

人間に近づくロボット

國吉康夫

東京大学

情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻



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。

「ヒューマノイドロボットを作ろう」 と思ったとき... (1994~)

- ロボットを人間型にする意味は何か？
 - 特定作業用ならば, 人間型にしないほうがよい.
 - ~~二足歩行~~... 人間型の必要なし. Ex:Toyota i-foot
では何のため???
 - 人間ができることなら何でも(同じやり方で)できるため.
 - =人間の行動全てを模倣できるため.
 - =行動の全範囲において(大域的), 人間と同様の原理で同様の振る舞いをする.
 - Also,人間と密着して動けるため(介護...):人間密着指向
- 人間の行動の原理(身体の効果):身体性
 - 身体の特性を巧みに使いこなした動き.
- さらに:人間型の身体⇒人間的な心
 - 身体性認知科学

身体性を活かした行動とは？



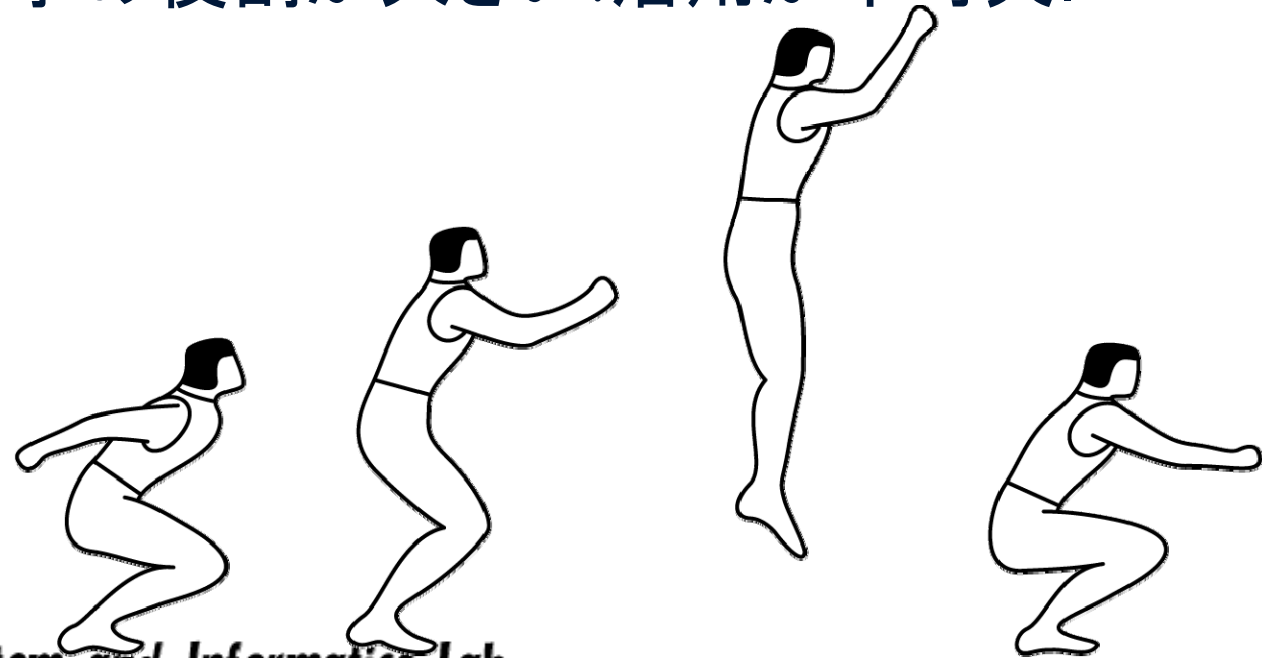
Intelligent System and Informatics Lab.
<http://www.isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp>

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.

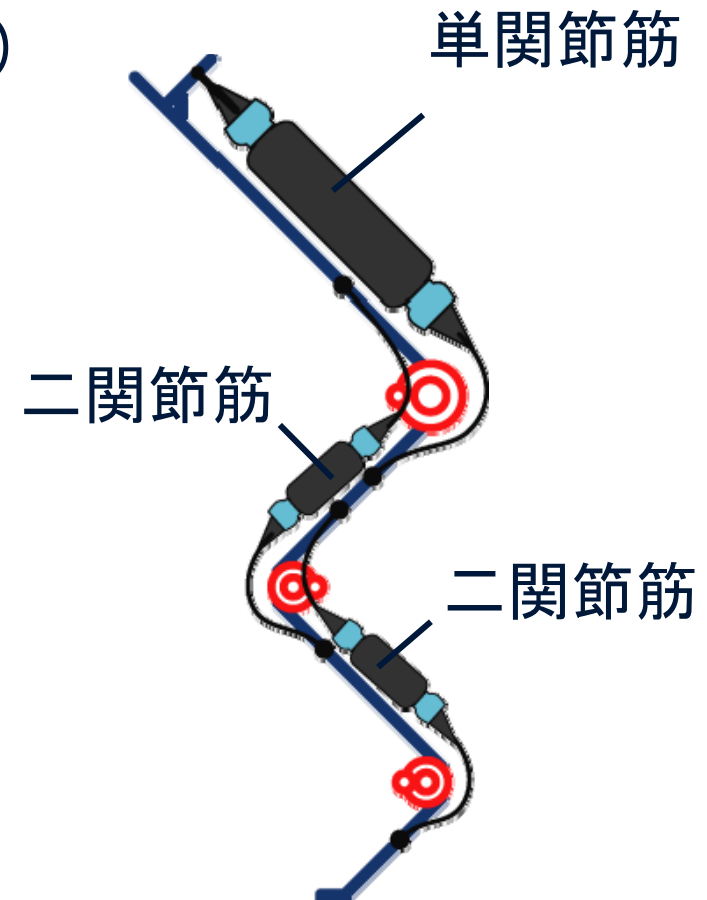
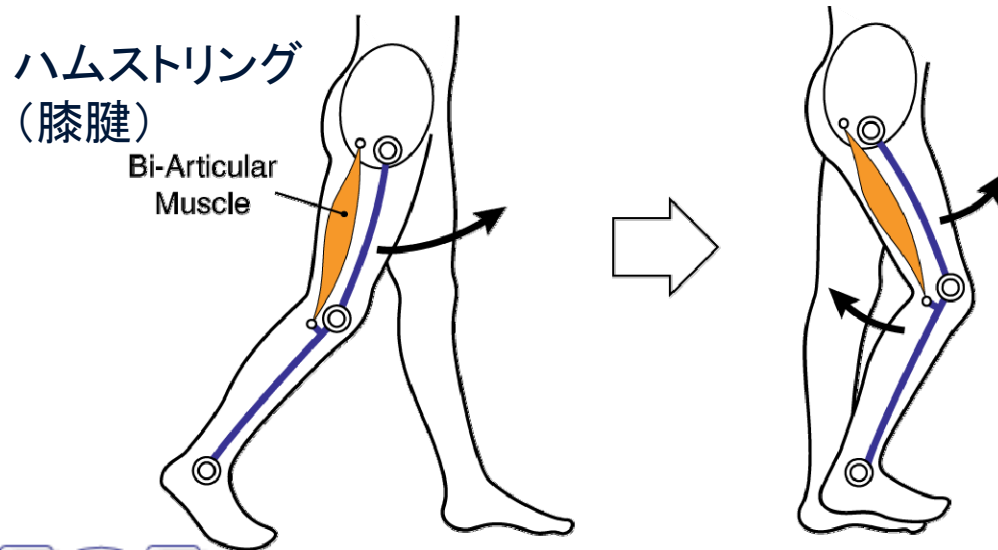


脚のバイオメカニズム

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・シンポジア, 1C1, pp.50-55, 佐賀, March, 2006.

コツと目の付け所 — 身体性の情報構造 —

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

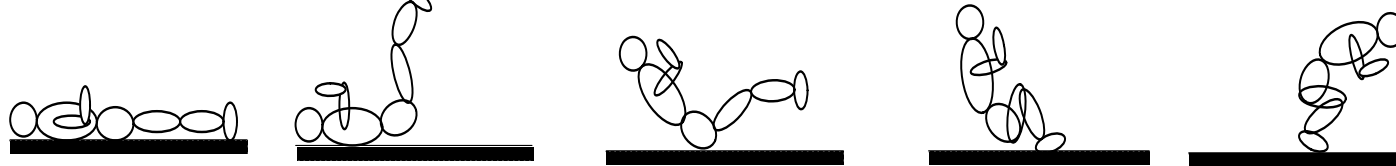


Intelligent System and Informatics Lab.

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

“Roll-and-Rise” Motion -- An example emphasizing “knacks”

國吉康夫, 長久保晶彦, 太村吉幸, 寺田耕志, 山本知幸, 永徳真一郎 1996--2005



- 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.

ISI



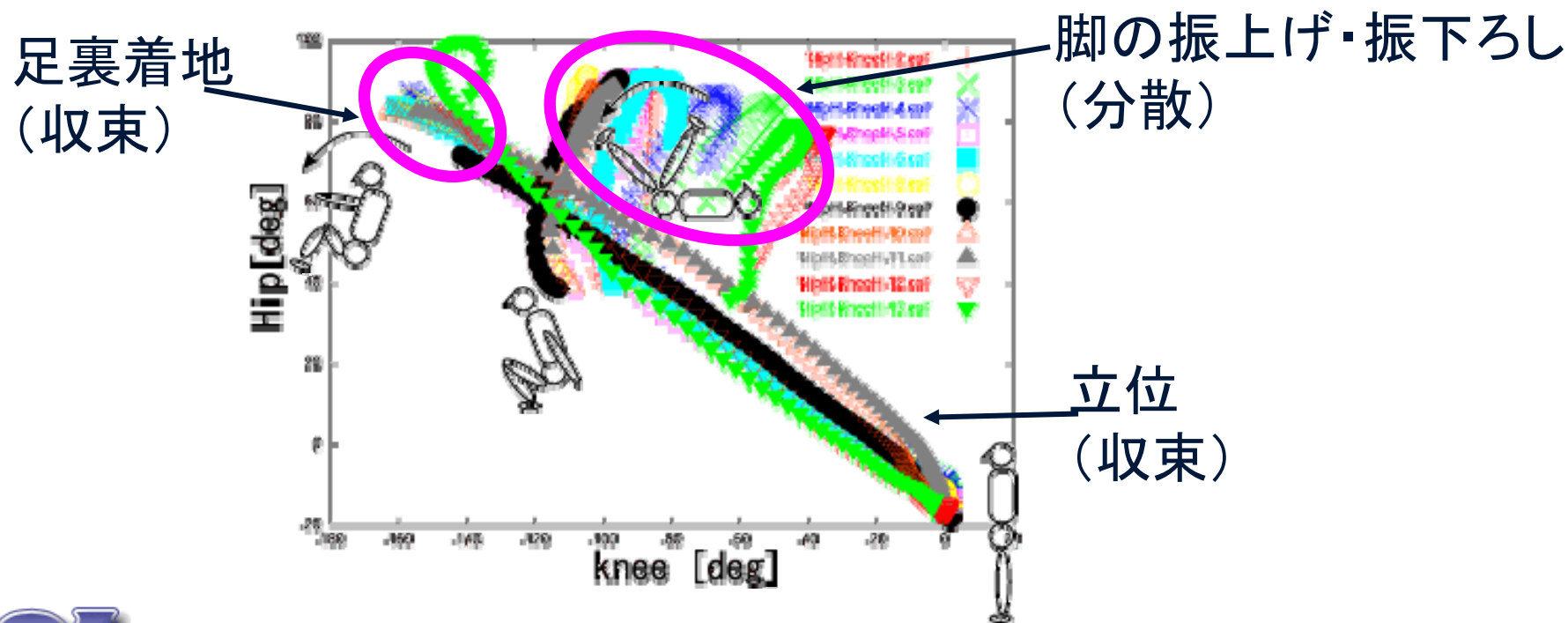
Lab.



Non-Uniform Trajectory Bundle

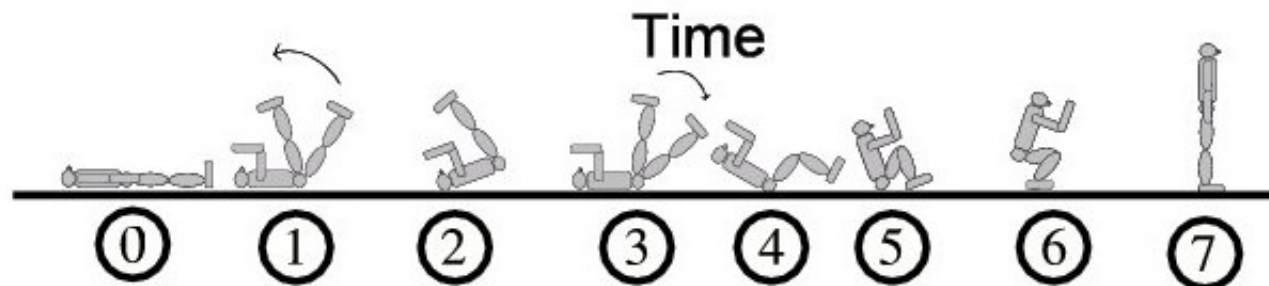
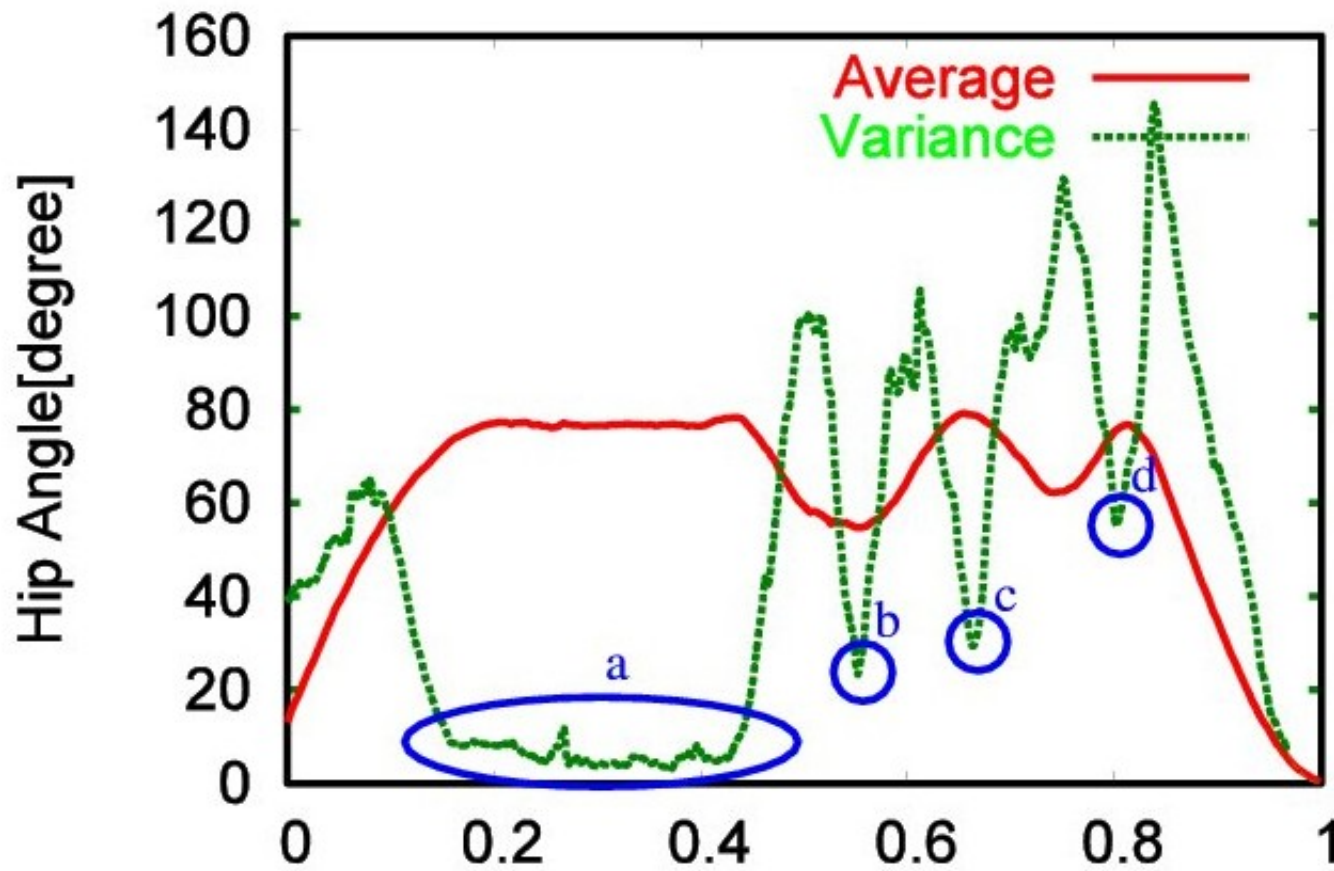
T. Yamamoto and Y. Kuniyoshi 02

相空間(ここでは膝-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.



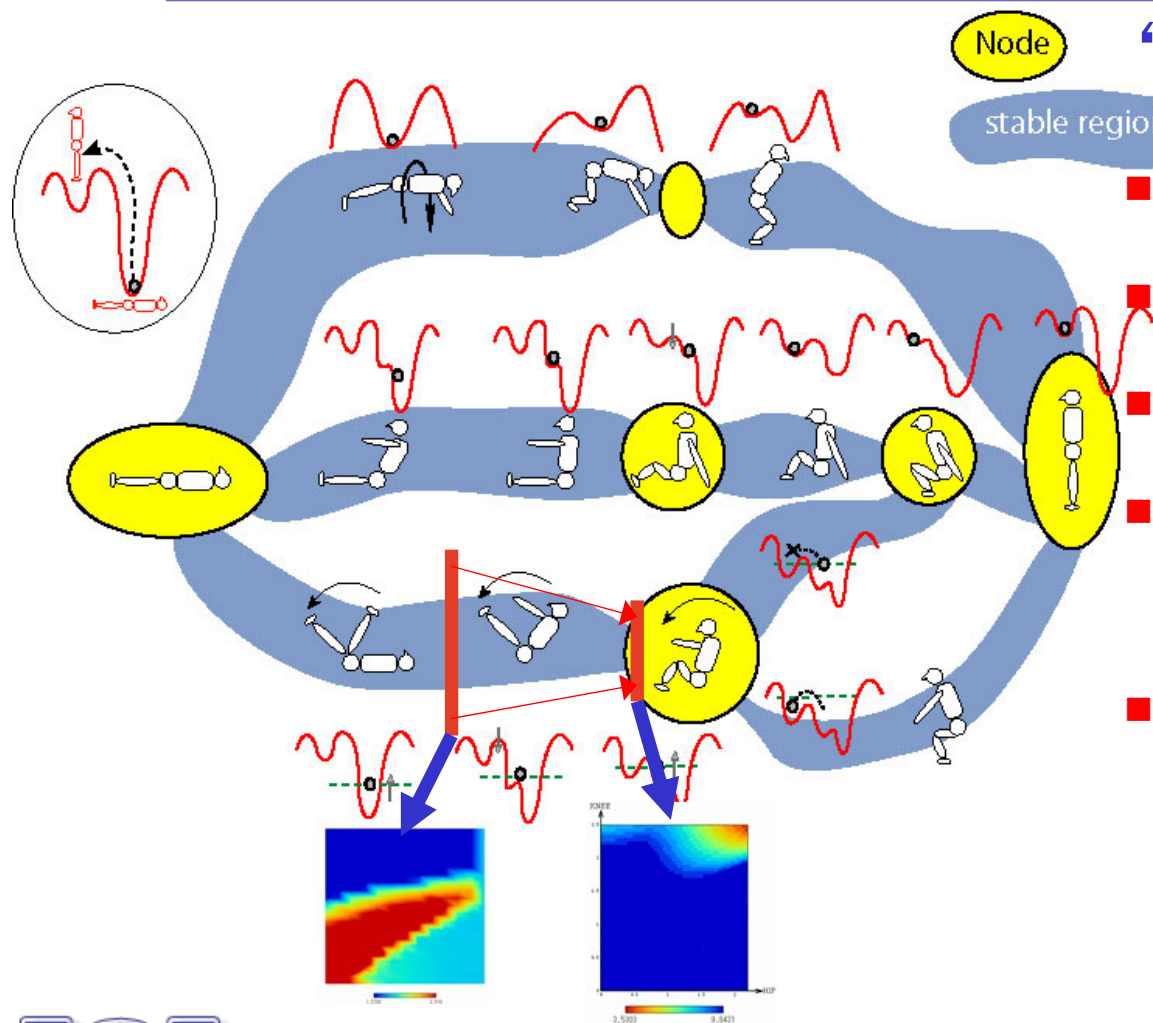
Sparse Convergence

K. Terada and Y. Kuniyoshi 04



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.

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.

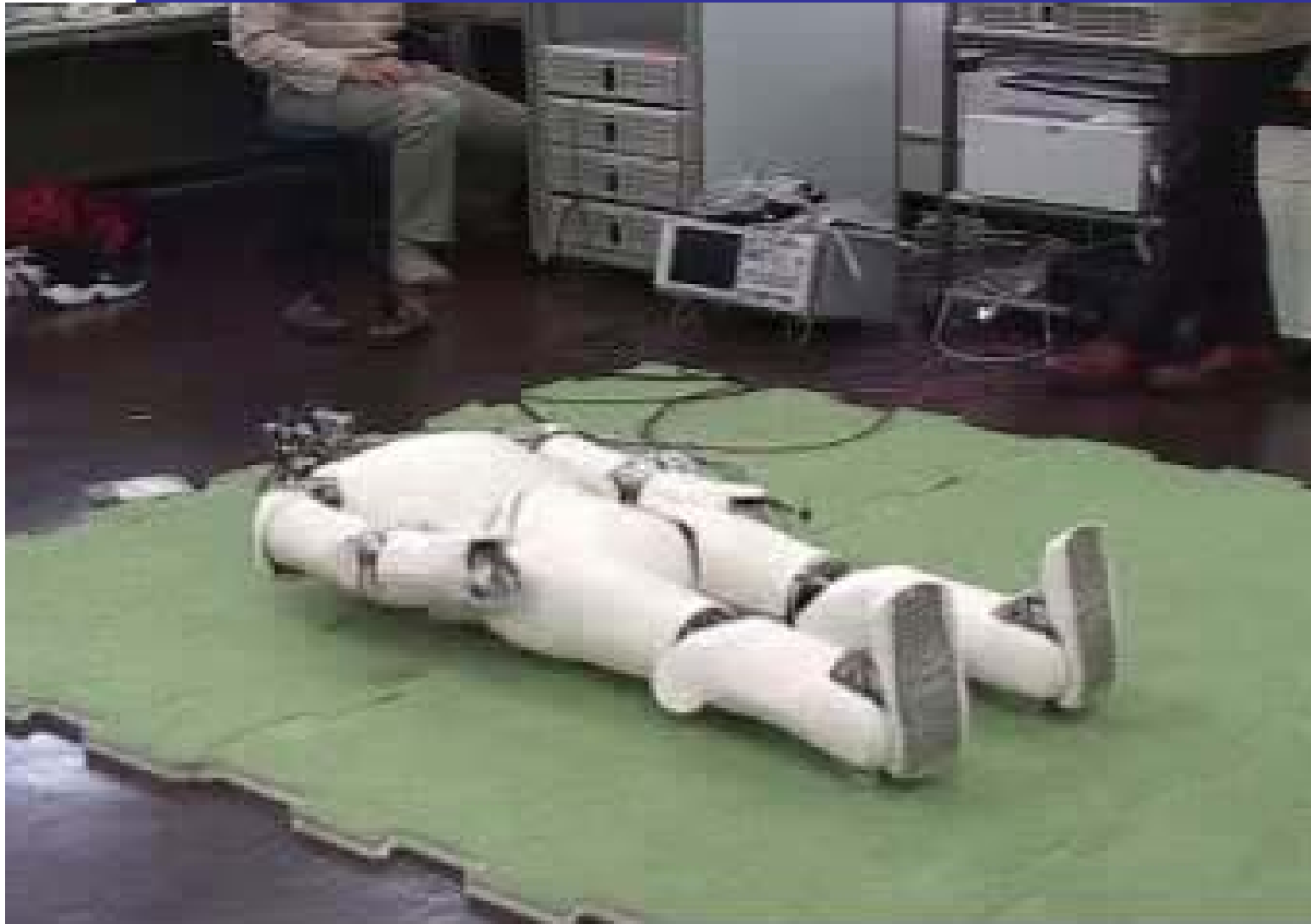
Trials (painful... ;-)

Ohmura, Terada & Kuniyoshi 03

Points:

1. Faster
2. Timings
3. Balance

失敗時の動き
が人間らしさ
を持つのはな
ぜか？

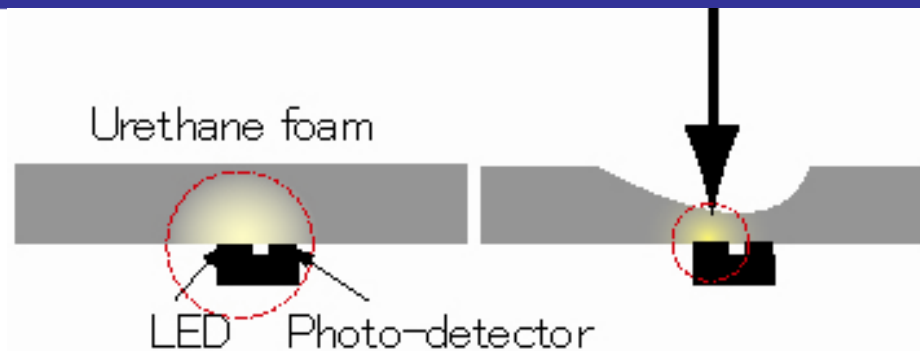


触覚センサ

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.

小型触覚センサ
切り貼り実装

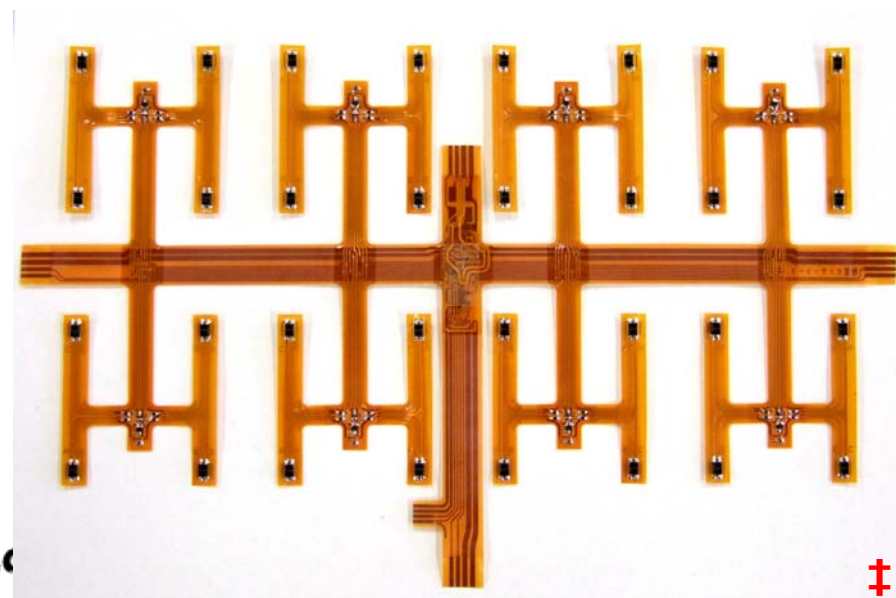
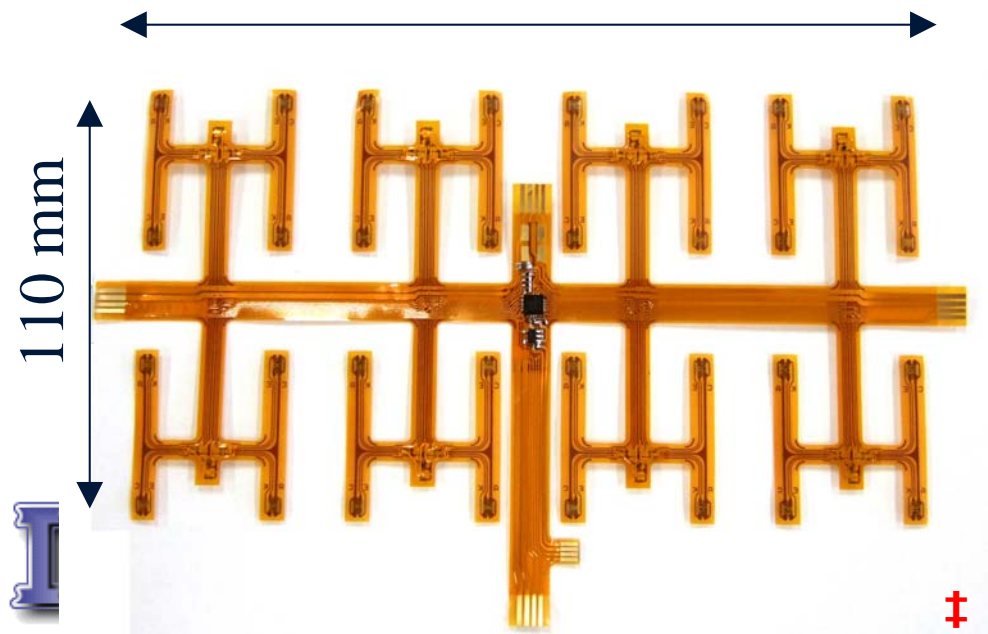


光拡散方式

†

180 mm

110 mm



ヒューマノイドへの実装

大村, 國吉 2006

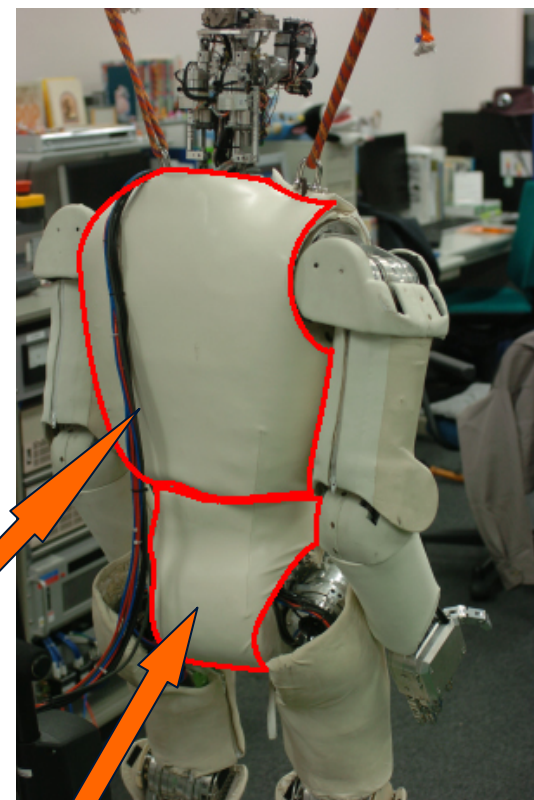
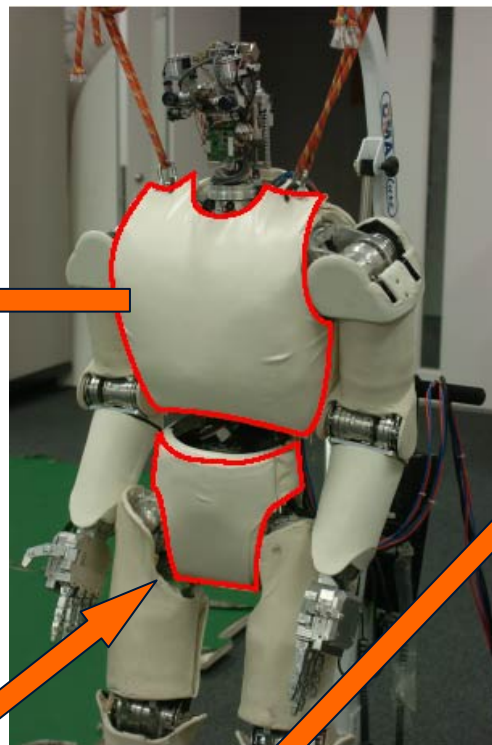
柔らかい触覚皮膚 (人間密着指向への布石...)



400mm

400mm

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



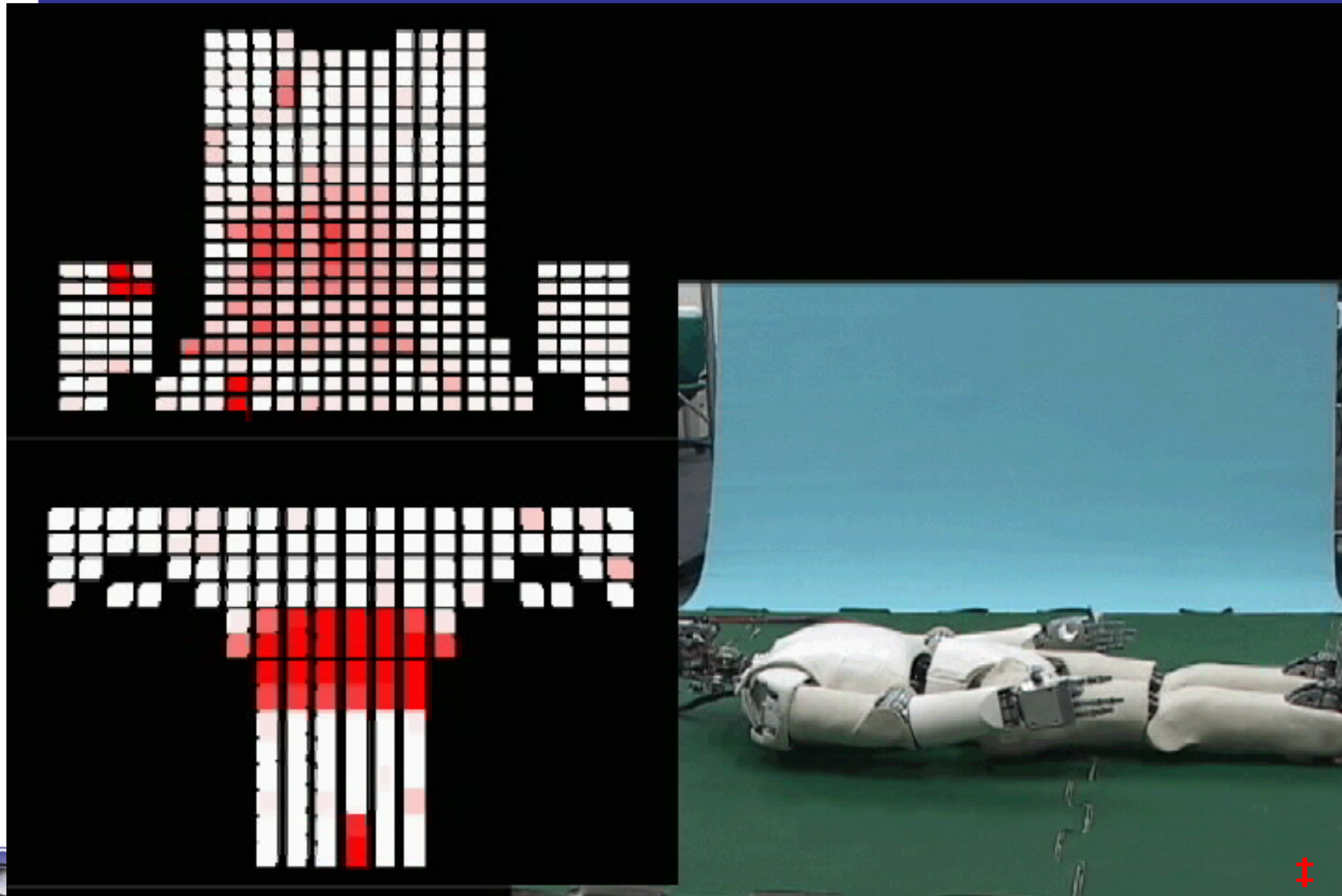
Intelligent System and Informatics Lab.

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

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.



ISI

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

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.



Intelligent System and Informatics Lab.

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

When do you know it's action X?

Temporal localization of action information



Intelligent System and Informatics Lab.

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

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.



認知発達ロボティクス

Developmental Cognitive Robotics

胎児からの運動・脳神経系発達

身体が脳・心を作る. . . .



Intelligent System and Informatics Lab.

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

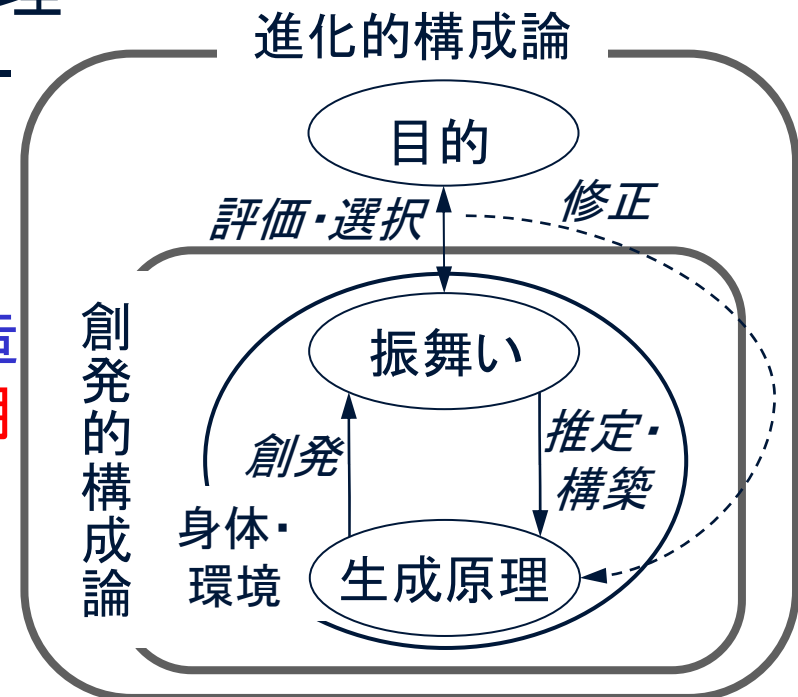
発達の構成論

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、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

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.(1章)

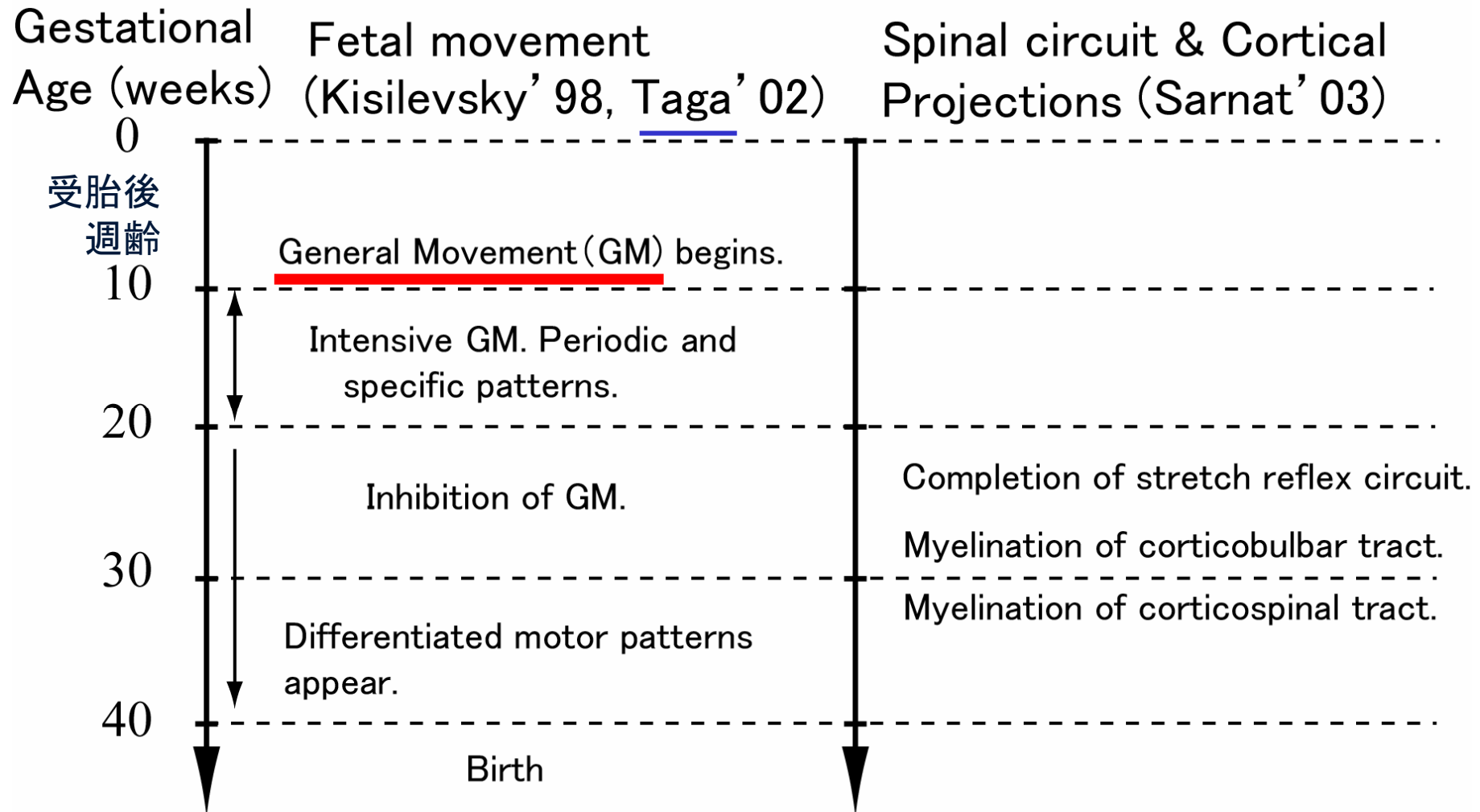


胎児期の知覚・行動・学習

- 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週で全細胞層形成, 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)

胎児の運動発達

Sangawa & Kuniyoshi 06



Intelligent System and Informatics Lab.

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

Two-Factor Model of Motor Development

Sangawa & Kuniyoshi 06

- Spontaneous Exploration of Motor Patterns
 - Emergence of body-afforded movement patterns
 - Driven by chaos-generating Medulla-Spine (Bulbospinal) system (Small '99).
- Learning of Sensory-Motor Patterns
 - Re-usable units from emergent patterns.
 - Controllable units : sensory-motor correlation.
 - Learning of signaling patterns.
 - Self organization of motor-somatosensory areas.



Intelligent System and Informatics Lab.

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

Fetus - Baby

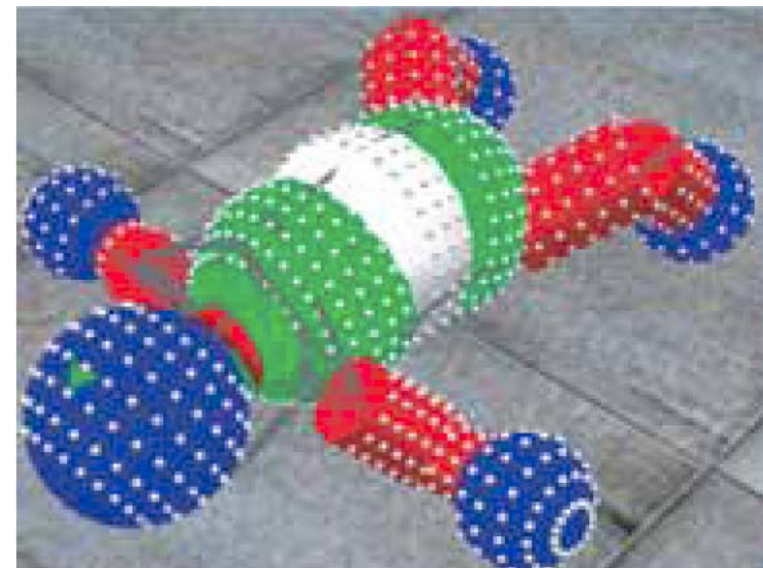
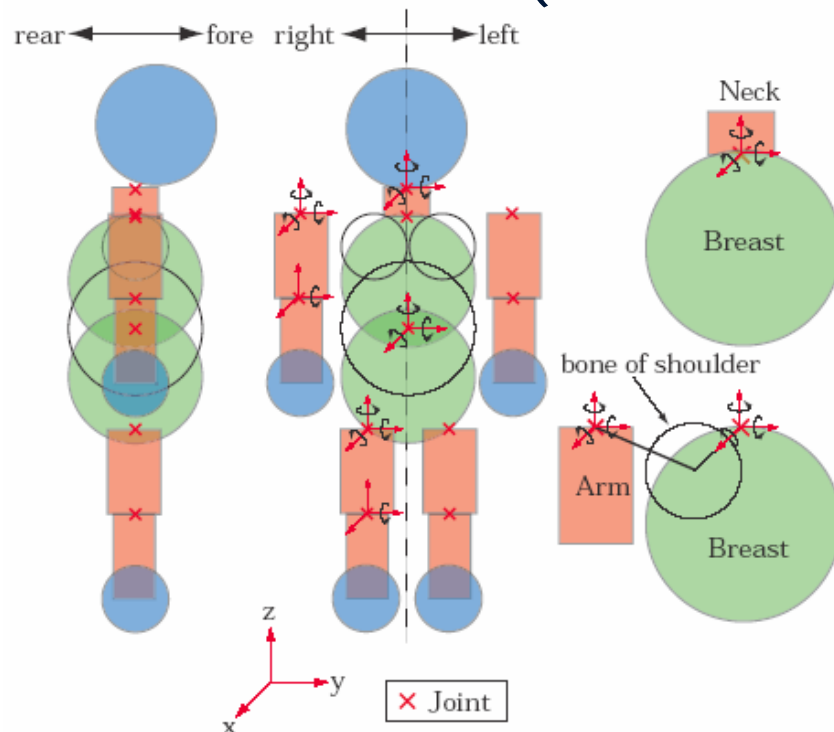
Sangawa & Kuniyoshi 05

- Musculo-Skeletal system (198 muscles)
- Muscle model (He et al. 01, Hill 38)
- Size / mass / inertia / muscles accurate
- Joint limits and neutral positions.
- Growable (Parameter: week age).

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

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

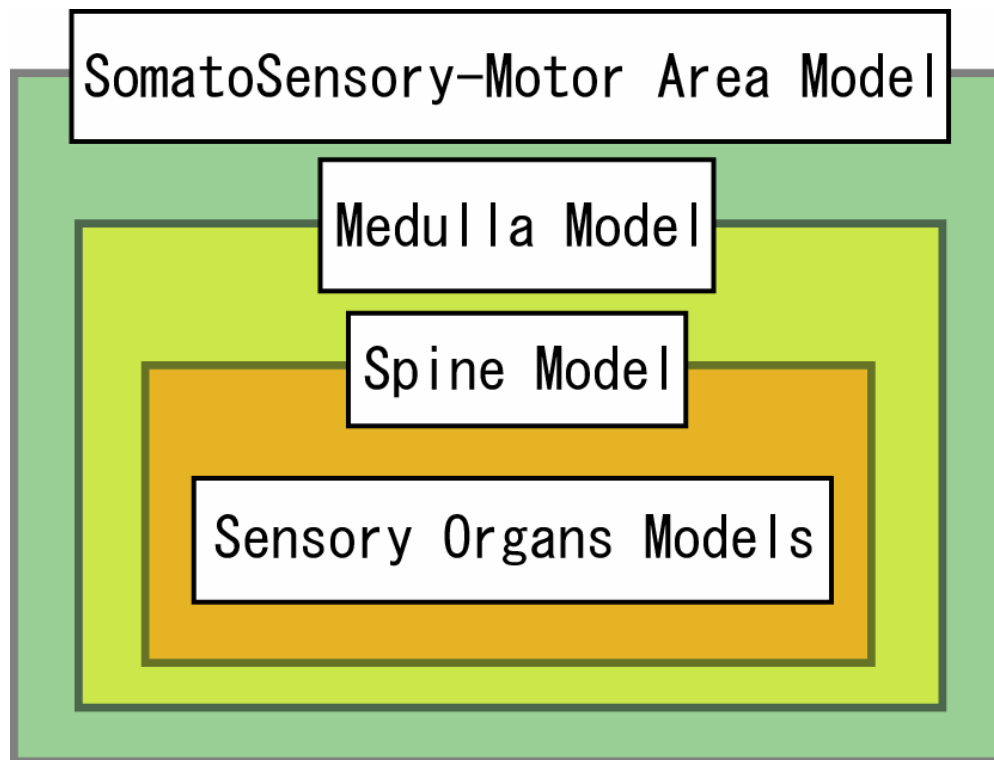
$$\frac{da}{dt} = 22(1 - 0.51a)^2(u - a)$$



na
ac: Tactile sensors: 1448 points

The Nervous System Model

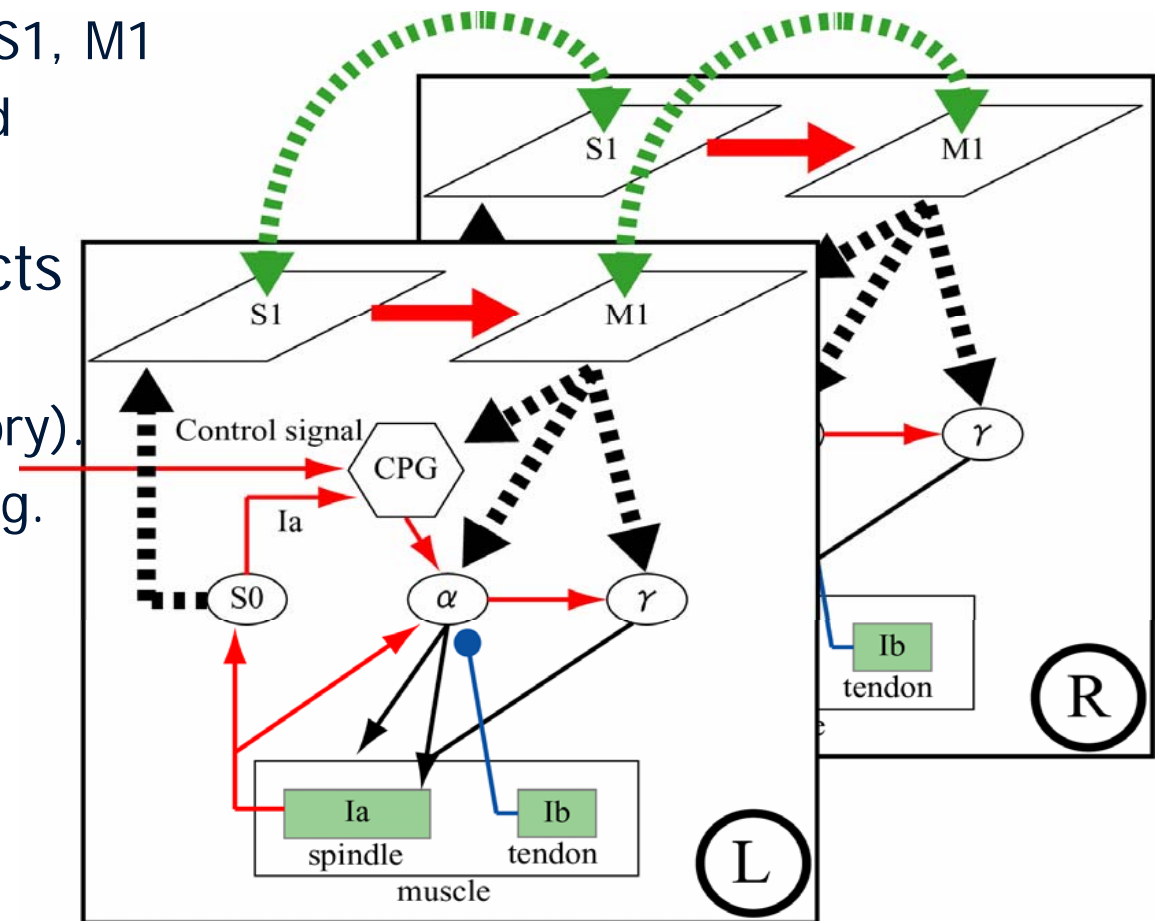
Sangawa & Kuniyoshi 06



Left/right hemispheres...

Sangawa & Kuniyoshi 06

- Left/right neural systems
 - 20x10 neurons each for S1, M1
 - 99 neurons for Spine and Medulla.
- Corpus callosum connects left/right S1's and M1's
 - Fully connected (excitatory).
 - Modified Hebbian learning.
- Control Inputs
 - Uniform value (0.5)
 - Smooth motion.



Intell

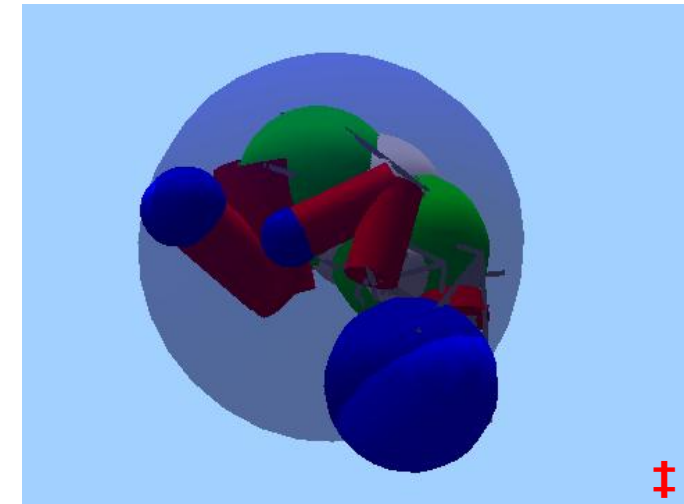
寒川新司, 國吉康夫: 胎児・新生児の身体・脳脊髄モデルと体性感覚野・運動野の自己組織化, 第24回日本ロボット学会学術講演会, CD-ROM, 2L24, 2006.

Fetal & Neonatal Environments

Sangawa & Kuniyoshi 06

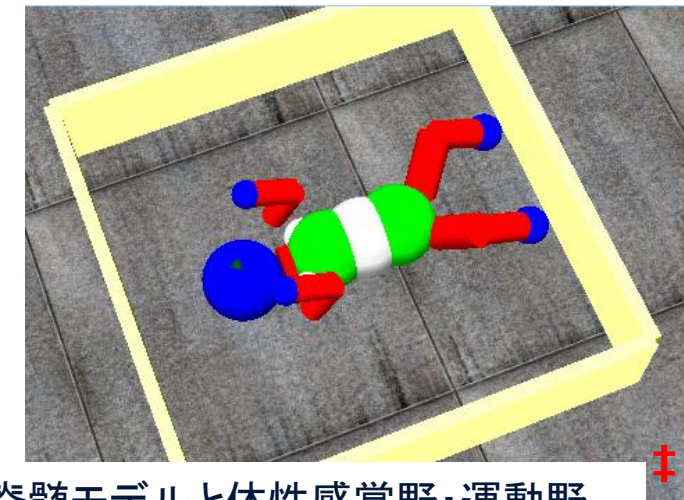
■ Fetus (35 wks. aft. Gestation)

- Uterine environment: Gravity, buoyant force, fluid resistance, umbilical cord (pivot).
- Uterine wall: Nonlinear spring (&damper) model.



■ Neonate (0 wk. of birth)

- Normal gravity
- Flat floor
- Surrounded by fences.



ISI

Intell

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.

視覚－運動の共感覚

自他の身体視覚像の同一視

新生児模倣の創発

Yasuo Kuniyoshi, Yasuaki Yorozu, Masayuki Inaba and Hirochika Inoue,
From Visuo-Motor Self Learning to Early Imitation -- A Neural
Architecture for Humanoid Learning, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics
and Automation, pp.3132-3139, 2003.

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.(7章)



Intelligent System and Informatics Lab.

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

Andrew Meltzoff: Nature or Nurture? Neonatal Imitation

- Neonates (15min. ~ day)
- No prior visual experience of tongue-protrusion.
- This specific imitation cannot be innate.
- Even adaptive.



Reprinted with permission from: Fig.1 Sample photographs from videotape recordings of 2- to 3-week-old infants imitating (a) tongue protrusion, (b) mouth opening, (c) lip protrusion demonstrated by an adult experimenter. A. N. Meltzoff and M. K. Moore: Imitation of Facial and Manual Gestures by Human Neonates, *Science*, vol.198, pp.75-78, 1977. copyright 1977 AAAS.

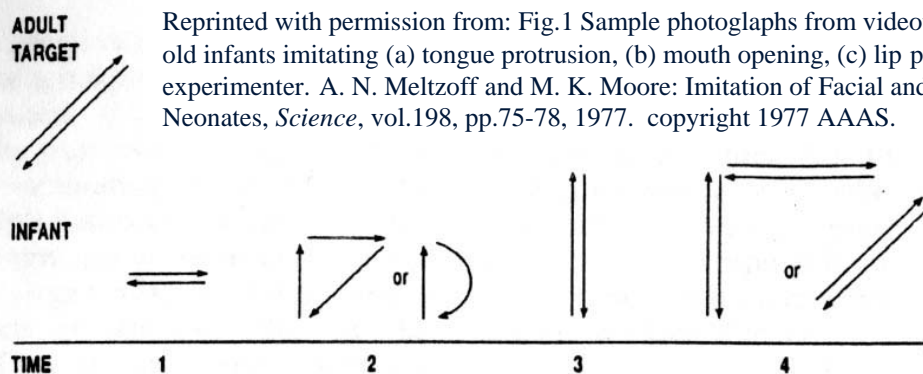


Figure 3. A diagram of infants' correction process. Infants who are shown a novel gesture of tongue-protrusion-to-the-side ('adult target') progress through an ordered series of tongue movements (indicated by '1-4'). The direction and extent of the arrows depict the corresponding dimensions of the infants' tongue protrusion responses. The

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週で全細胞層形成, 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)

Visuo-Motor Babbling

Kuniyoshi&Yorozu 01

- Robot generates self movement patterns.
- Spatio-temporal pattern learning of self-movement and corresponding visual stimuli.
- After learning, observes human movements for the first time. Associates with past experiences and generate self motion.

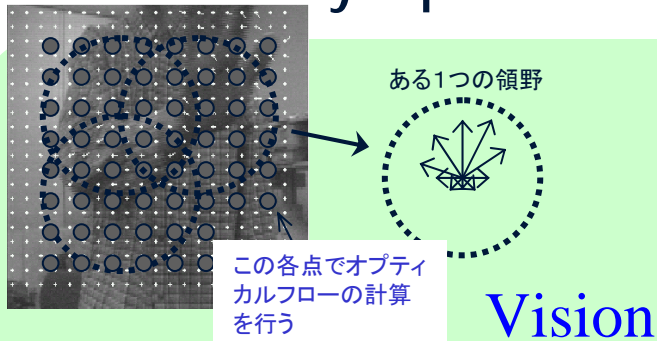


and Informatics L
u-tokyo.ac.jp

Visuo-Motor Association Learning System

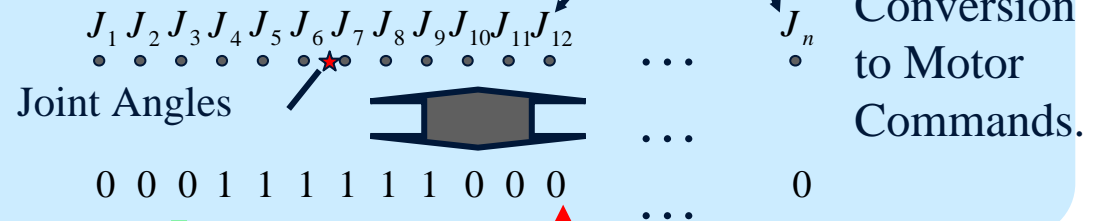
Kuniyoshi & Yorozu 2001-3

- Sensory-motor sequences learned as a high-dim trajectory attractor.
- Sensory input -> entrainment -> Motor trajectory remembered.



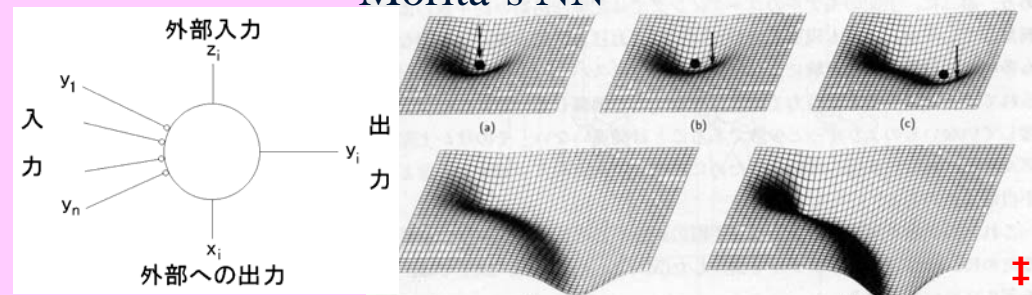
Optical Flow Processing

Motor



Learn ↓ Remember ↑
Trajectory Attractor in the
State Space of the Neural Net
Morita's NN

Sensory Layer 850
Motor Layer 150
Connection 499



(上図) 森田昌彦 (1997) 学習・記憶の神経回路モデル.
外山敬介, 杉江昇 (編), 脳と計算論, p. 54-69, 朝倉書店.

Temp. Seq. Learning by Non-monotonic Neural Net:
Inseparable Structure of Sensory-motor representation.

Learning

Kuniyoshi&Yorozu 01



ISI

Intelligent System and Info
<http://www.isi.imi.i.u-tokyo>

Learning

Kuniyoshi&Yorozu 01



ISI

Intelligent System and Info
<http://www.isi.imi.i.u-tokyo>

Learning

Kuniyoshi&Yorozu 01



Intelligent System and Information
<http://www.isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp/>

Imitation

Kuniyoshi&Yorozu 01

- Never seen a human hand. Its appearance & movement different. But overall pattern is similar.
- Visual pattern input to the learned net.
- Spatio-temporal pattern falls into a closest trajectory attractor.
- This “recognition” process inevitably generate motor response.



Imitation

Kuniyoshi&Yorozu 01

- Never seen a human hand. Its appearance & movement different. But overall pattern is similar.
- Visual pattern input to the learned net.
- Spatio-temporal pattern falls into a closest trajectory attractor.
- This “recognition” process inevitably generate motor response.



Imitation

Kuniyoshi&Yorozu 01

- Never seen a human hand. Its appearance & movement different. But overall pattern is similar.
- Visual pattern input to the learned net.
- Spatio-temporal pattern falls into a closest trajectory attractor.
- This “recognition” process inevitably generate motor response.

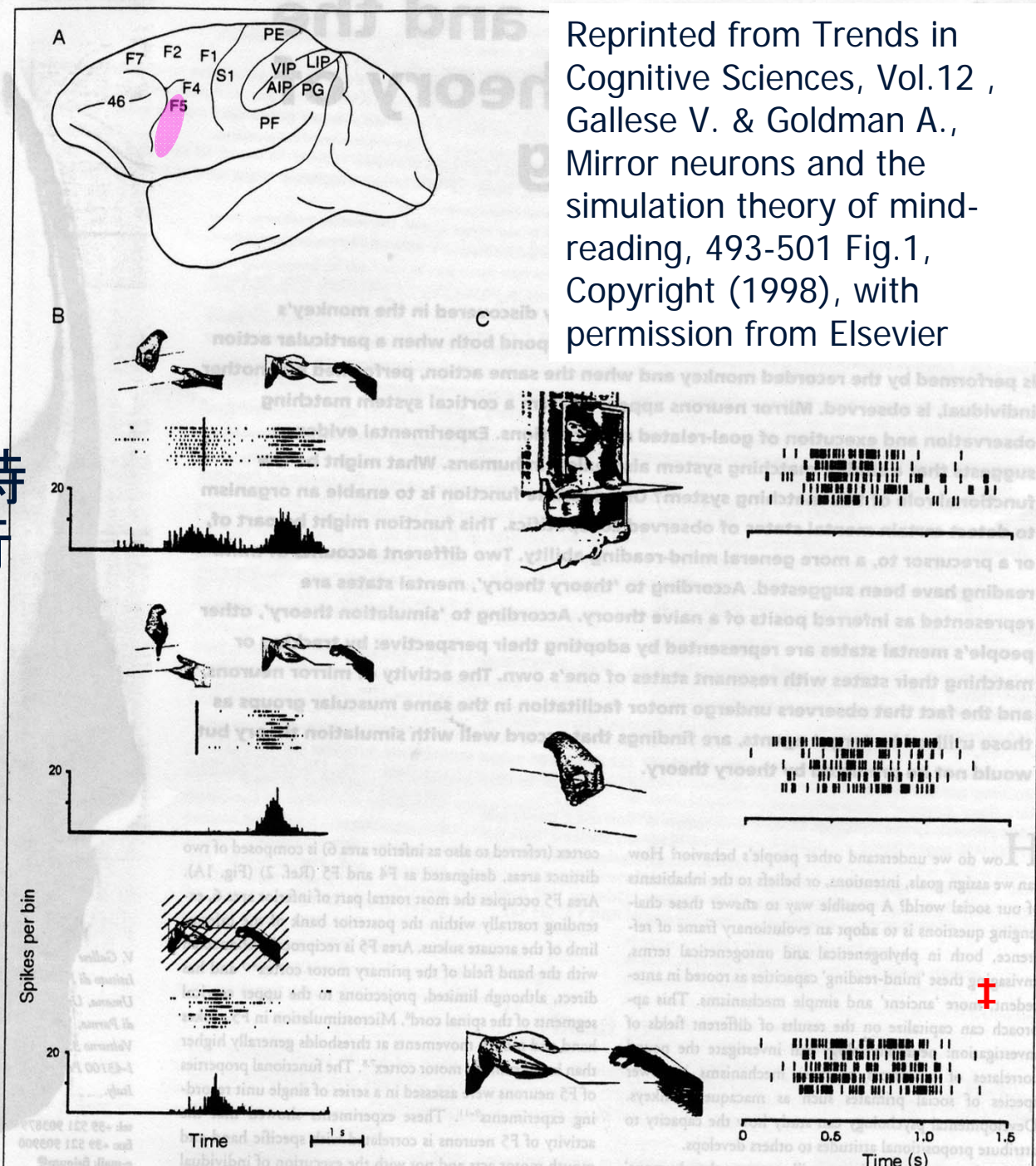


Mirror Neuron

- 特定の行為. その期間中連続発火. (行為認識細胞)
- 他者の行為観察時と自分の行為実行時に区別なく発火
- F5野(運動前野)
- Broka's area(ヒトの場合)

Gallese V., Fadiga L., Fogassi L., Rizzolatti G. Action recognition in the premotor cortex.
Brain 119: 593-609, 1996

ISI Intelligent System
<http://www.isi.im>



人間的身体から人間的認知へのシナリオ

- 身体性⇒他者と共有可能な情報構造(ツボ/コツと目の付け所)
- 人間型身体⇒通じあえる.
- 赤ちゃん: 身体性を探索・獲得しながら発達
- 創発した動作(身体性に基づく)を自分で見る⇒身体像やミラーニューロンの獲得.
- ⇒他者行為の認識, 振る舞いから心を察する⇒言葉によるコミュニケーション: 人間型の心
- 人間型の身体⇒人間型の心: 学び, 助け, 通じる(蛸や蛇⇒非人間型の心)
- 適応知能の本質的構成論⇒真に有用なロボット