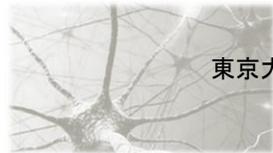




Rolf-Concept主催勉強 2021/03/27(土)



運動学習に必要な神経生理学



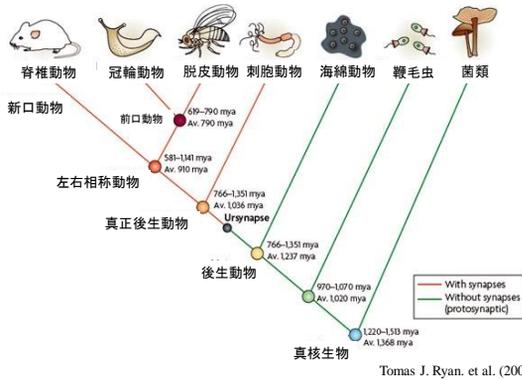
東京大学医科学研究所附属病院
安田 真章 (RPT, Ph.D)
shaq.masa@gmail.com

1

- 行為が生まれるまでの神経生理学
- 知覚について(対象者の主観的視点、客観的視点から)

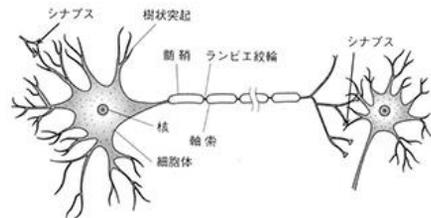
2

神経系はなぜ発生してきたのか



3

シナプス



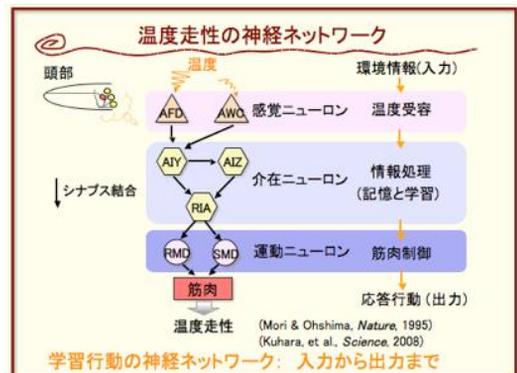
4

走性...刺激に対して方向性のある行動。
刺激源に向かうのは正、遠ざかるのは負。

走性	刺激源	正の走性を示す例	負の走性を示す例
光走性	光	ミドリムシ, ガ, 魚	ミミズ, ゴキブリ
重力走性	重力	ミミズ (地球の中心に向かう)	ゾウリムシ, カタツムリ (地球の中心から離れる)
化学走性	化学物質	ゾウリムシ (弱い酸性)	ゾウリムシ (強い酸性)
流れ走性	水流	メダカ, アメンボ (水源(上流)に向かう)	成長期のサケ (水源から離れる(下流へ))

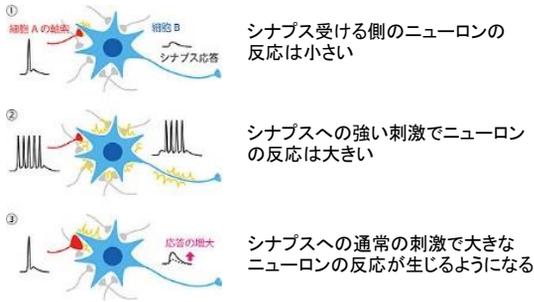
5

中枢神経系は介在ニューロンが発達・発生してきた



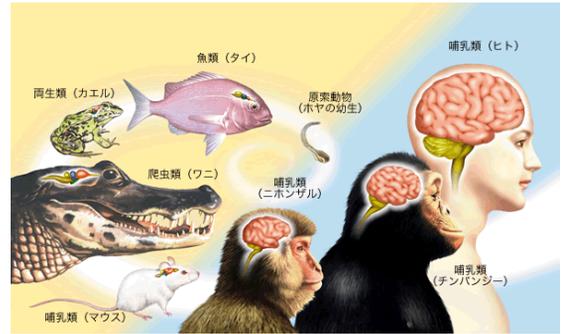
6

Hebbの法則



7

中枢神経系の進化

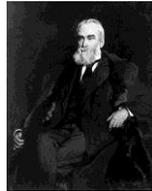


8

Jacksonによる中枢神経系の階層説

「随意運動」は進化の過程であると同時に心の産物である

1. 中枢神経系の進化とは「低次」のよく組織化された中枢から「最高次」の最も少なく組織化された中枢への過程である
2. 中枢神経系の進化とは最も「単純」な中枢から最も「複雑」な中枢への過程である
3. 中枢神経系の進化とは最も「自動的」なものから最も「随意的」なものへの過程である

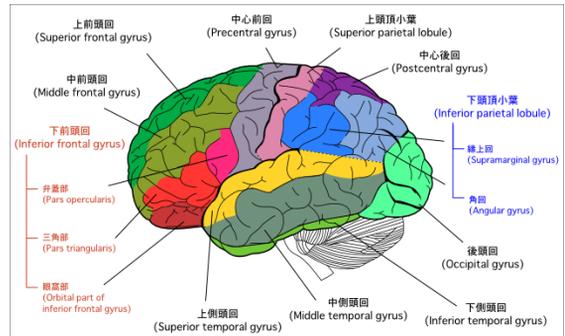


John Hughlings Jackson (1835-1911)

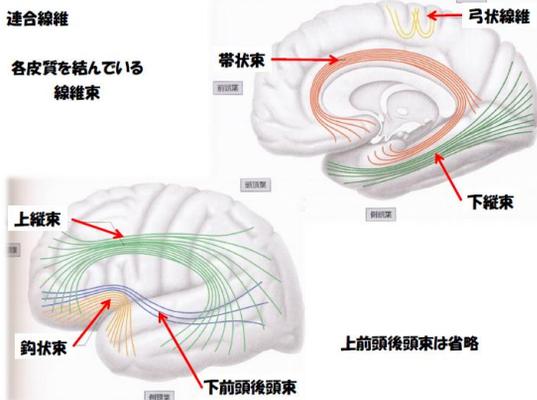
「最高次」の前頭葉連合野は神経系の進化のクライマックスとしての「心の器官(organ of mind)」であり、意識の身体的基盤を構成する

9

大脳新皮質の解剖学部位



10

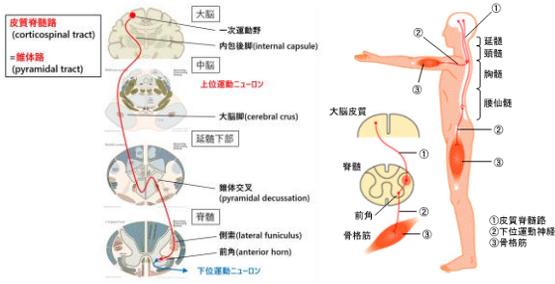


11

運動はどのように生成されるのか？

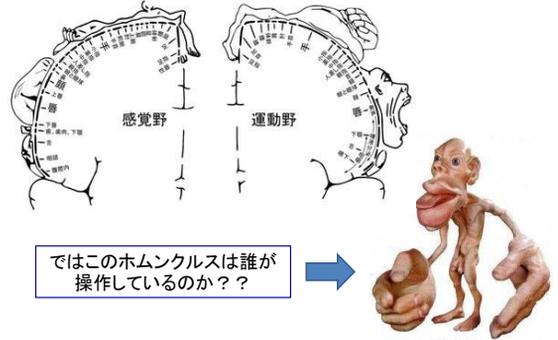
12

大脳皮質からの下降路(皮質脊髄路)



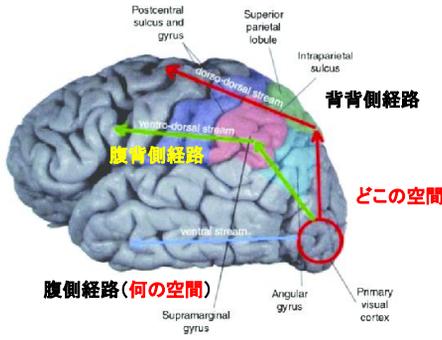
13

一次運動野や一次感覚野における身体部位表現



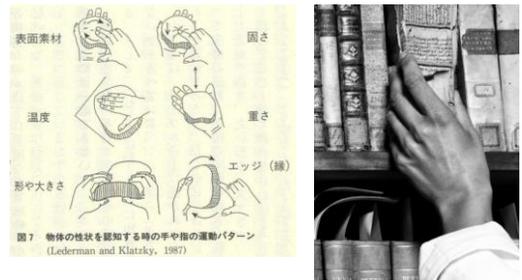
14

動きの生成メカニズム

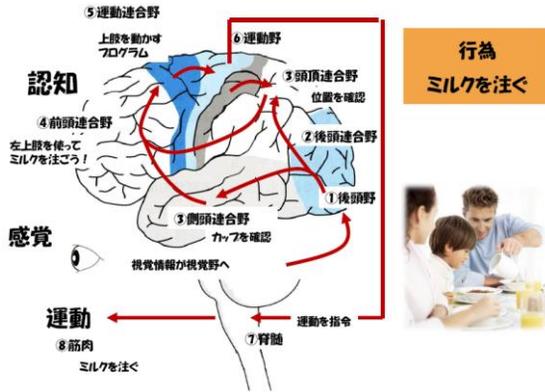


15

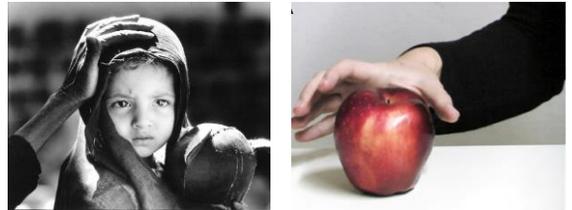
何の空間 (What's space) | どここの空間 (Where's space)



16



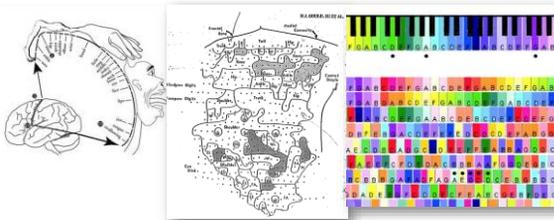
17



18

脳は筋肉のことを何も知らない

Hughlings Jackson thought of the motor cortex as an integrative cortical structure representing movements, not individual muscles. (Capaday, 2004)



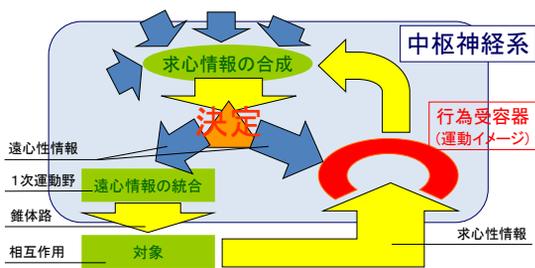
19

行為とは

- ある意志(意図)をもってするおこない
- 意図と結果の予測(シミュレーション)関係性
シミュレーション(イメージ)は自身の運動可能性(体性感覚、視覚、聴覚等の整合性)が前提となる
またシミュレーションはこれまでの経験が基礎となる
- 意図は自身の運動可能性によっても変化すると考えられる

20

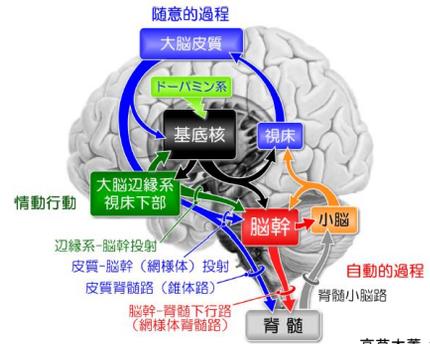
人間における行為とその変化



Anokhin PK(1975)

21

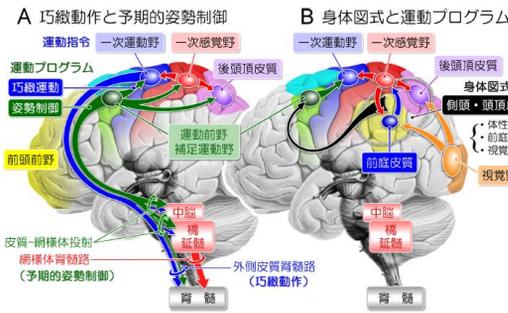
運動・姿勢制御に関する神経機構の基本的枠組み



高草木薫. 2013

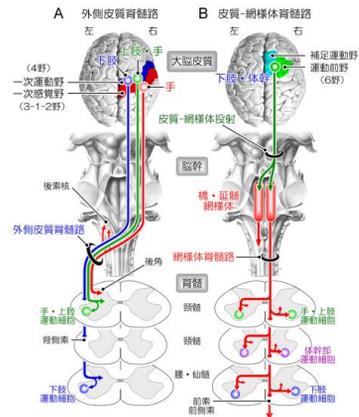
22

大脳皮質における姿勢と歩行の制御



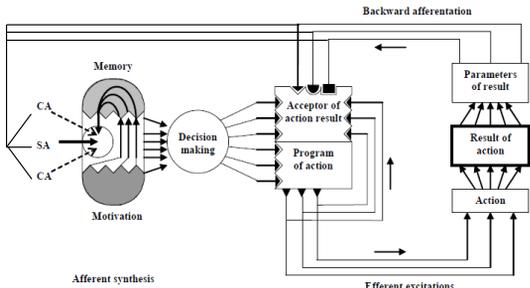
高草木薫. 2013

23



24

行為は意図を持って遂行される

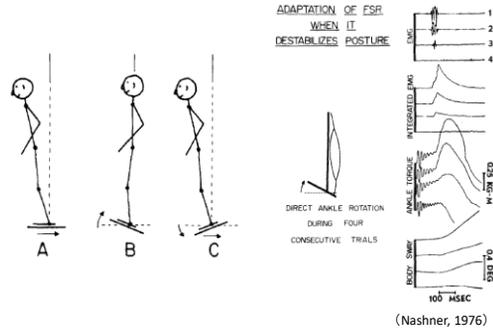


SA (starting afferentation): 現状の各身体および各領域からの感覚情報の統合
 CA (contextual afferentation): 文脈における感覚情報の統合

Red'ko VG, et al., 2004より一部改変

25

行為と伸張反射



(Nashner, 1976)

26

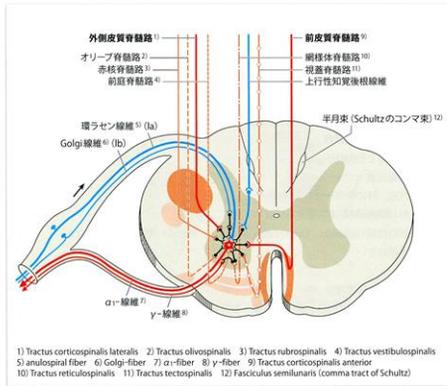
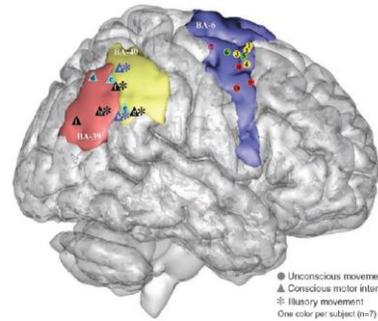


図 3.6 前角細胞における下行性運動線維のシナプス結合

27

運動の意図を生成する頭頂連合野



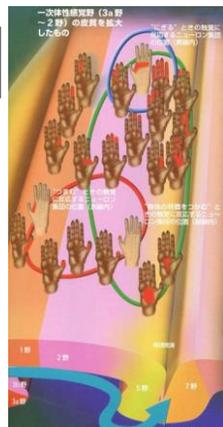
Desmurget M, Sirigu A et al, 2009

28

物体との接触空間

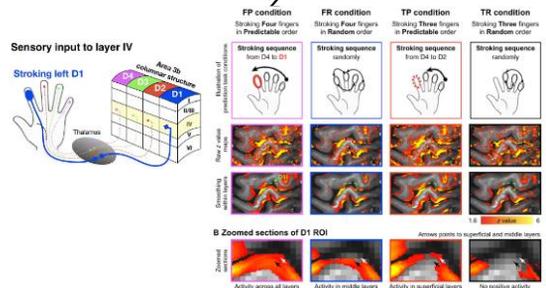
■ 手の機能面 (感覚野)
 (functional Surface)

- 握る時の触覚に反応するニューロン (青)
- 掴む時の触覚に反応するニューロン (赤)
- 物体の特徴を掴む時の触覚に反応するニューロン (緑)



29

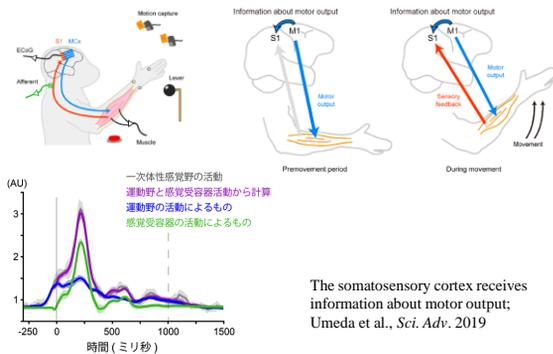
一次体性感覚野の活動は予測的活動とボトムアップ活動によって入力層の活動が異なる



Layer-specific activation of sensory input and predictive feedback in the human primary somatosensory cortex; Yu et al., *Sci. Adv.* 2019.

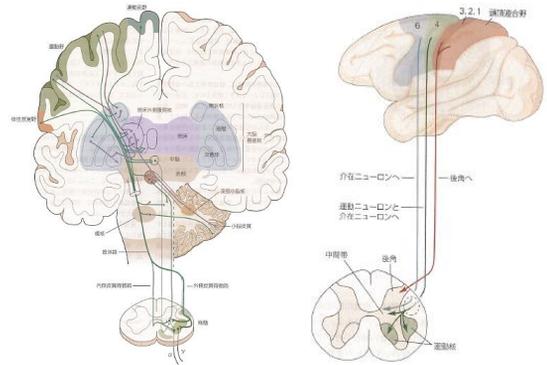
30

一次体性感覚野は運動の事前情報を 受け取っている



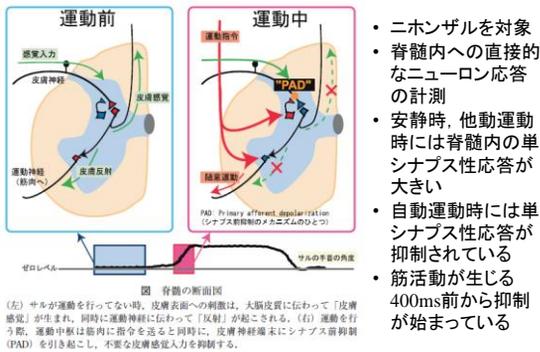
31

頭頂葉からの下降路



32

行為中の皮膚反射の制御



33



Sensory cortical control of movement

Spyridon K. Karadimas^{1,2,7*}, Kajana Satkunendrarajah^{2,3,7*}, Alex M. Laliberte^{1,4}, Dene Ringuette^{2,4}, Iliya Weisspapir⁷, Lijun Li^{5*}, Simon Gognach¹ and Michael G. Fehlings^{1,2*}

Walking in our complex environment requires continual higher-order integrated spatiotemporal information. This information is processed in the somatosensory cortex, and it has long been presumed that it influences movement via descending tracts originating from the motor cortex. Here we show that neuronal activity in the primary somatosensory cortex tightly correlates with the onset and speed of locomotion in freely moving mice. Using optogenetics and pharmacogenetics in combination with in vivo and in vitro electrophysiology, we provide evidence for a direct corticospinal pathway from the primary somatosensory cortex that synapses with cervical excitatory neurons and modulates the lumbar locomotor network independently of the motor cortex and other supraspinal locomotor centers. Stimulation of this pathway enhances speed of locomotion, while inhibition decreases locomotor speed and ultimately terminates stepping. Our findings reveal a novel pathway for neural control of movement whereby the somatosensory cortex directly influences motor behavior, possibly in response to environmental cues.

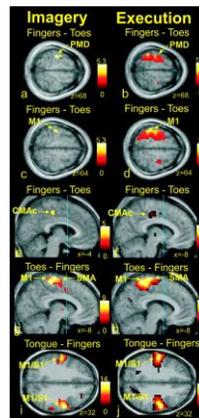
マウスの体性感覚野からの錐体路が脊髄の介在ニューロンを通じて、歩行の開始やスピード調整に関与していることを示した。運動をコントロールする際に、体性感覚野からの直接的な関与がある新規の経路であることが示唆された。

34

運動イメージ(motor imagery)

- 筋感覚的運動イメージ(Kinesthetic motor imagery) = 一人称イメージ
- 視覚的運動イメージ(visuo-motor imagery) = 三人称イメージ

35



指・つま先・舌の実運動時と運動イメージ時の脳活動を測定

- 運動イメージには一次運動野、運動前野、補足運動野の活動がみられた
- 運動イメージ時においても、指・つま先・舌それぞれの活動領域は体部位局在にそのような活動がみられた

運動イメージによって、実運動時と類似した脳活動が生じることが推察された

Ehrsson et al. *J Neurophysiol.* 2002.

36

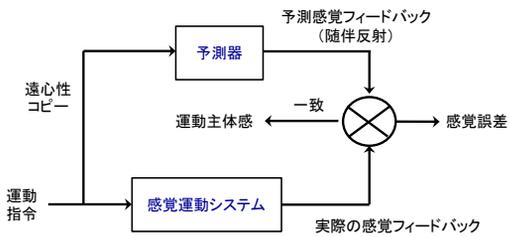
“運動を産出することなく、
動作主が自らの行為を心的に表象する能力”

“ある特定の行為を
心的にシミュレーションする
動的な状態。

この種の経験では、その特定の行為を遂行する
自分自身を感じる
ことが伴われる”(Decety. 1996)

37

運動主体感の生起に関するモデル



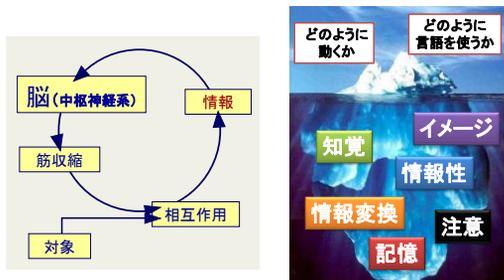
予測である遠心性コピー情報と実際の感覚フィードバック情報が一致することによって運動主体感が生起すると考えられる

Blakemore SJ et al, 1999

39

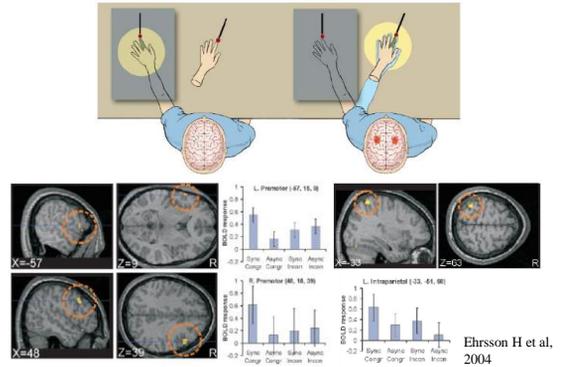
運動は氷山の一角

中枢神経系の複雑な認知過程によって
情報構築され出現した運動のみ外から観察可能



41

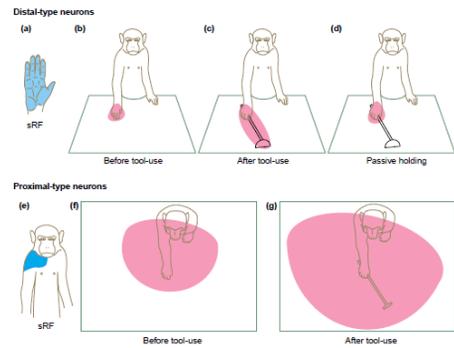
自己所有感 (sense of self-ownership)



Ehrsson H et al, 2004

38

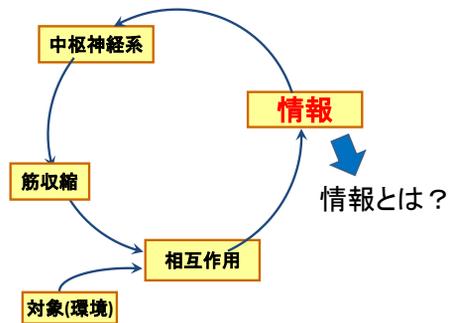
意図を伴う行為遂行時は身体図式を改変する



Iriki A et al, 1996

40

身体と環境との相互作用



42

情報性

- 情報とは差異を生み出す差異である (Bateson)
- 情報は構築し、選択し、計画するものである

物理的差異 : 物理的にある外の差異
 認知的差異 : 自ら見出すことができる差異 (表象)
 現象学的差異 : 内発的な差異 (心地良さなど)

物理的差異が即ち情報にはなりえない

43

情報器官としての身体

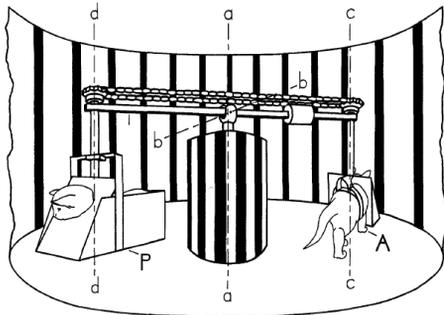
各身体部位によって特異性(特徴)がある
 →身体の情報特異性

上肢, 下肢, 体幹

骨構造, 筋走行, 筋の形状, 皮膚構造や
 神経分布, それらの中枢神経系処理など

45

経験によって知覚・行為が変化する



Held & Hein (1963)

47

身体を受容の表面と捉える

- 視覚→環境の映像および空間情報
- 聴覚→環境の音(周波数)情報
- 嗅覚→環境の化学物質情報
- 味覚→環境の化学物質情報
- 前庭覚→環境に対する自身身体の重力
方向情報
- 体性感覚→環境の物性および身体情報

44

身体は受容表面である

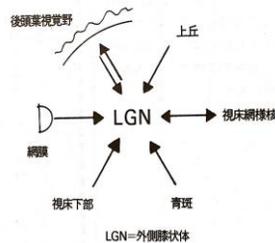
身体全体で情報を受けとめている

単一のモダリティのみでは情報とはならない
 (ex. ・末梢の触受容器のみでツルツルやザラザラとはならない
 ・お箸で豆腐の柔らかさや肉の固さを認識できる
 ・脊損を呈していても座クッションの固さや形を識別できる)

システムとしての身体

46

インターニューロン・ネットワーク 視覚路における連結を例に



LGNへの連結は80%以上が網膜以外の部分であり、単純な網膜→LGN→大脳皮質といった図式とはならない。

LGNの状態を変化させるのはLGNへのすべての連結によって決定される。これは中枢神経のその他のいずれのセンサーにおいてもいえる。

(H. マトゥラーナ, F. ヴァレラ著: 知恵の樹)

48

脳の可塑性

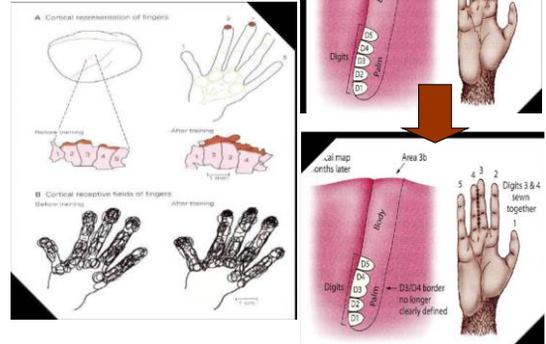
脳は自ら構築できる情報を外部環境から主観的に整合性をもって行為の中で取り込み、構築を継続しながら、より生物学的、社会的な生存を有利としていく、その連関によって常にその器官自身の構造を変化させ続けること



↓
 損傷したからといって、
 無くなるわけではない

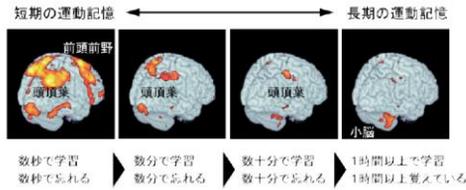
49

大脳皮質は可塑性に富んでいる！

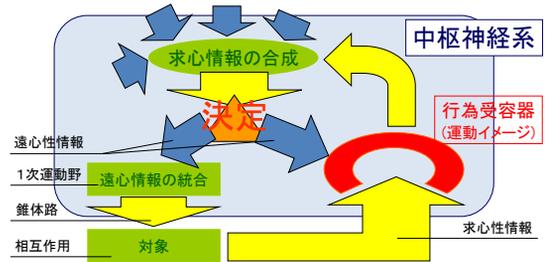


50

人間における行為とその変化



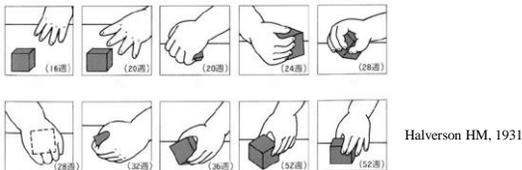
51



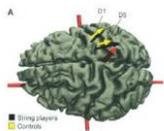
Anokhin PK(1975)

52

行為によって身体は改変される



Halverson HM, 1931

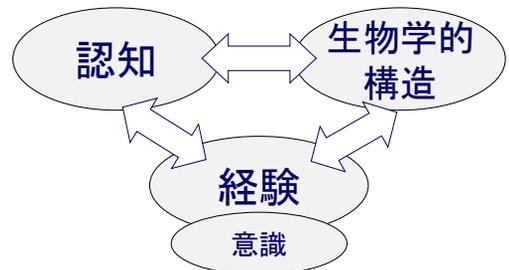


弦奏者は左手の手指領域が拡大 (Elbert, 1995)

体性感覚皮質の再現領域には個人差 (Schweisfurth et al, 2014)

53

行為によって人に生じること



Perfetti, 2006

54

行為＝認知(知る)

「知る」は、「経験を通じて認識できる」こと
従って、

- 複数の知覚情報で複合的に構築されたもの
- 複数の知覚情報の表象がある(記憶)
- 様々な知覚情報との間で相互の情報変換が可能
- 複数の言語記述が可能
- 行為の予測(運動イメージ)が不十分でも構築可

55

運動とは知ることである

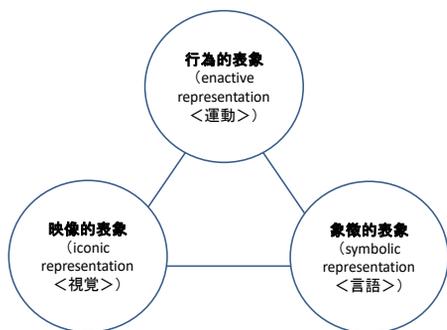
知ること(情報の構築)＝経験

経験の積み重ね、
これまでの経験との比較・参照などを
行うことによって、
行為のバリエーションが得られてくる

個性が生まれる(出てくる)

56

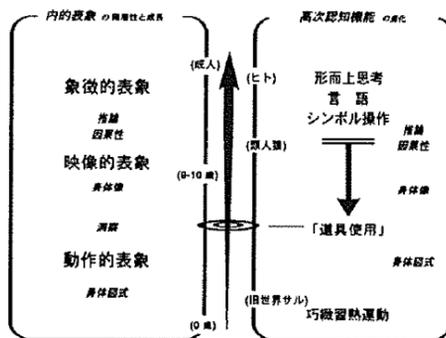
何かを知るための3つの手段



Bruner, 1966

57

高次脳機能の発達と進化



入来、2000

58

動きに関する言語の脳処理過程

Friedemann Pulvermüller, Somatotopic Representation of Action Words in Human Motor and Premotor Cortex, *Neuron*, 2004.

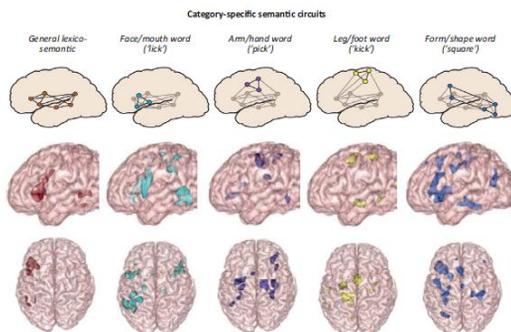


動きに関する言葉の処理を行う際には
動きに関する脳部位も活動している

その言葉の理解にはその言葉の表象が必要なのでは

59

様々なネットワークによって言語処理が成される



Friedemann Pulvermüller, *Trends in Cognitive Sciences*, 2013.

60

言語による脳内の情報構築



- 脳の回路を色分けしたMRI画像
- ピンクとオレンジの回路が言語機能に不可欠な信号を伝達
- 様々な大脳皮質、辺縁系との関与
- 構音機能における脳幹部との連関
- 海馬の記憶回路との密接な連関

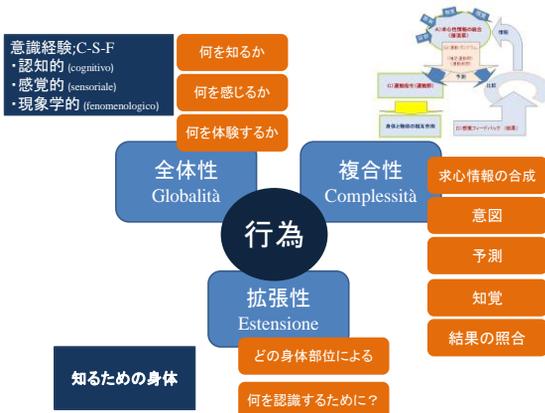
Van Wedeen, 2012
National Geographic, 2014

61

神経システムに可塑性を生じさせている決定要因

- 情報の時空間的な規則性に基づく**知覚**
- **注意**の集中
- 意味的な**記憶化**
- 意図と結果との**照合**に対する**判断**
- **言語**による**表象**

62



63

ヒトは誤った行為を行うか？

自分は誤った行為を行うか？
当然行わない、しかし…
他者から行為の誤りを指摘されたことは？
それで自らの誤りに気付けたか？
(言いがかりに聞こえることも…)
では、誤りに気付くのはどのような場合か…
逆に、他者の行為の誤りを指摘したことは？

症例の行う行為が
私達にはどのように見えるか？



64

行為のエラーの自覚

- 行為の学習は、自己の行為のエラーの自覚から始まる
 - 視覚イメージでのエラーに気づくことに意味は無く、本来はどのように身体と世界(環境)を感じ、相互作用しなければならないのかということに気づく必要がある
- ① 損傷前の行為と比較
 - ② 患者の行為とセラピストの行為(いわゆる正常)の比較
 - ③ セラピストが行う行為(いわゆる正常/患者のパターン/その他のエラーのパターン)を観察してもらい、比較
 - ④ 非麻痺側と麻痺側の行為の比較

どのような差異があるのか、
意図した行為ではどのように感じていたのか、
どのような感じがしそうなのか等を問う必要がある

65

行為のエラーの自覚と改善の自覚

- エラーの自覚は具体性を持った改善の自覚につながる(患者さん・セラピストともに効果判定しやすい)
→効果の持続・継続性
- どのような認知過程を活性化することで行為が改善するのかを患者さんも理解し、日常生活で自律する必要がある
→行為の拡張性

66

全ての行為は認知である
全ての認知は行為である

(Francisco Varela)



67