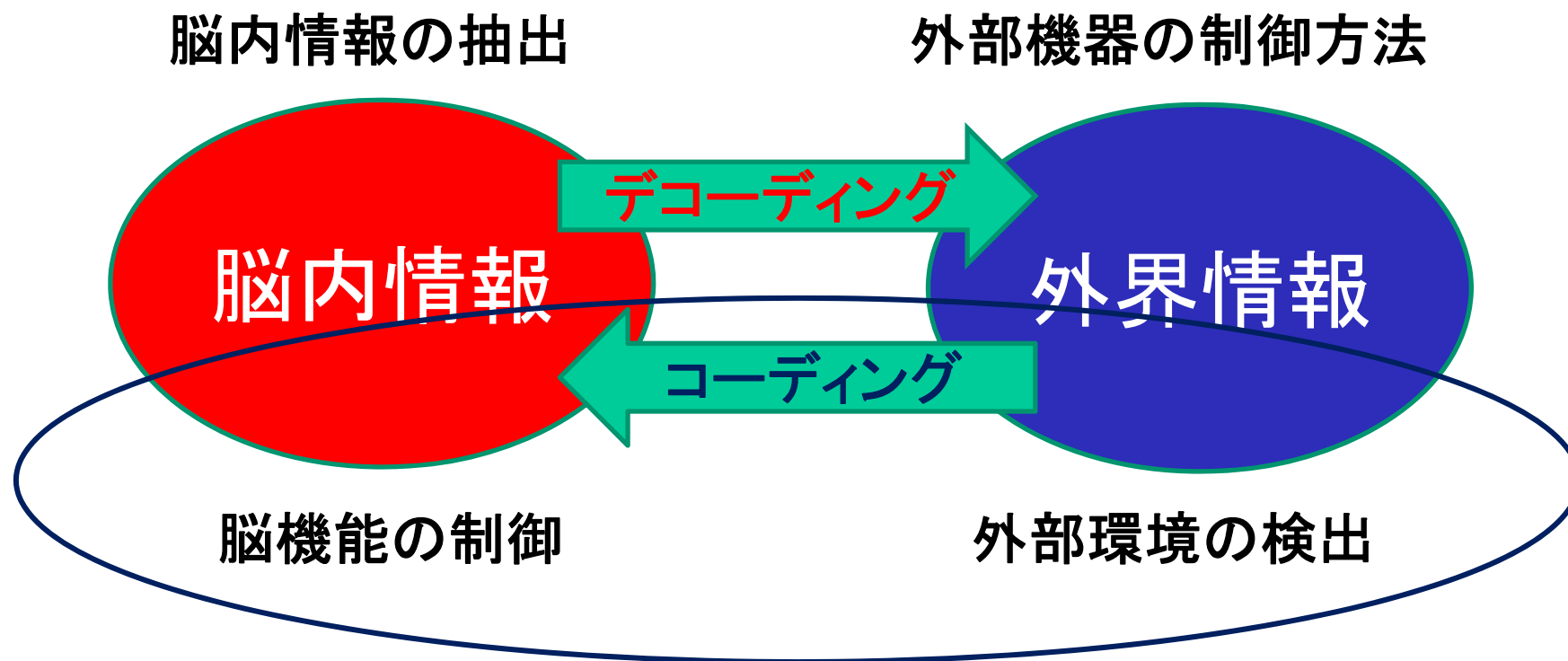
- ・ 超多自由度ロボットの操作
- ・ 脳内情報の発信受容によるコミュニケーション

神経科学・基礎科学

- ・ 脳機能の解明

感覚入力型BMI

脳内に信号を送り、さまざまな感覚を生起
あるいは増強する(人工感覚)
人工内耳、人工視覚、人工触圧覚



人工内耳 (Cochlear Implant)

伝音性難聴

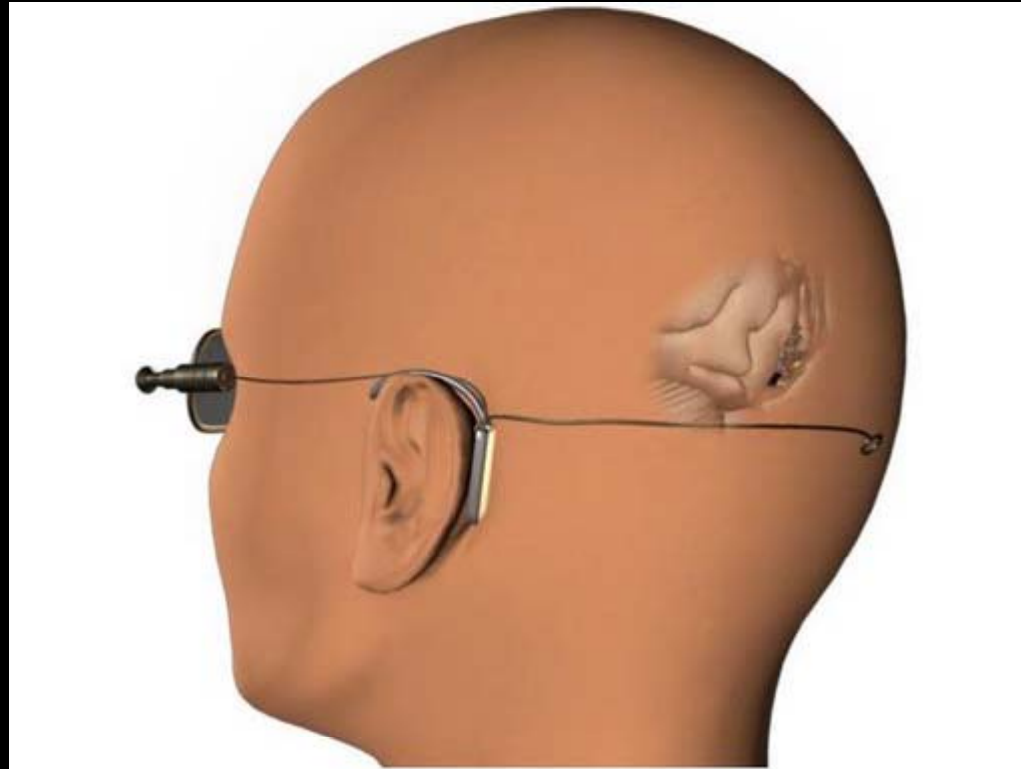
外耳から中耳までに生じる障害により起こる。

感音性難聴

蝸牛(内耳)から中枢までに生じる障害により起こる



人工視覚 (Visual Prosthesis)

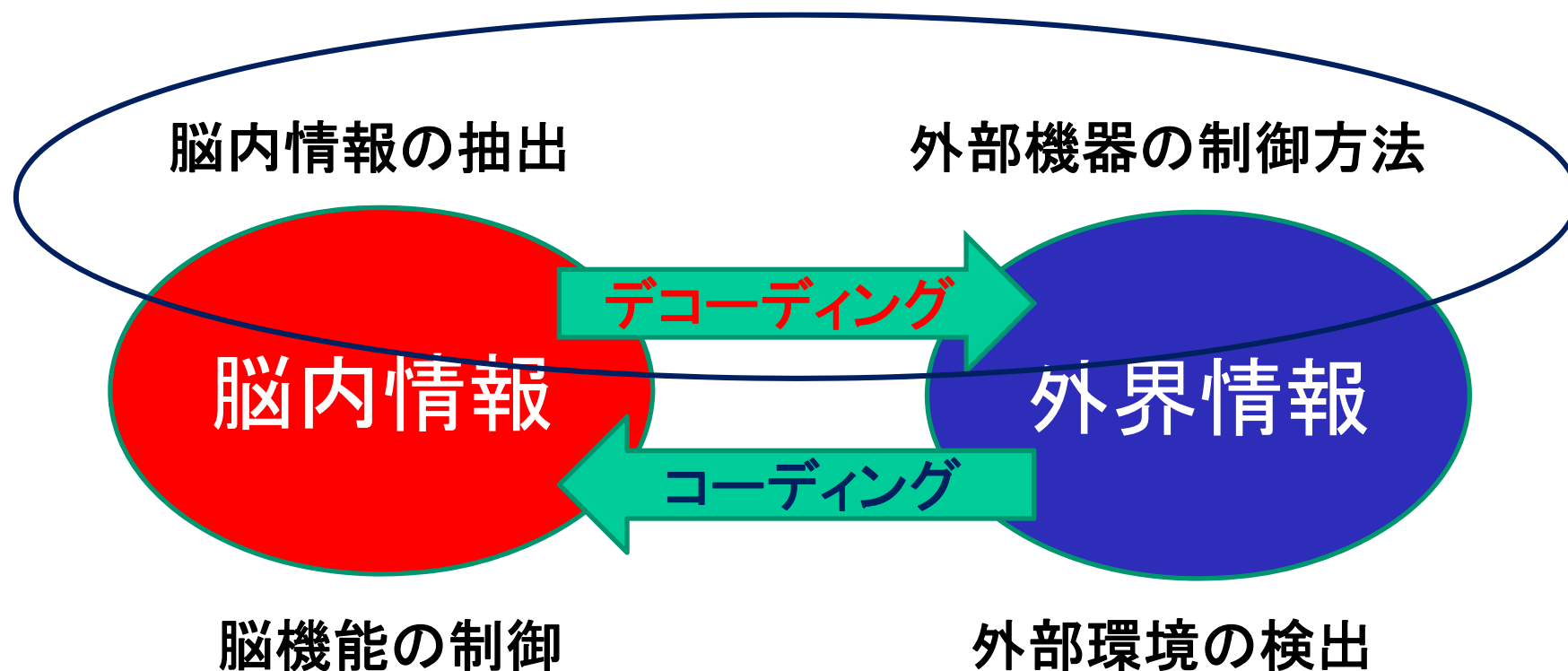


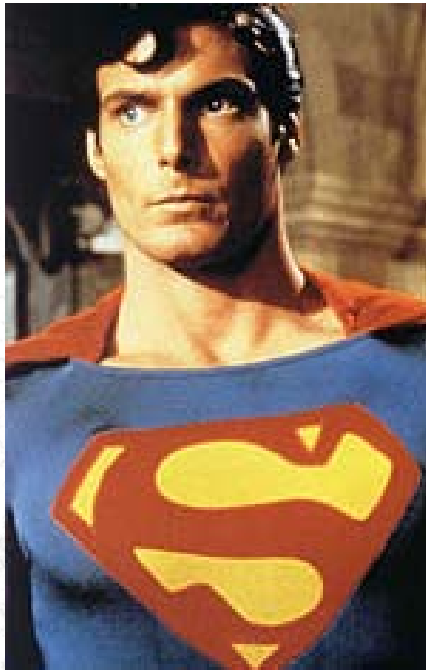
† 出典 <http://en.wikipedia.org/wiki/File:ImplantSawan.JPG>

※著作権の関係で画像を差し替えています。

運動出力型BMI

脳神経活動から運動出力を表現する活動を
検出して、ロボットなどの外部装置を制御する





脳機能の復活

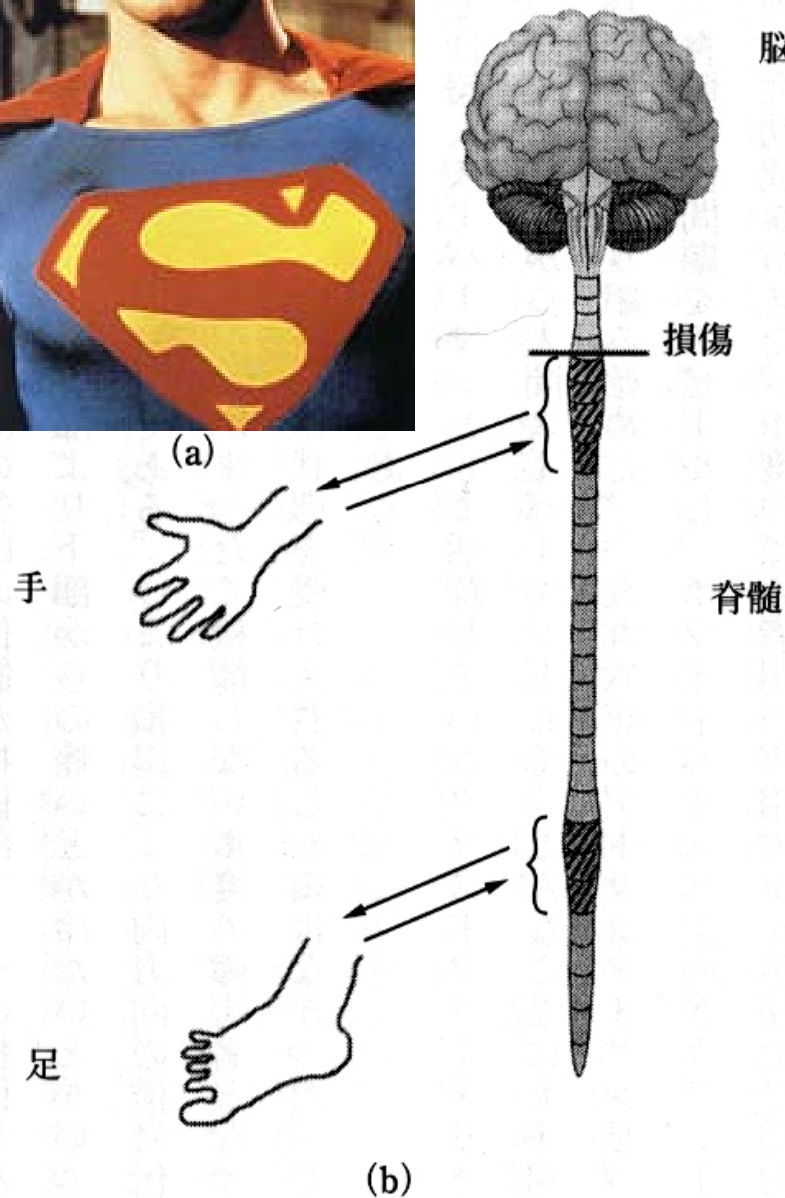


図 4.1 スーパーマン (クリストファー・リーブ) と脊髄損傷

脳と脊髄は中枢神経系を構成している（本文参照）。中枢神経系からの命令が手や足に送られ、逆に皮膚に存在する痛い・冷たいなどの感覚器からの信号は脊髄・脳へと送られる。クリストファー・リーブは落馬で図の頸部を損傷し、手足はまったく使えない状態になってしまった。



©日本脊髄協会

September 25, 1952 - October 10, 2004

脳内埋め込み電極によるカーソル制御



米サイバーキネティックス社『ブレインゲート』システムの臨床試験を開始

被験者：Nagle氏、頸髄損傷で、腕・脚の四肢麻痺(tetraplegia)
96本の微小電極装置(BrainGate) を運動野に装着

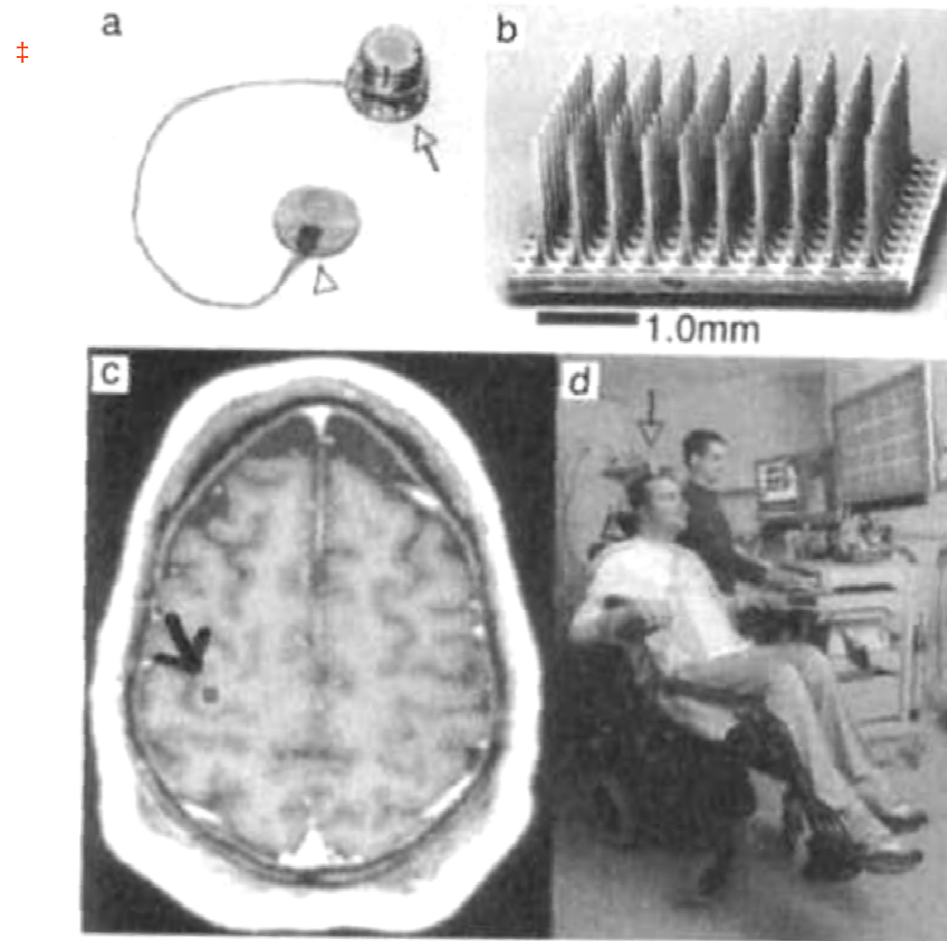


図2.11 人の臨床試験で用いられているBMIシステム (Hochberg et al. (2006)より)
a,b: ブレイン・ゲイトと電極, c: 電極埋め込み部位, d: 実験場面

被験者: Nagle、頸髄損傷で、腕・脚の四肢麻痺(tetraplegia)
96本の微小電極装置(BrainGate) を運動野に装着



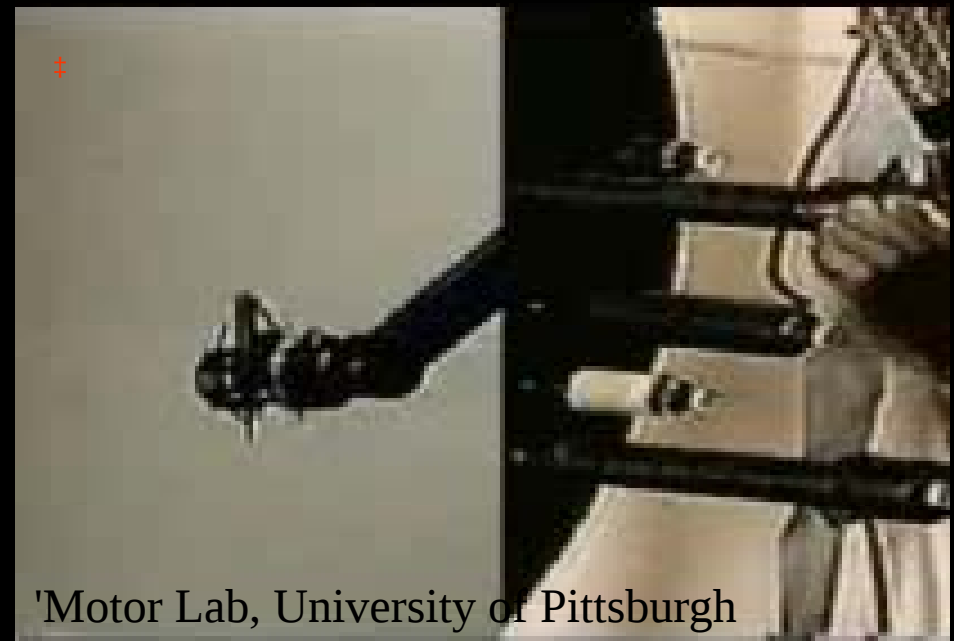
'Motor Lab, University of Pittsburgh



'Motor Lab, University of Pittsburgh

サルの脳の信号で 人工腕をコントロール

Dr. Andrew Schwartz
Univ. of Pittsburgh

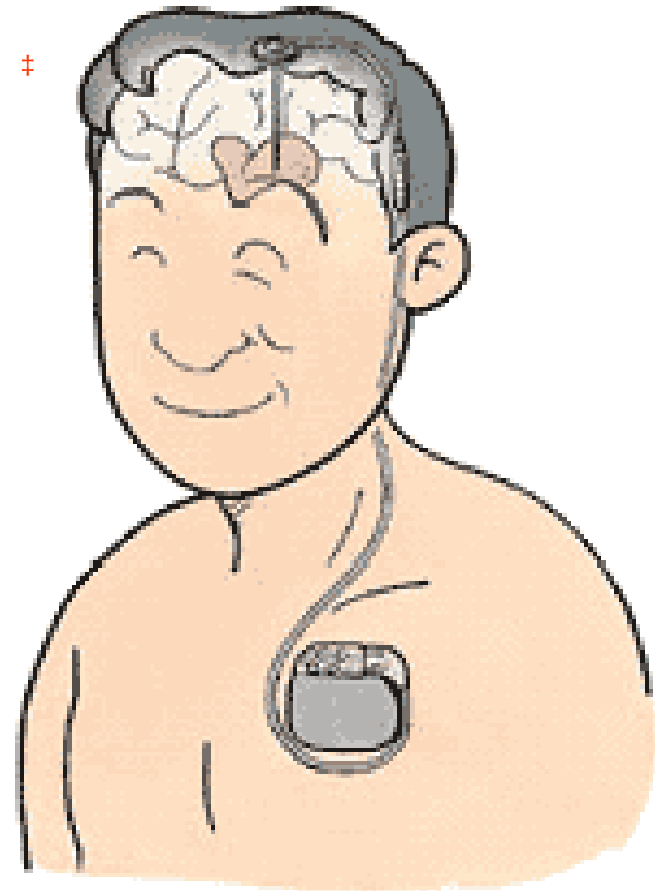


'Motor Lab, University of Pittsburgh

脳深部刺激療法

Deep Brain Stimulation (DBS)

自分の意志に反して手足がふるえてしまう(振戦)といった不随意運動は、脳の働きと密着した関係にあります。そこで、そのような不随意運動の治療として、運動を制御している脳に細い電極を入れて、脳に電気刺激を送り、運動異常を調節しようとする治療法「脳深部刺激療法(DBS)」があります。



©日本メトロニック株式会社

脳深部刺激手術

医療ルネサンス

パーキンソン病はいま
手術・リハビリ
脳に電気刺激・・・歩けた！

脳深部刺激手術の手順　〈１〉頭を固定する金属
枠を取り付け、MRI画像で電極を入れる位置を
特定　〈２〉頭部の表面に局所麻酔し、頭蓋（ずが
い）骨に穴を開け、エックス線で確認しながら電
極を植え込む　〈３〉脳波や、患者自身が手指を動
かすことで、動作の改善を確認　〈４〉後日、電気
刺激を送るパルス（電気信号）発生装置を肩に埋
め込む。装置は５年前後で交換
（2005年9月1日 読売新聞）

著作権処理の都合で、
この場所に挿入されていた
“手術写真”を
省略させていただきます。

脳深部刺激手術は、患者の意
識がある状態で手や指の動き
を見ながら行う（東京都の日
本大板橋病院で）

『脳と社会』

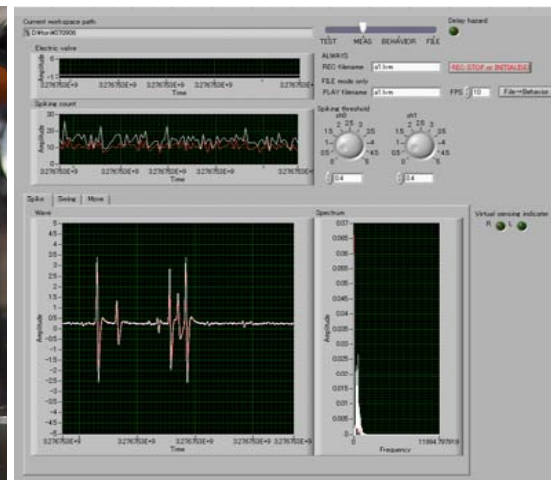
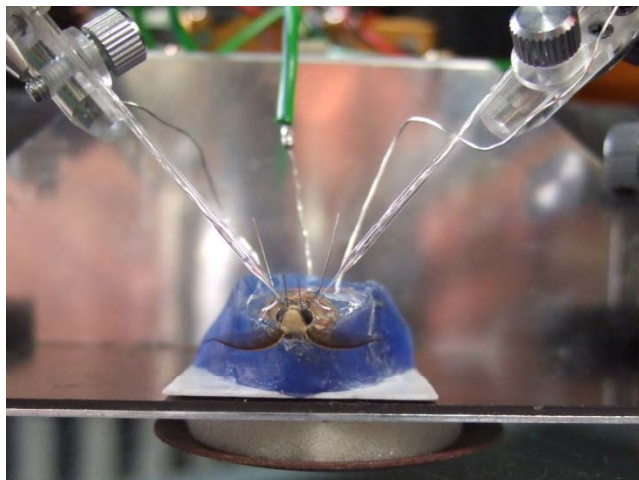
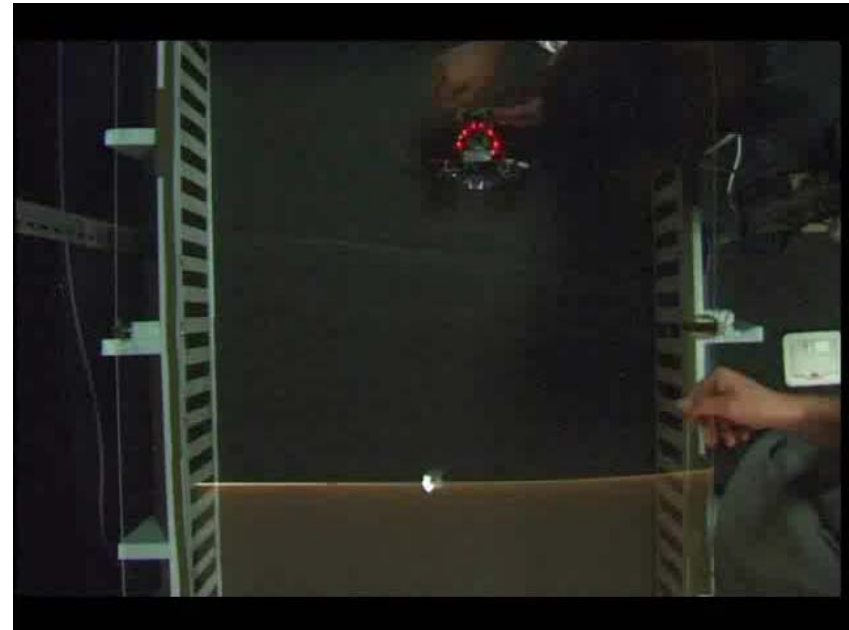
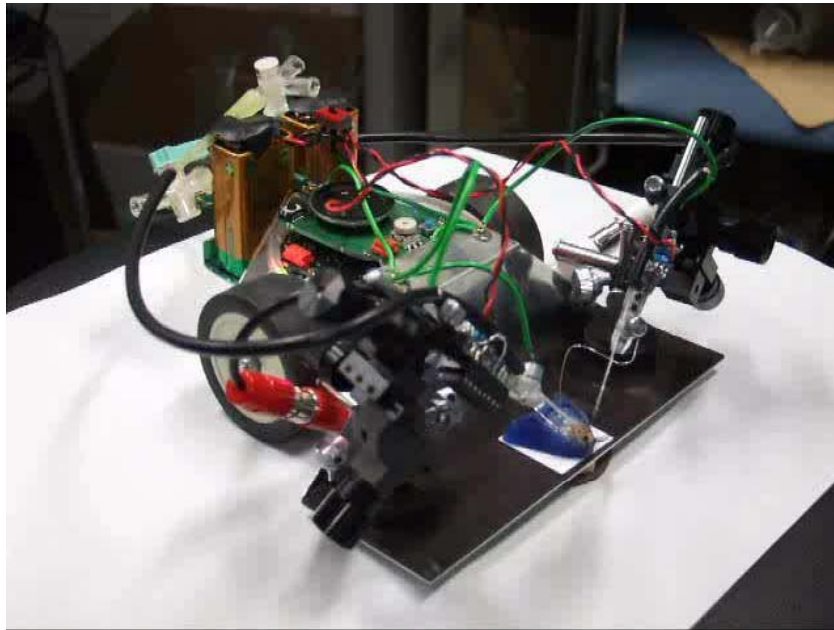
神経倫理学 (Neuroethics)

脳の入出力を改変→倫理的な問題

心の物質的、神経科学的な基盤が明らかになり、脳とコンピュータ・ロボット、さらに脳とインターネット、人と人との脳を直結する技術が生まれつつあるいま、倫理的な問題をしっかりと考えておくことが必要

昆虫の脳によるロボットの制御

昆虫-機械ハイブリッドの構築



Minegishi
& Toriihara

Collaborating with Prof. Kurabayashi (Tokyo Inst.Teck)