

脳-身体-環境モデルで捉える 行動・認知の初期発達

金沢 星慶

特任助教、JSTさきがけ専任研究者

東京大学 大学院情報理工学系研究科 知能情報学専攻
東京大学 次世代知能科学研究センター 人間的知能部門

自己紹介



新生児集中治療部

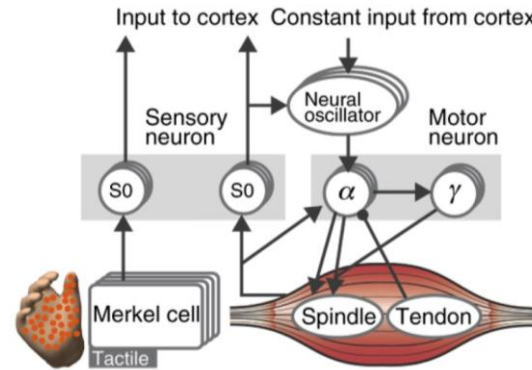


脳波、筋電図、MRI、超音波、
血液や尿などの生体試料

ヒトの初期発達@京都大学
(発育、神経成熟)



動物実験@生理研
(電気生理)



構成論的アプローチ@東京大学
(身体-脳-環境モデル)



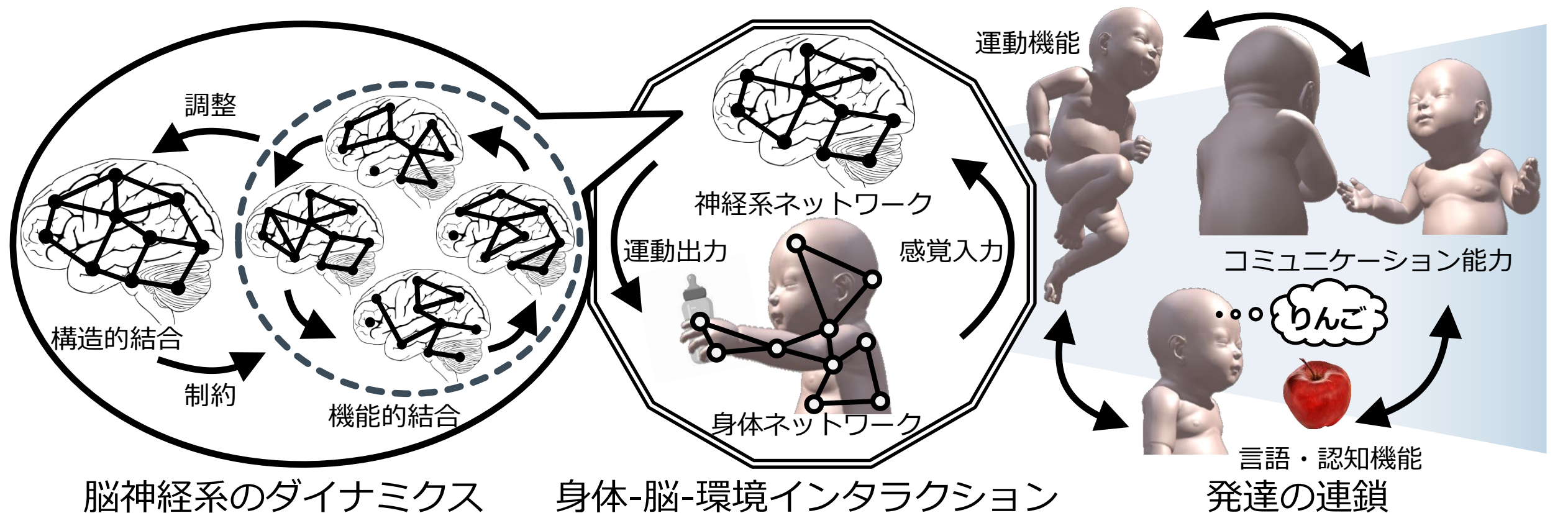
Spontaneous movements



Musculoskeletal model

実際の感覚運動計測
×
シミュレーション

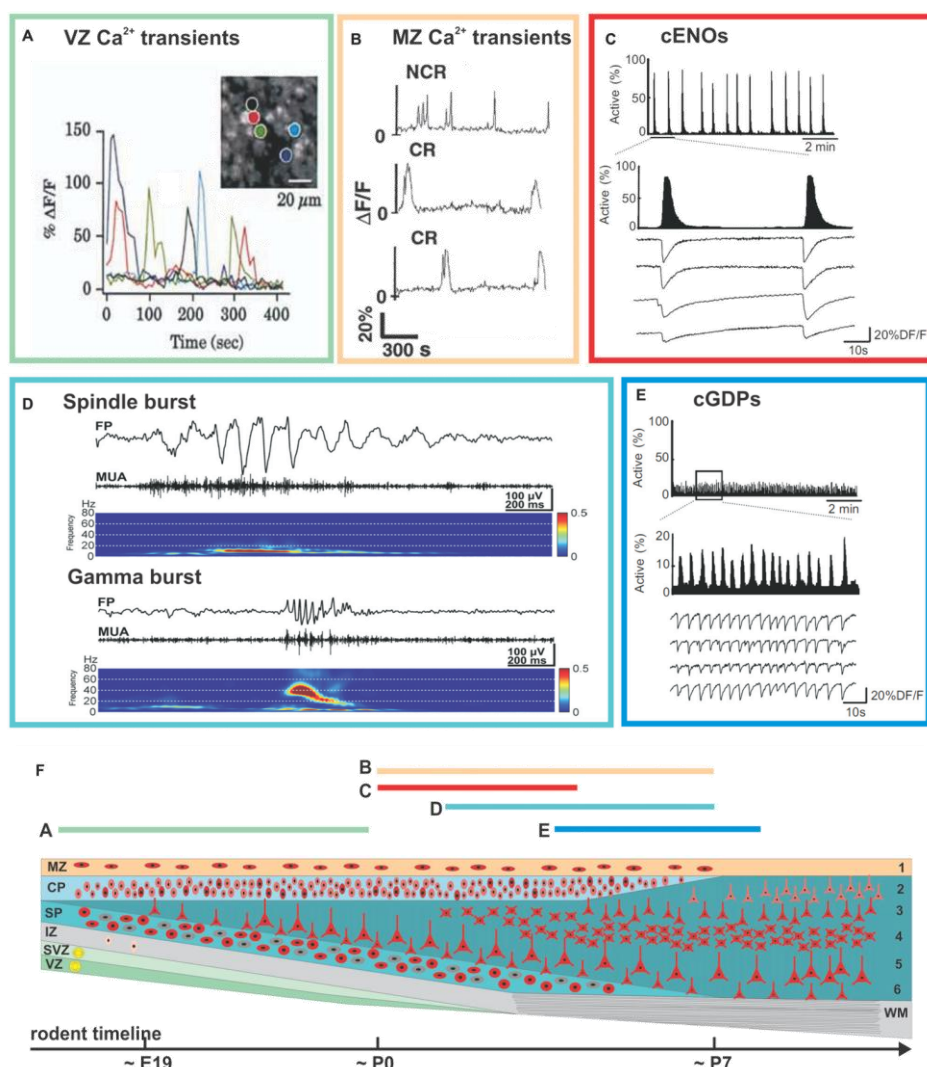
発達：自発性を基にした脳-身体-環境の情報構造の獲得



[金沢・國吉、発達心理学研究、2024、Byrge, Sporns,& Smith, *Trends Cogn Sci*, 2014]

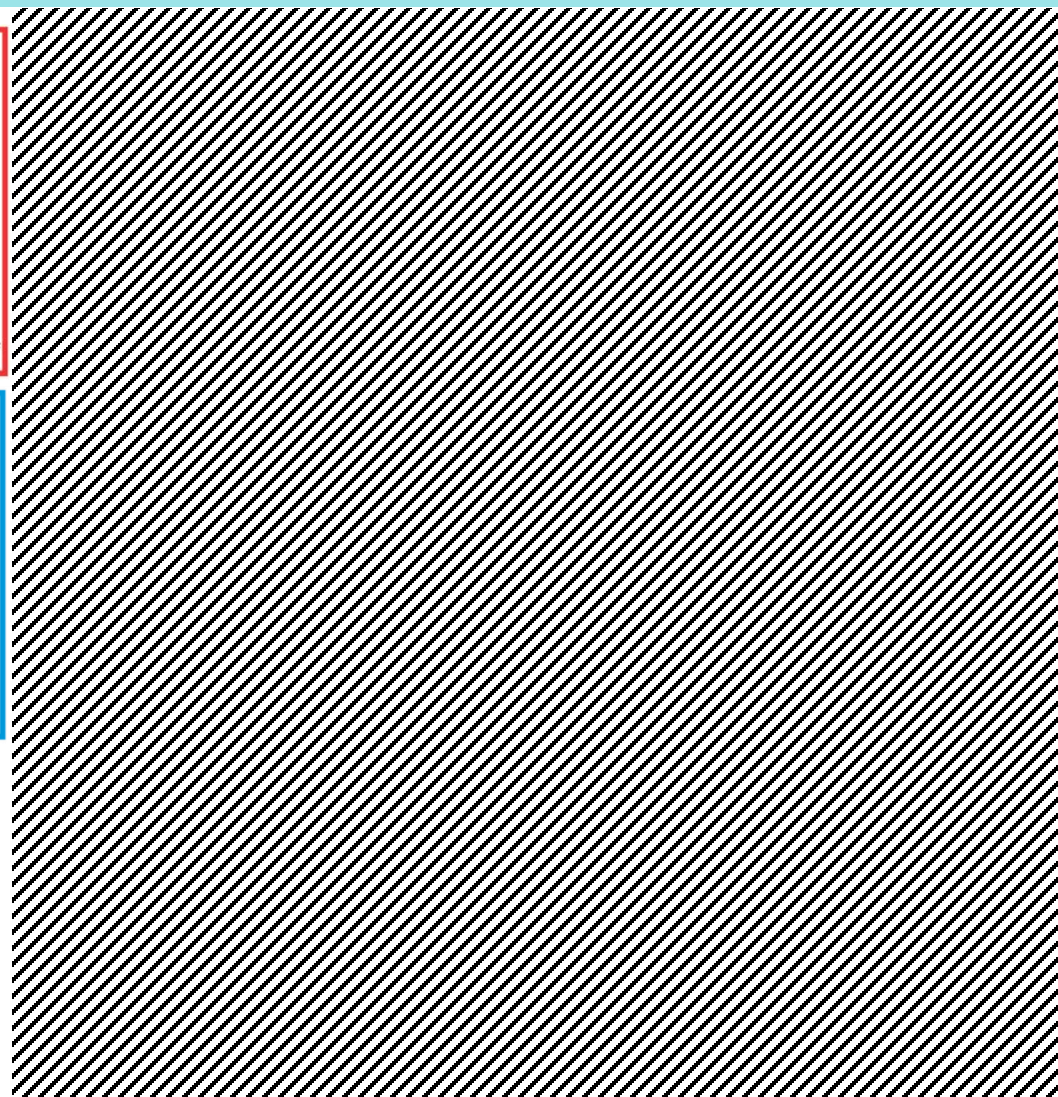
相互作用や構造について具体的に把握できるのか？

神経成熟の礎：自発的神経活動と同期



発達初期に特異的な自発活動

[Luhmann, et al., *Front Neurol Cir*, 2016]



同期的自発活動の拡大と構造化

[Molnár, et al, *Science*, 2020]

局所的な同期
(電気シナプス)

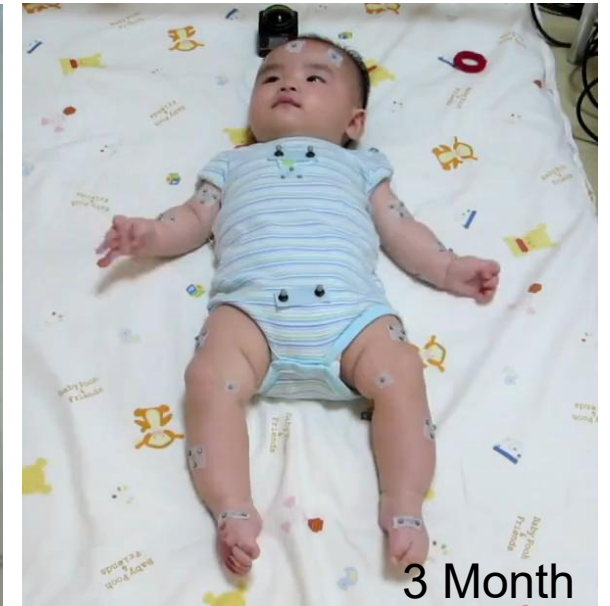
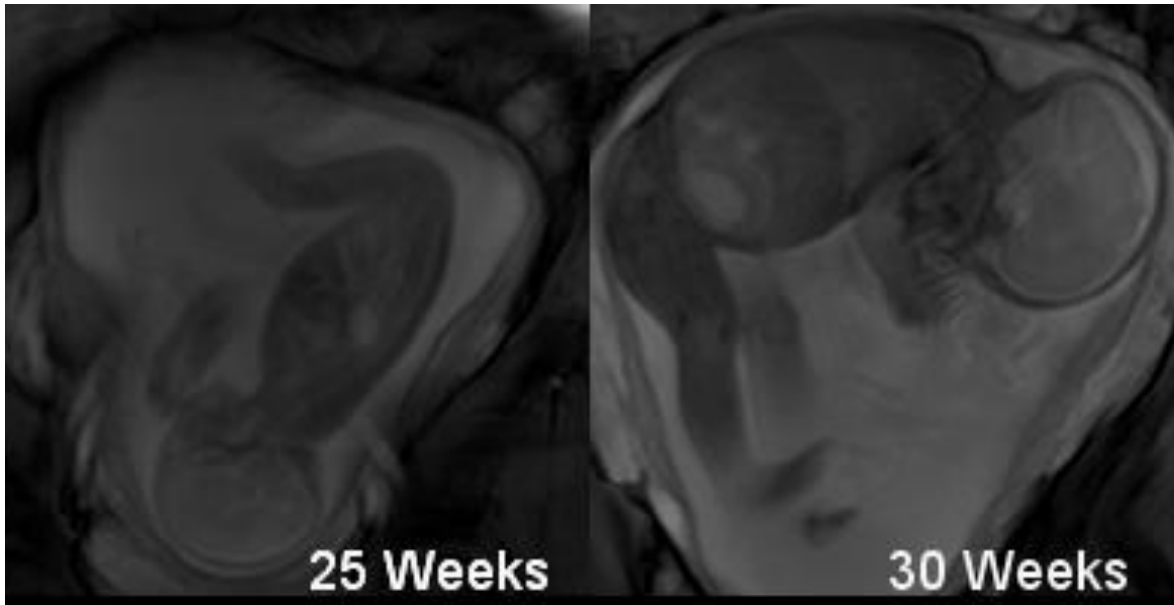


大局的な同期
(化学シナプス)



ネットワーク形成
(時空間構造)

発達最初期の行動：全身的自発運動



- ✓ 数秒～数分続く非反射的な全身運動
- ✓ 月齢に伴いパターンや複雑性が変化
- ✓ 神経系の成熟を反映する可能性
- ✓ 感覚運動の統合を促進する
- ✓ 神経学的予後予測への利用
- ✓ 神経学的なメカニズムが未解明

[Prechtl, *Dev Med Child Neurol*, 2001; Hadders-Algra, et al, *J. Clin. Med*, 2021; Novak et al, *JAMA Pediatr*, 2017;
[Kepenek-Varol, et al, *Early Hum Dev*, 2019; Verbruggen, et al, *N. R. Soc. Interface*, 2018]

➡ 明示的な目標や報酬がない自発運動が
どのように行動/認知発達に寄与するのか？

要素還元的アプローチとその限界

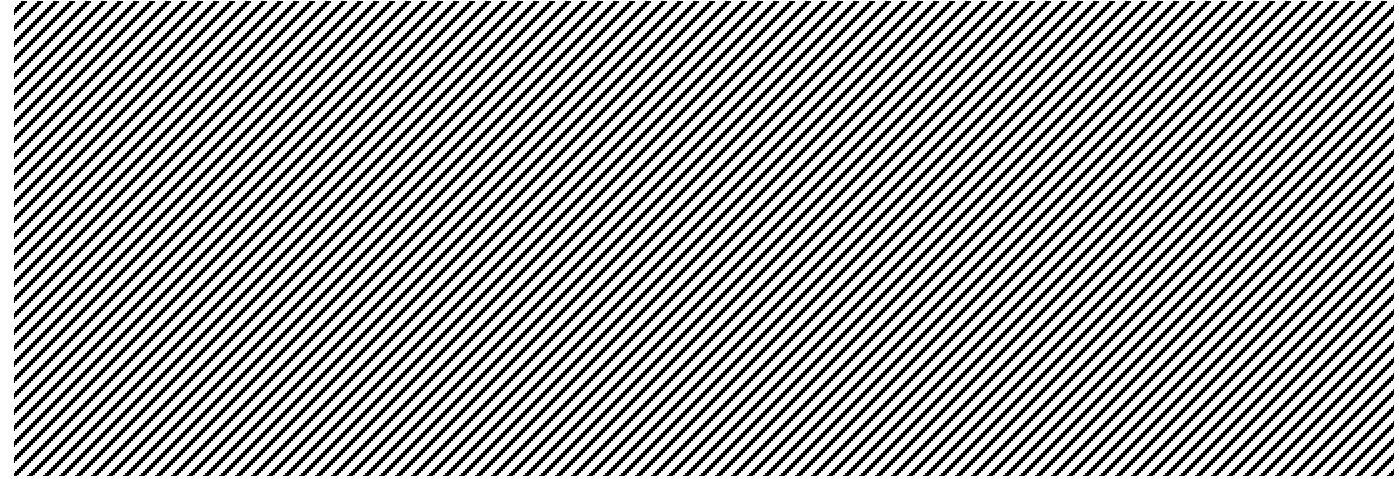
[Greene, J. A., & Loscalzo, J, *NEJM*, (2017)]

[ハーバート・A・サイモン, システムの科学, 1996]

[Rolf Pfeifer, *Japanese Conference on AI*, 1996]

非要素還元論としての身体性認知科学

感覚運動情報構造に起因する無目的なロボットの行動創発



[Maris and Boekhorst, IROS, 1996; Collins et al., Science, 2004]



Body Shapes Brain

環境-身体の相互作用が感覚運動情報構造を生む

[Pfeifer, Lungarella, Sporns & Kuniyoshi, 50 Years of AI, 2007]

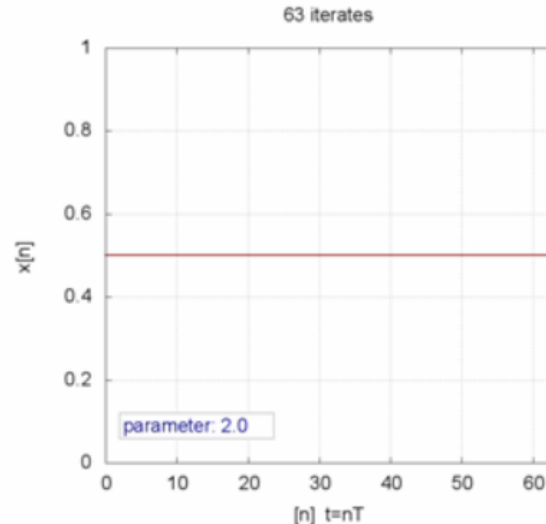
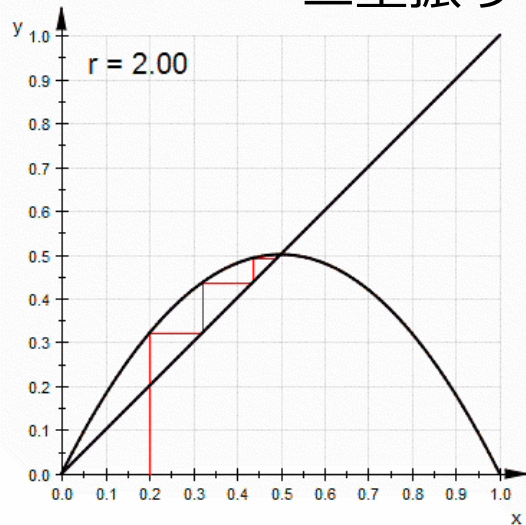
[Pfeifer, Lungarella, Iida, Science, 2007]



複雑な運動・行動の起源としてのカオス

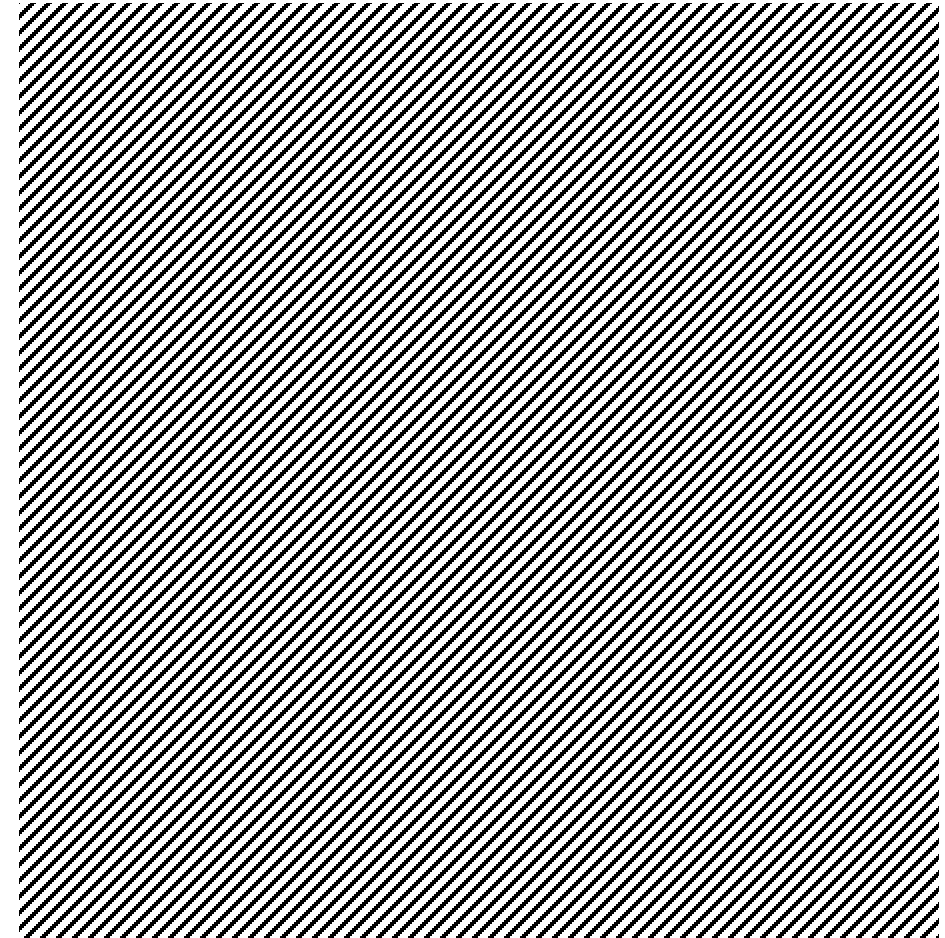
カオス結合系とカオスの遍歴

二重振り子にみるカオス



Logistic map: $X_{n+1} = rX_n(1 - X_n)$

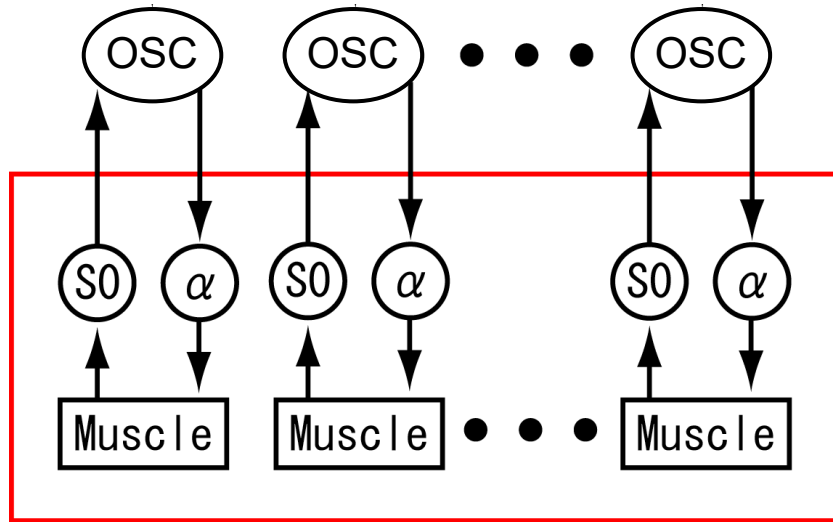
[Wikipedia]



[Kankeo & Tsuda, Chaos, 2003]

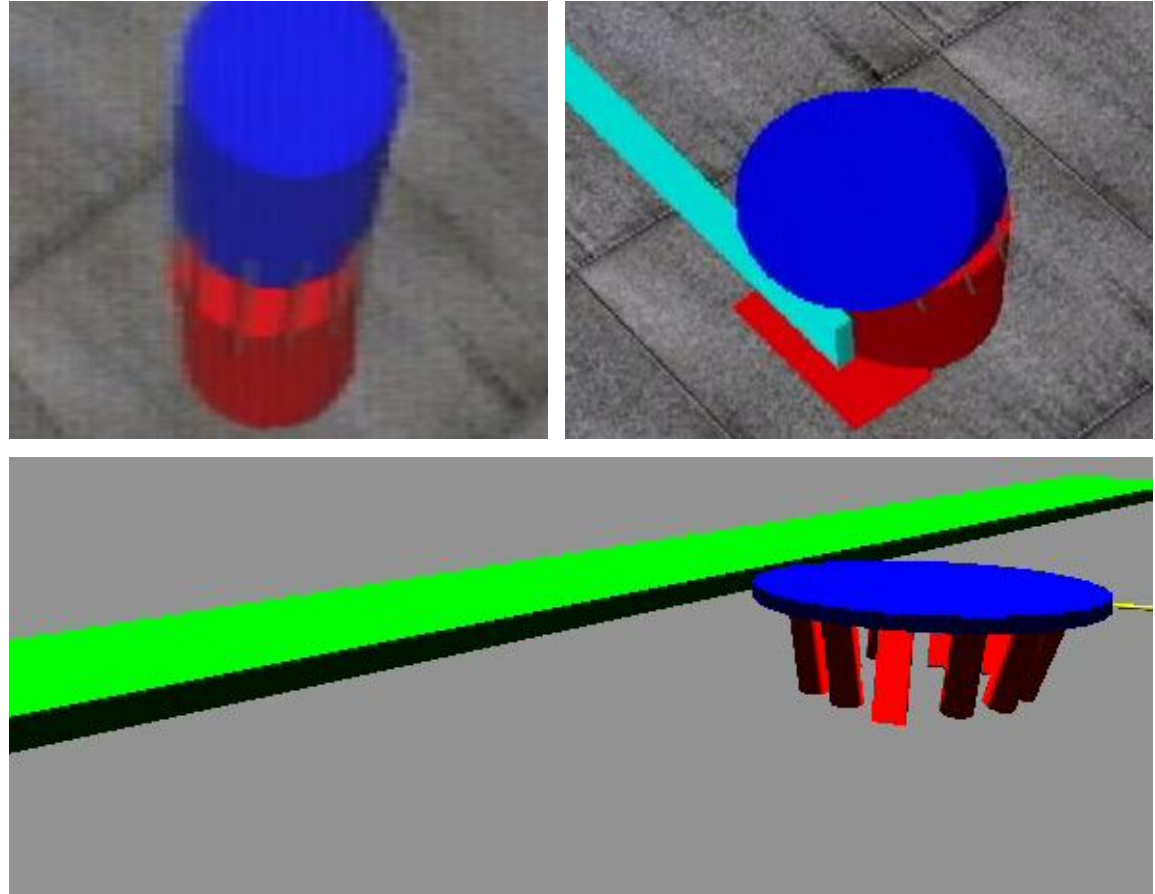
➡ 行動の発現や獲得に必要な複雑なダイナミクスの生成に利用

身体性を介したカオス結合系による行動創発



Body Coupling

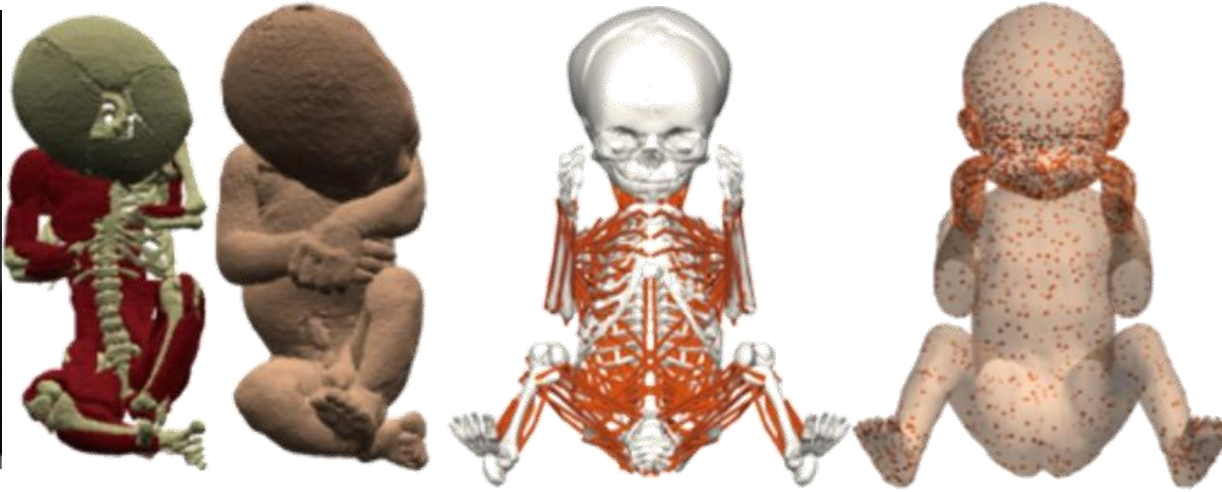
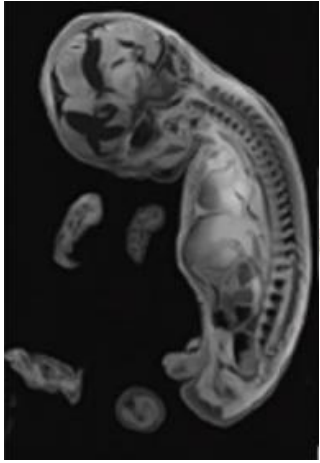
$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= c \cdot \left(x - \frac{1}{3}x^3 - y + in_{control} \right) + \delta \cdot (Ia - x) \\ \frac{dy}{dt} &= \frac{1}{c} \cdot (x - b \cdot y + a) + \varepsilon \cdot Ia\end{aligned}$$



[Y. Kuniyoshi IEEE IROS, 2004]

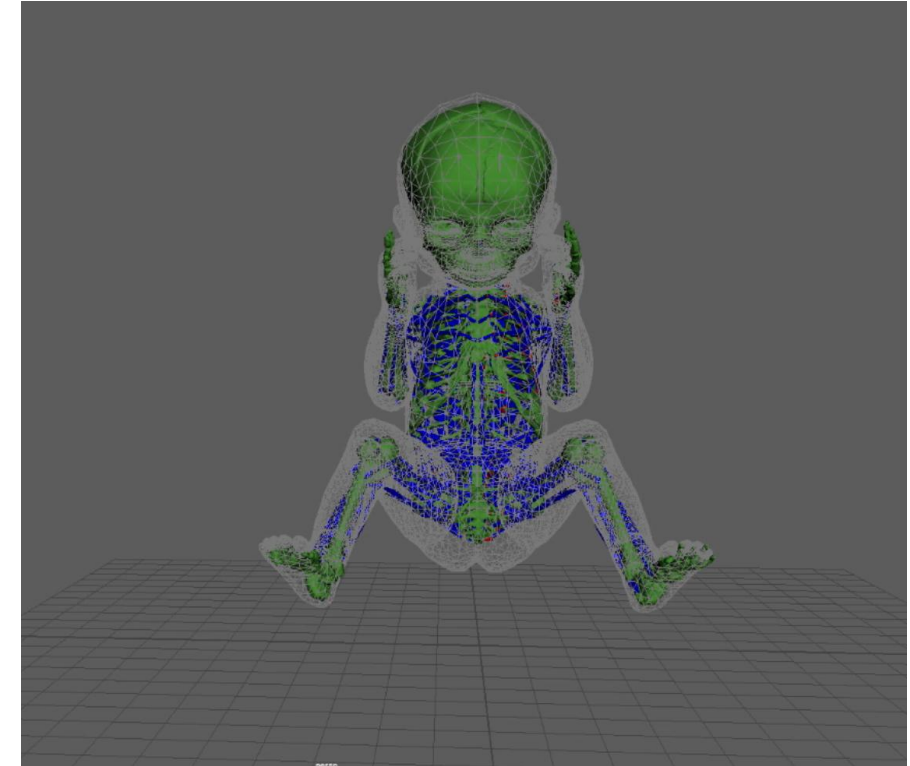
神経系の直接制御がなくても身体-環境間相互作用から
身体や環境に対して適応的な行動が創発されうる

胎児・新生児筋骨格モデルへの拡張



MRIベースの皮膚＋筋骨格モデル

身体部位: 21	筋肉数: 390
関節数: 20	触覚点: 3000
関節自由度: 36	視覚: 2カメラ



筋配置・骨/皮膚形状の修正

胎児MRI/骨標本から皮膚・骨格・筋を再現し、関節や接触センサも配置
➡世界で唯一の胎児・新生児を模した皮膚を備えた筋骨格モデル

胎児筋骨格モデルによる自発運動生成

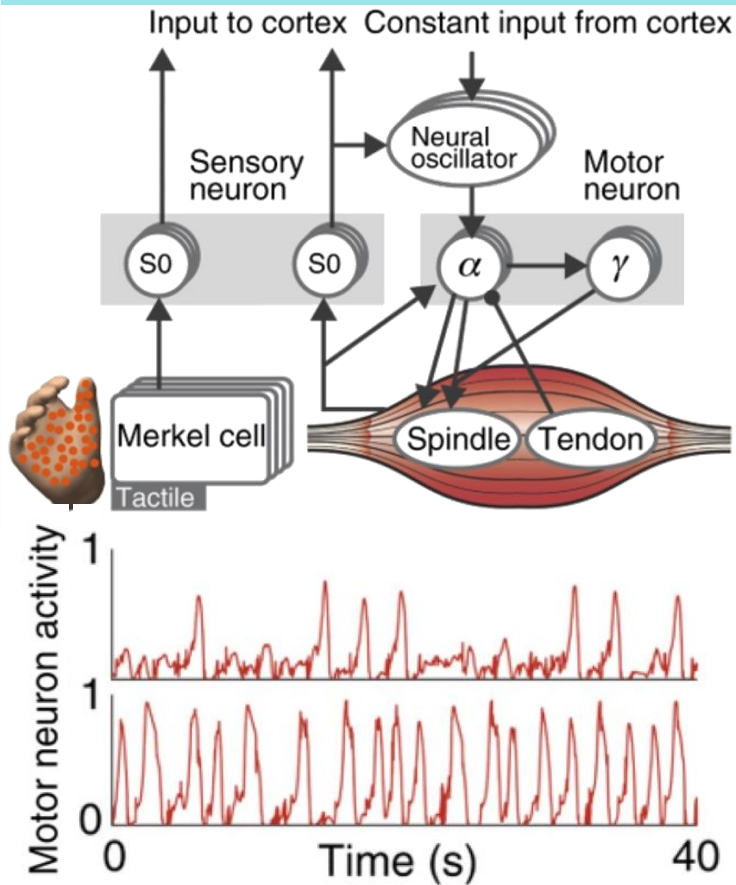


再現対象：胎児/乳児自発運動

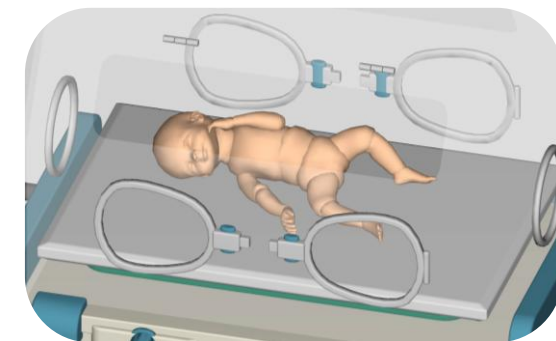
$$\frac{dx}{dt} = c \cdot \left(x - \frac{1}{3}x^3 - y + in_{control} \right) + \delta \cdot (Ia - x)$$

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

カオスによる複雑な挙動の生成



全身骨格筋への振動子導入

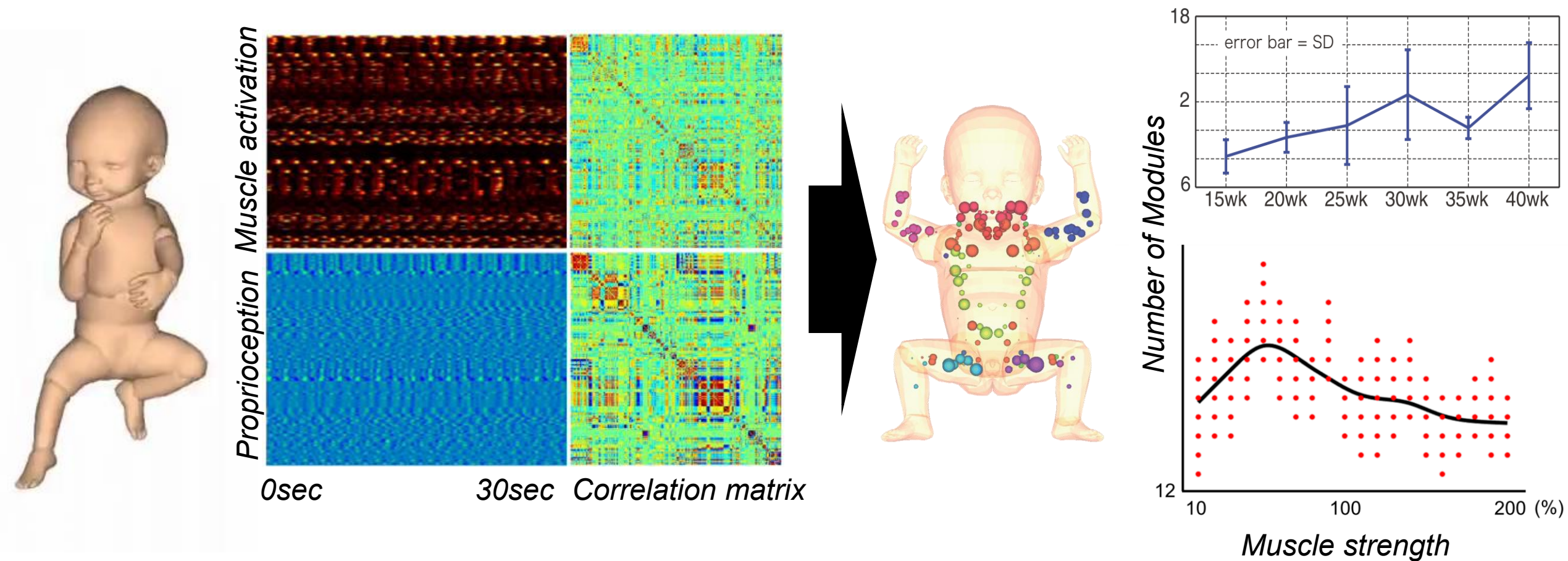


自発運動の創発

自発活動としてのカオス振動子に着目し筋骨格モデルに導入

➡事前設計・制御に依らない胎児・乳児の自発運動の創発に成功

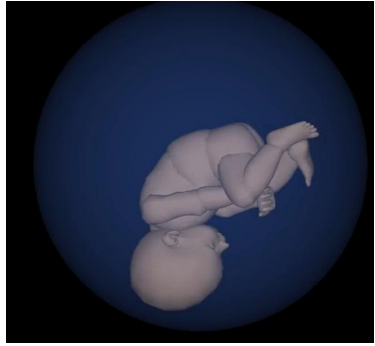
自発運動モデルにおける感覚運動情報構造の抽出



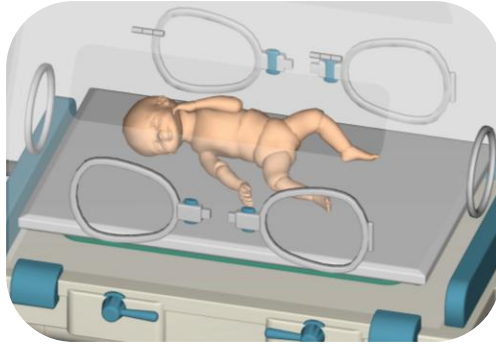
➡ 身体-環境の相互作用の検証や病態の理解に利用できる

脳-身体-環境モデルによる発達理解

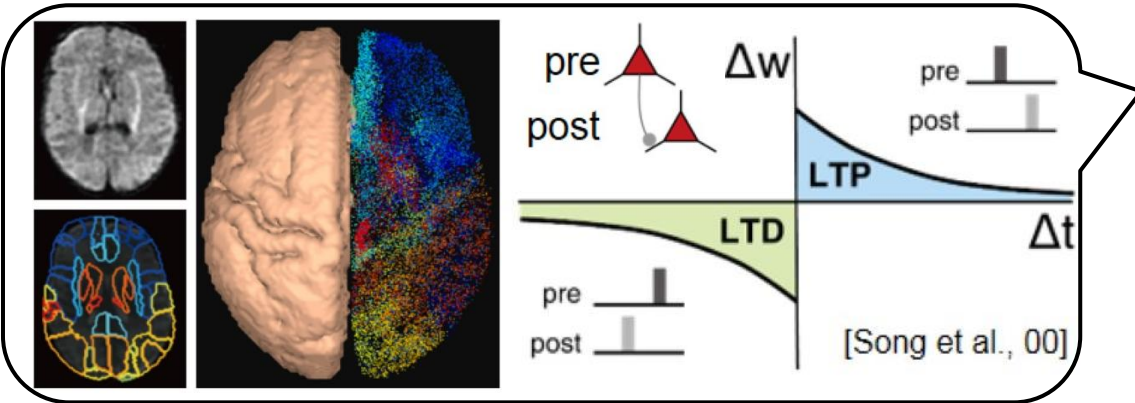
胎内条件



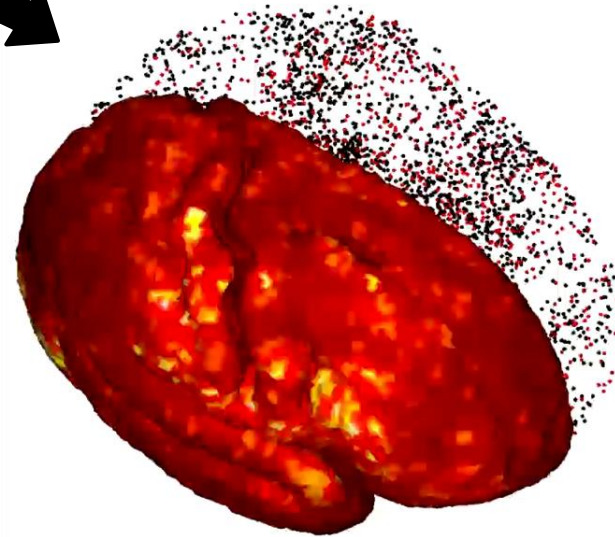
胎外条件



環境変化のみで生じる感覚入力の変化

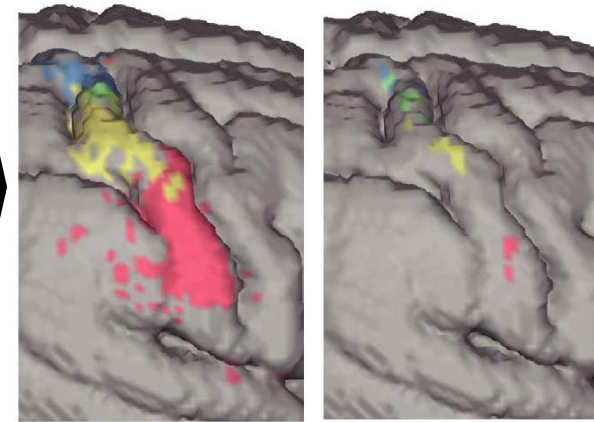


神経科学・生物学的に妥当なモデル



学習する大脳皮質モデル

Leg Trunk
Arm Head



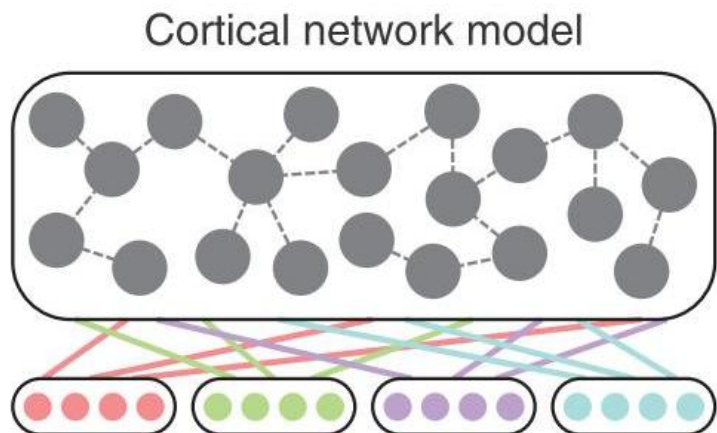
胎内条件 胎外条件
神経応答の変化

脳モデルを作成し、身体モデルで生成した感覚入力による影響を検証
➡在胎期間の短縮（≠早産）による刺激に対する脳活動低下の影響を示唆

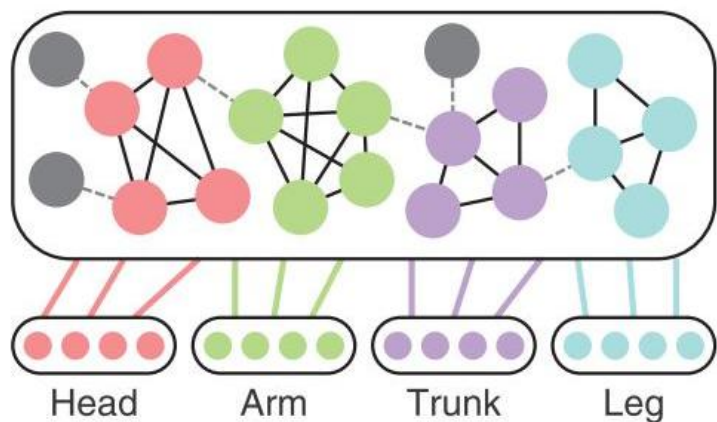
[Yamada, Kanazawa, Kuniyoshi, et al, *SciRep*, 2016]

自発運動＋筋骨格身体＋皮質モデルで確認できる現象

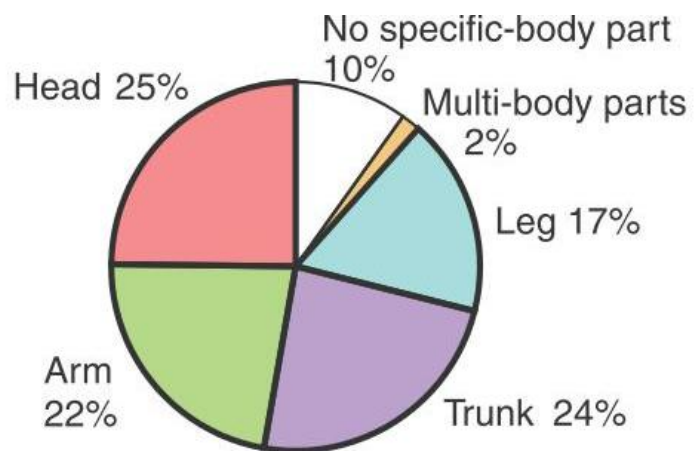
[Yamada, Kanazawa & Kuniyoshi, *Cambridge Handbook of Infant Development*, 2020]



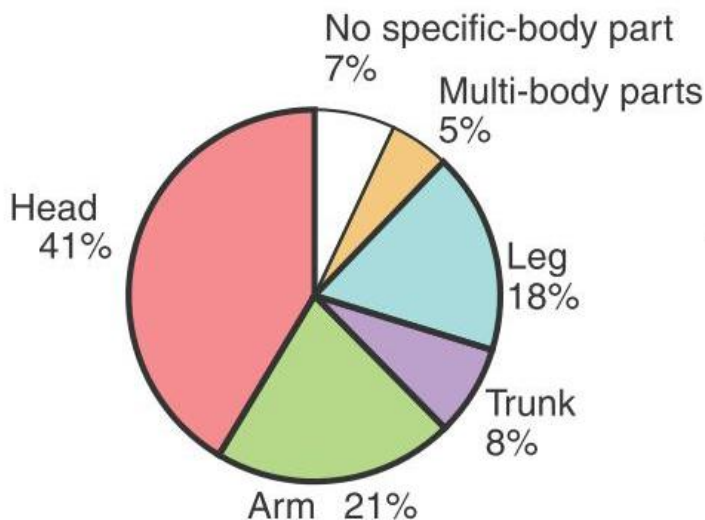
Learning with STDP



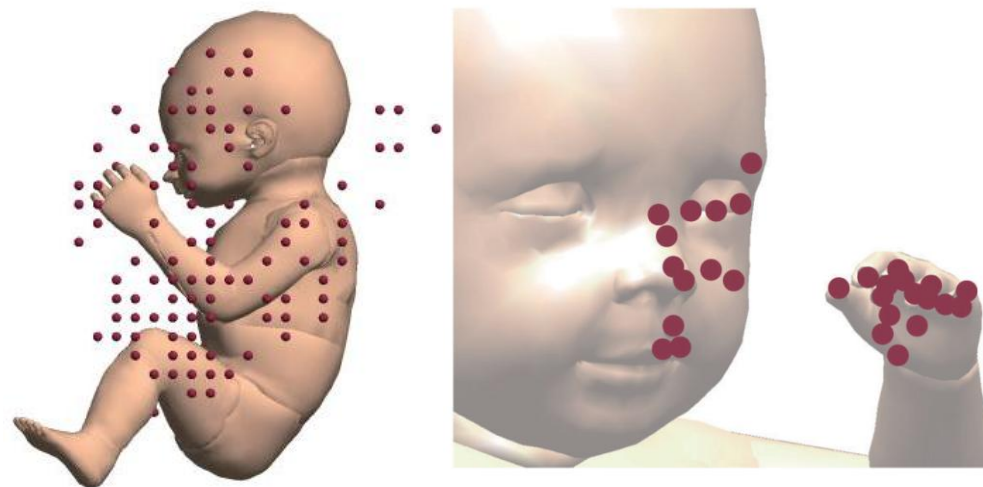
Feedforward sensory input
for proprioception and tactile



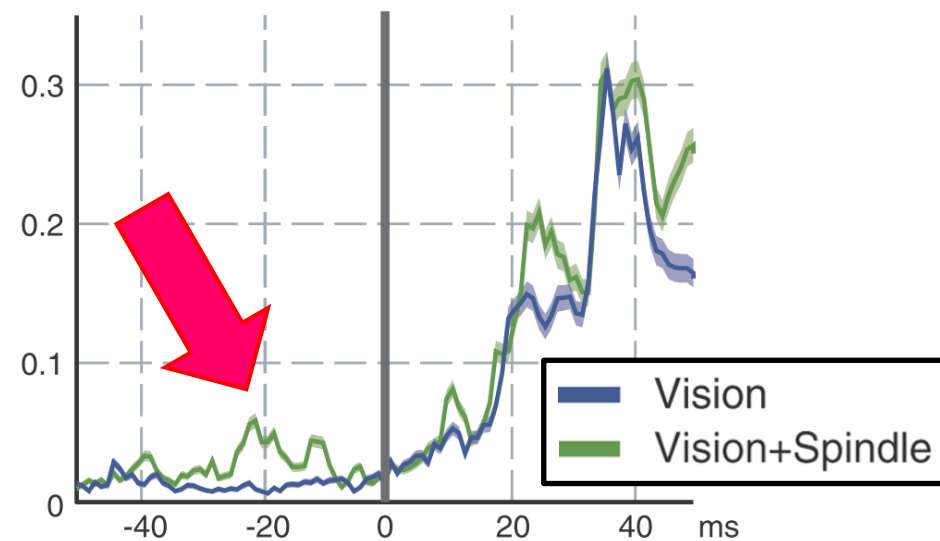
(a) Proprioception



(b) Tactile



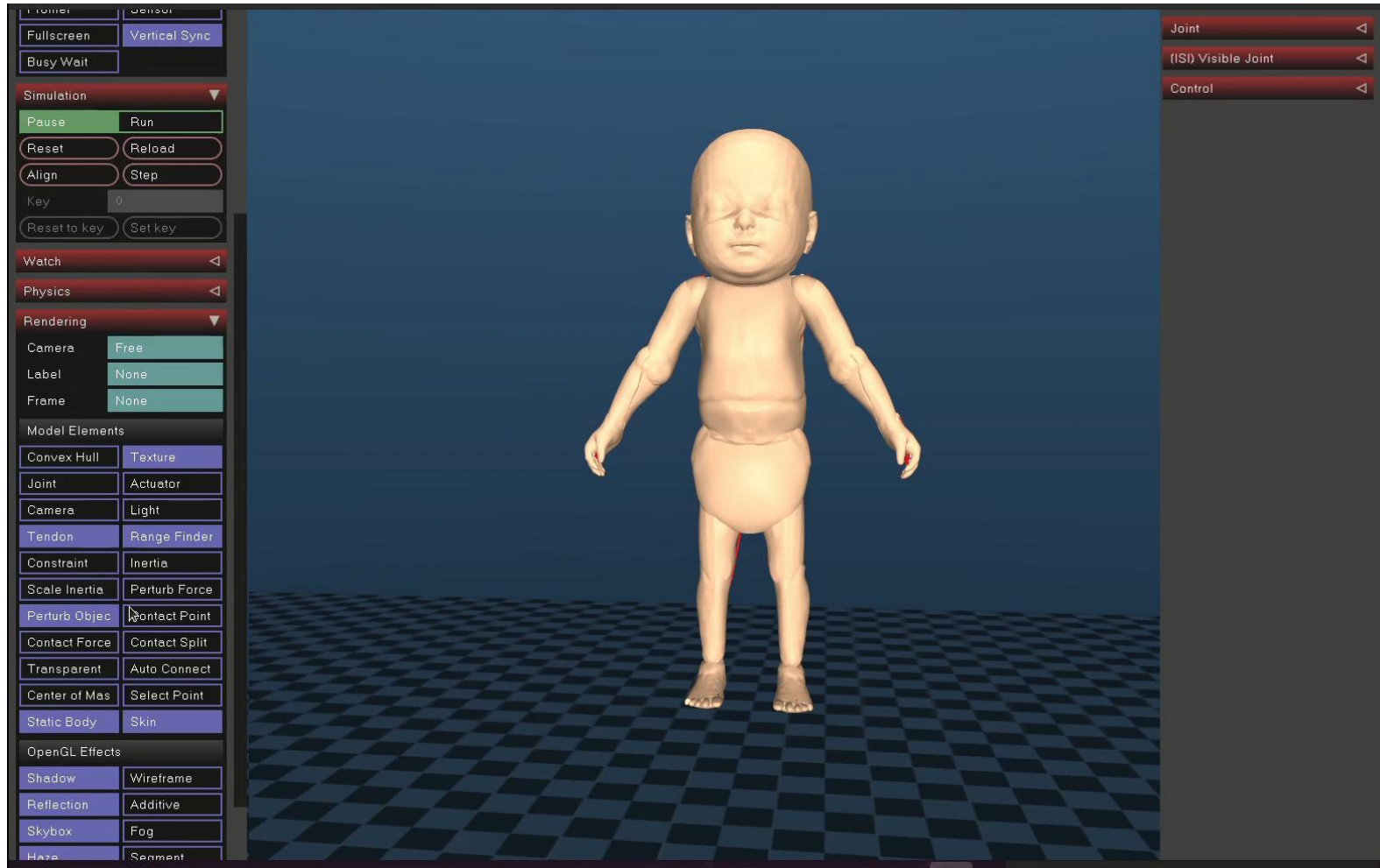
＜空間特異的 or マルチモーダルな神経群＞



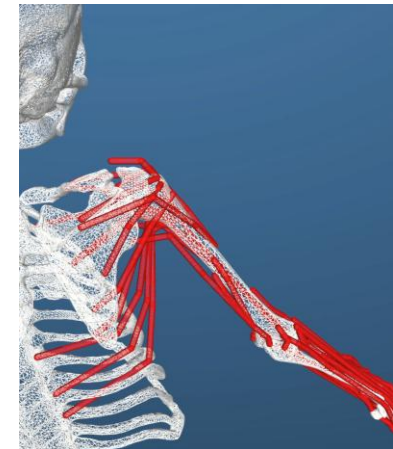
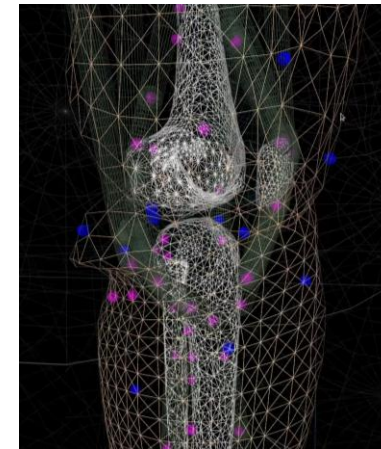
＜予測的神経活動＞

＜感覚入力に依存したモジュールの統合/分離＞

EMFANT: Embodied Model of Fetus And infaNT



Dongmin Kim



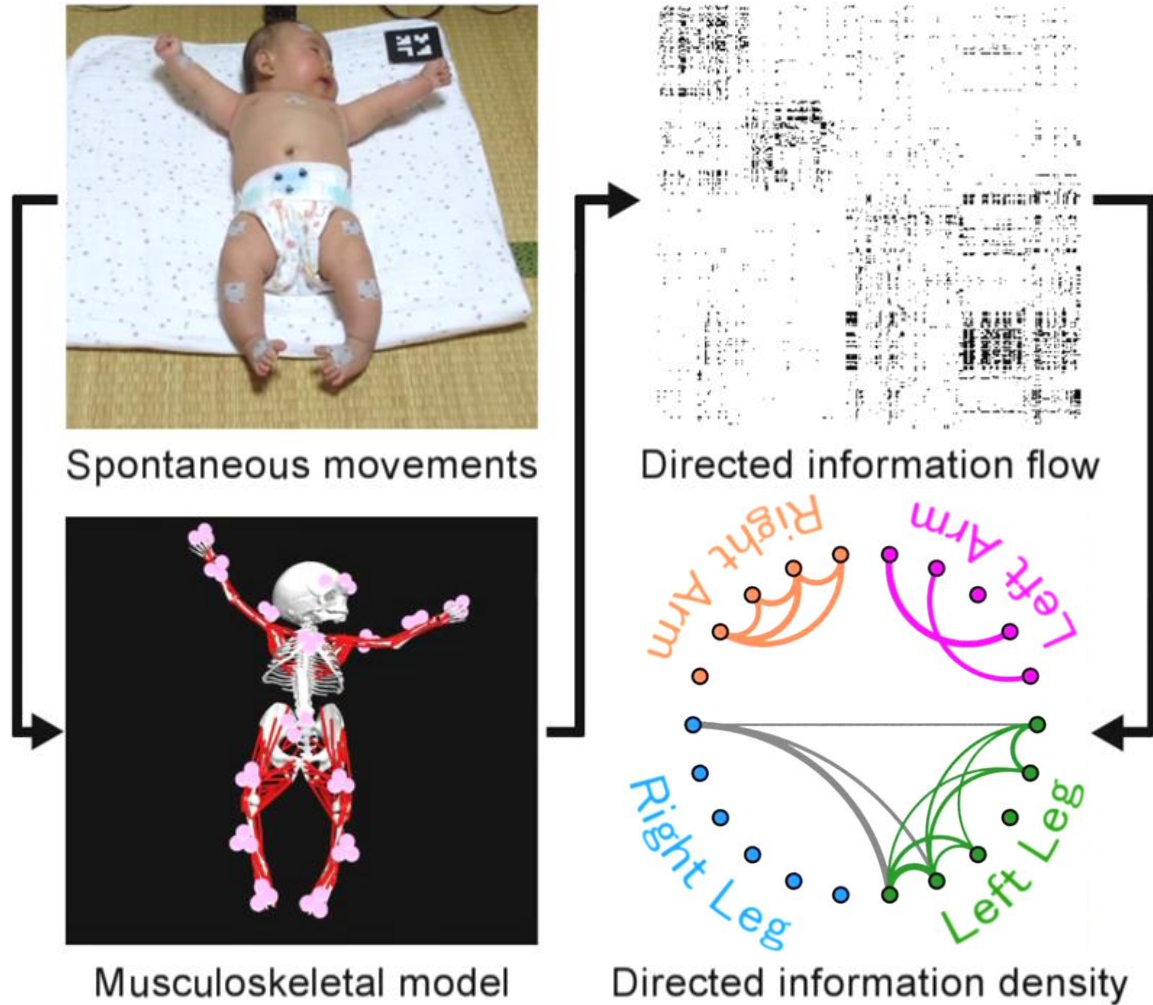
前半のまとめ

運動/行動発達に関連する要素は多数存在するが、
各要素単体での複雑な発達現象の説明は困難
(要素還元的方法の限界)

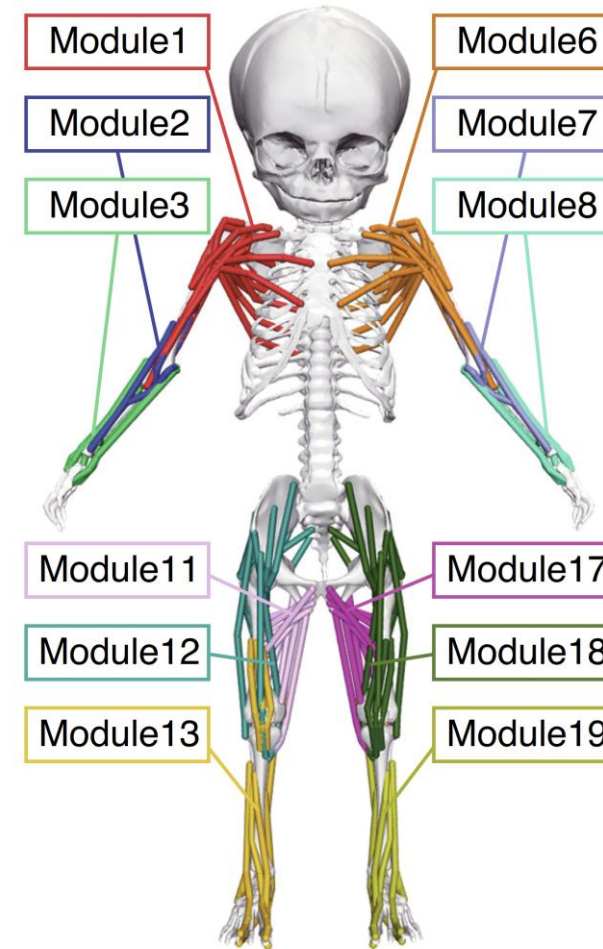
自発性と身体構造に基づくシミュレーションから、
発達初期の自発的な全身運動や神経成熟が再現可能
(構成論的アプローチの有用性)

実乳児の自発運動による感覚運動情報の構造化

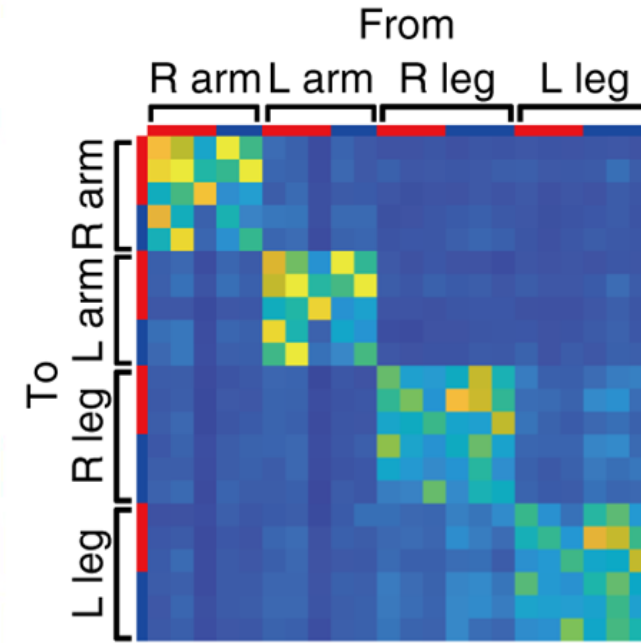
[Kanazawa, et al, PNAS, 2023]



感覚運動モジュールの生成と動的パターン



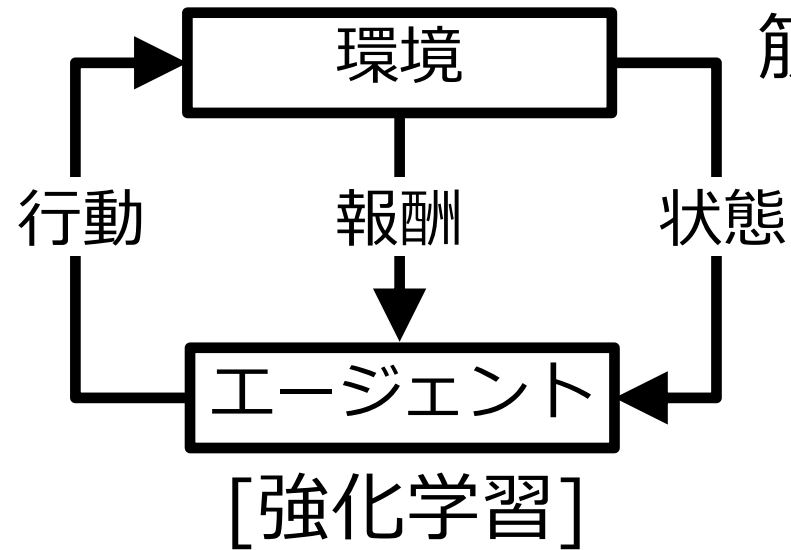
身体性依存のモジュール



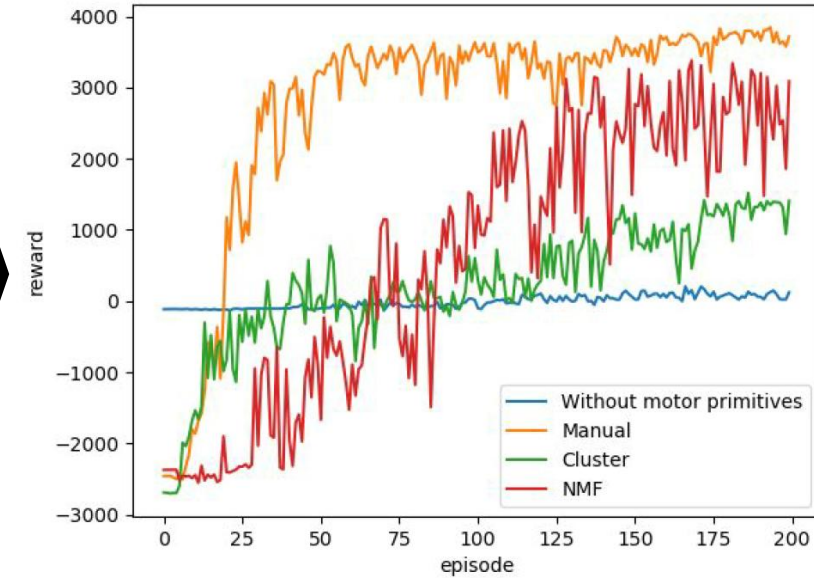
感覚運動情報構造

自発運動を基に発達に伴って変化する感覚運動構造が出現

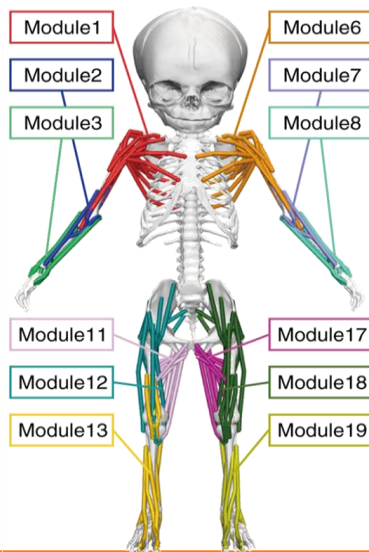
感覚運動情報構造の役割：複雑な行動獲得への寄与



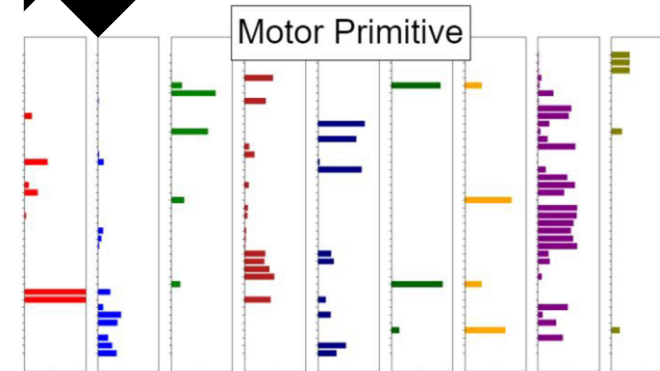
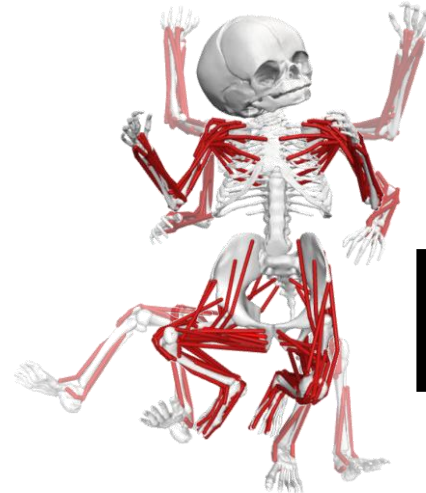
筋骨格身体=多自由度冗長系



[Shinomiya, Kanazawa et al., AMAM, 2023]



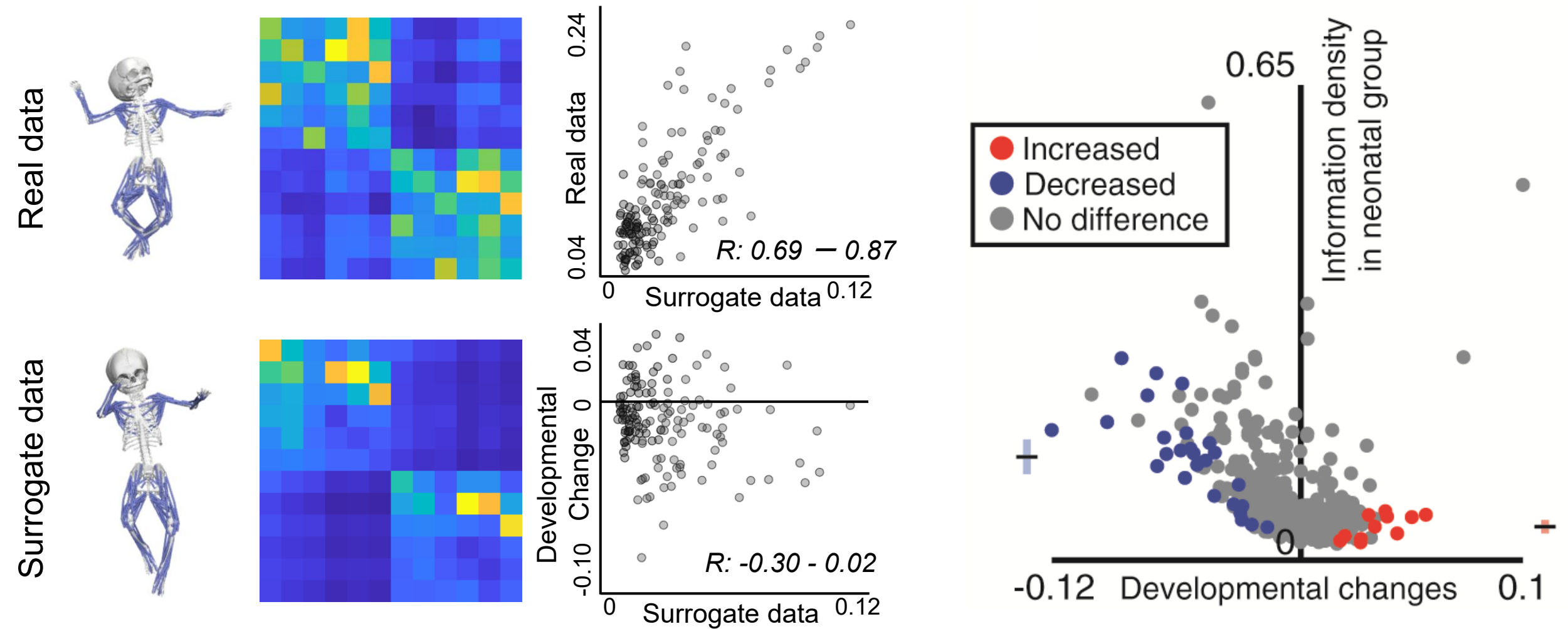
計測ベースの筋グループ



ヘブ学習ベースの筋グループ

内発的動機：新奇的感覚運動情報に向けた探索行動

[Kanazawa, et al, *PNAS*, 2023, Kanazawa et al., *in prep*]

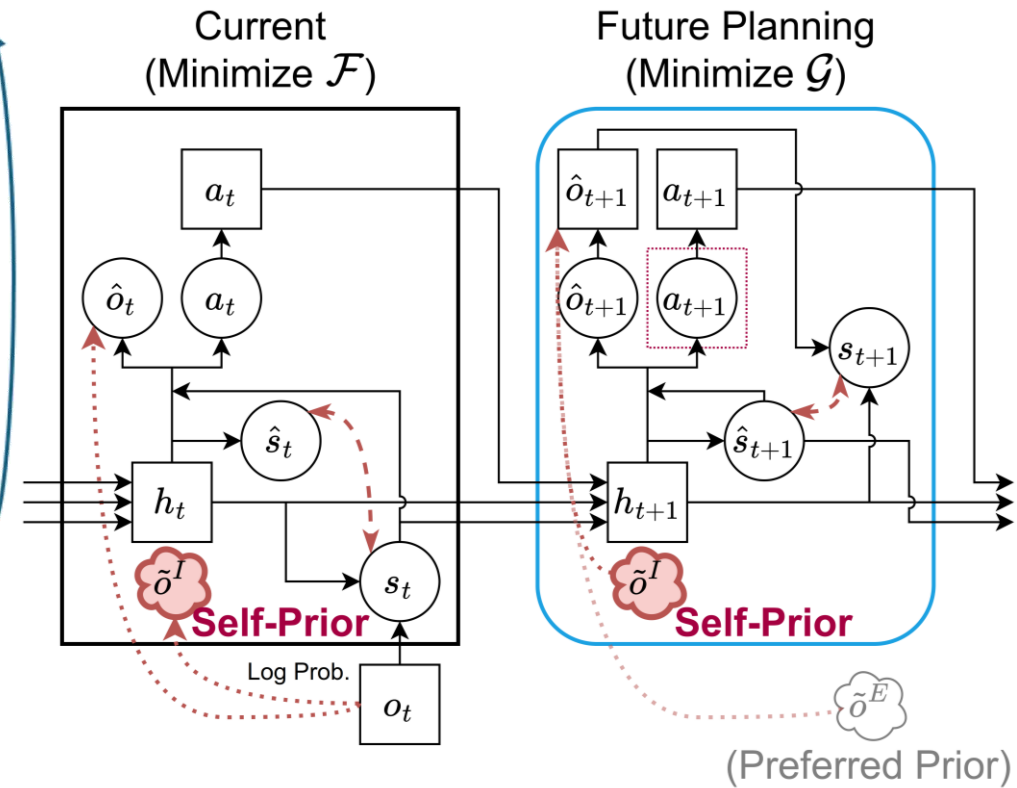
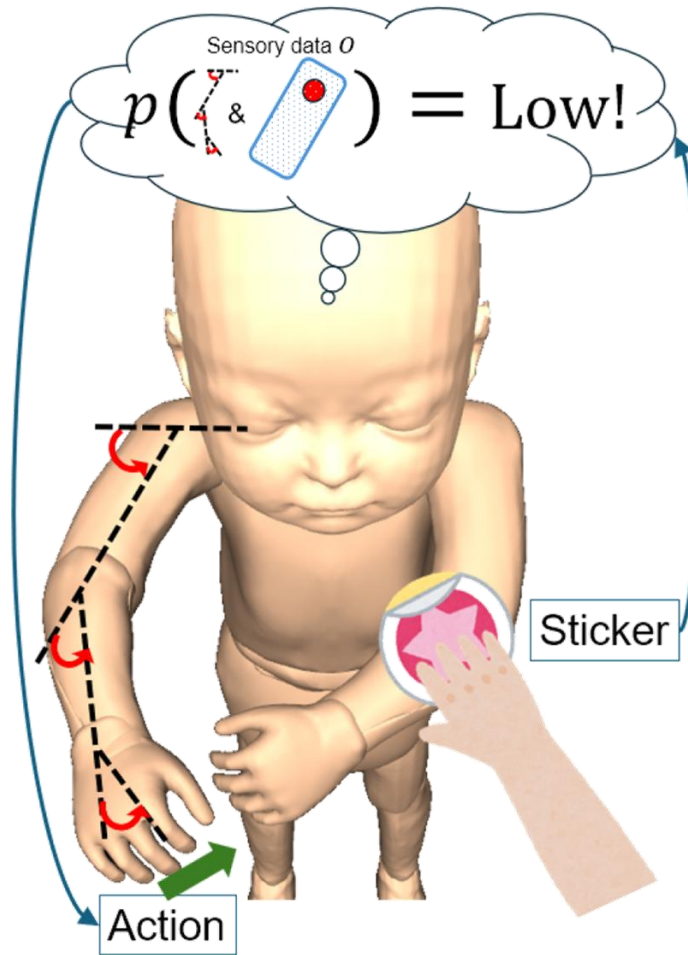
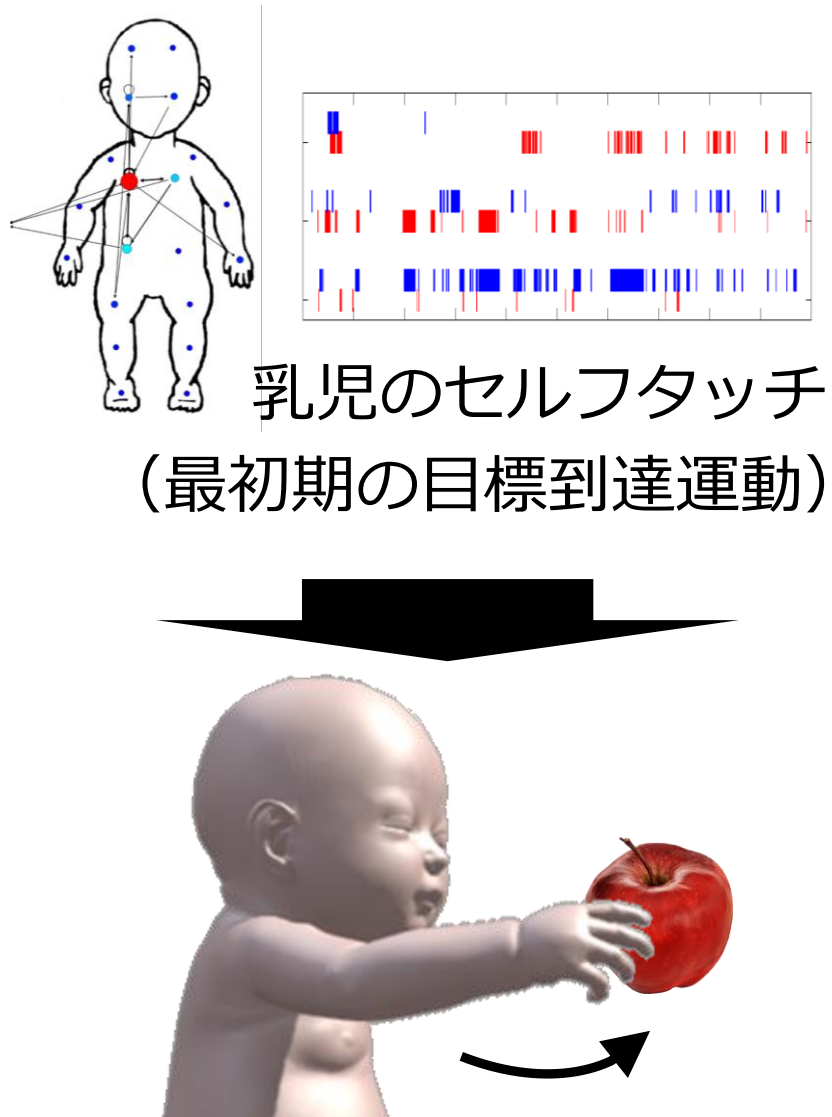


身体性のみでは発達説明不能

情報密度の変化は経験と逆相関

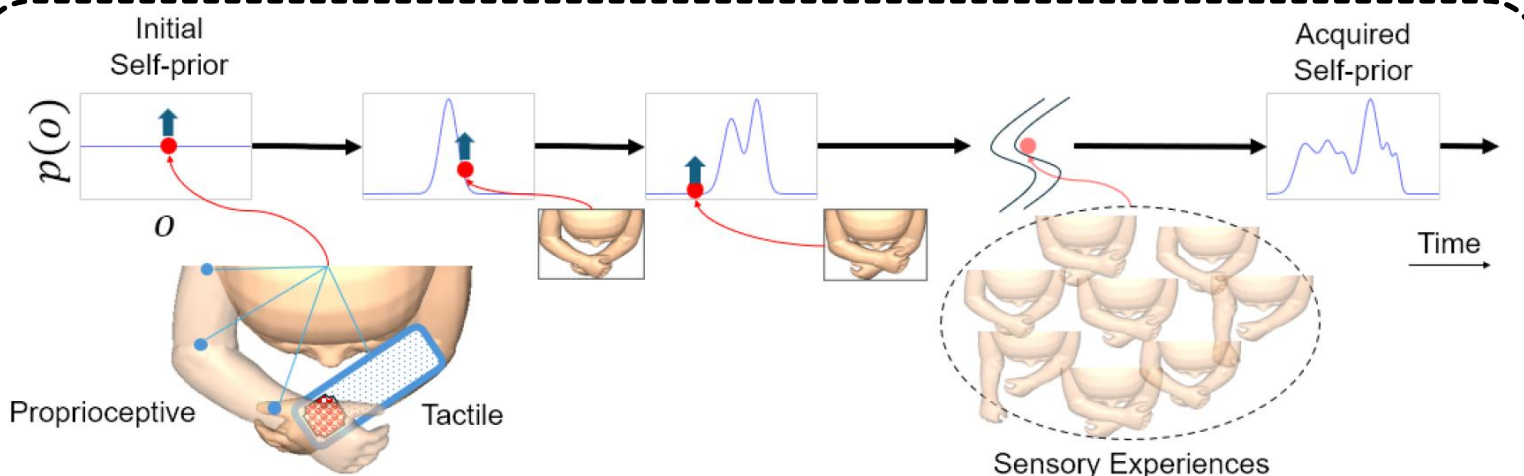
➡ 無目標/無報酬の発達初期における好奇心に基づく探索行動？

Active Inferenceを基にした内発的動機モデル

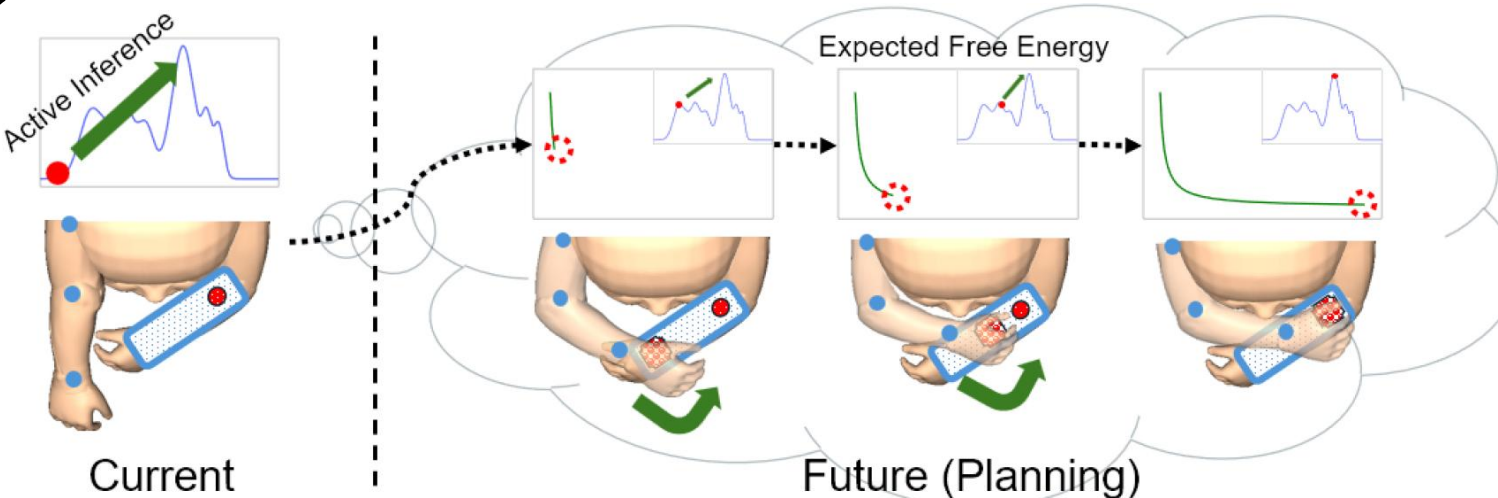


Self-priorの獲得と外的刺激に対する行動生成

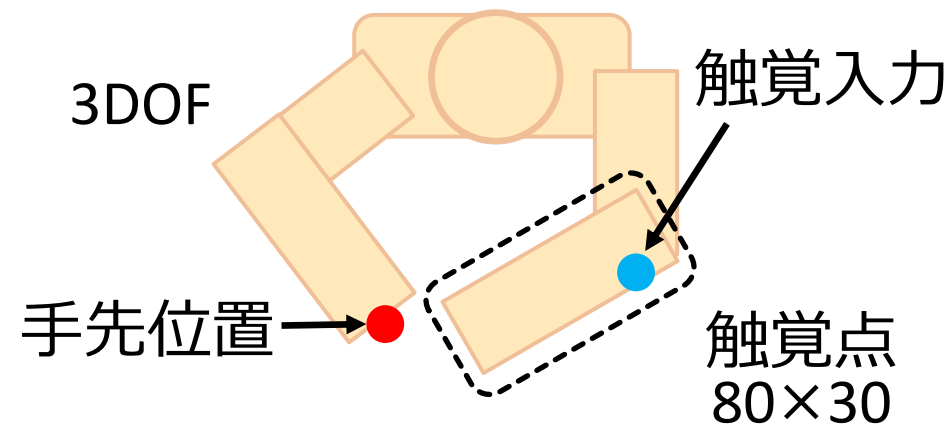
感覚運動情報構造に対する内発的動機を用いた行動創発



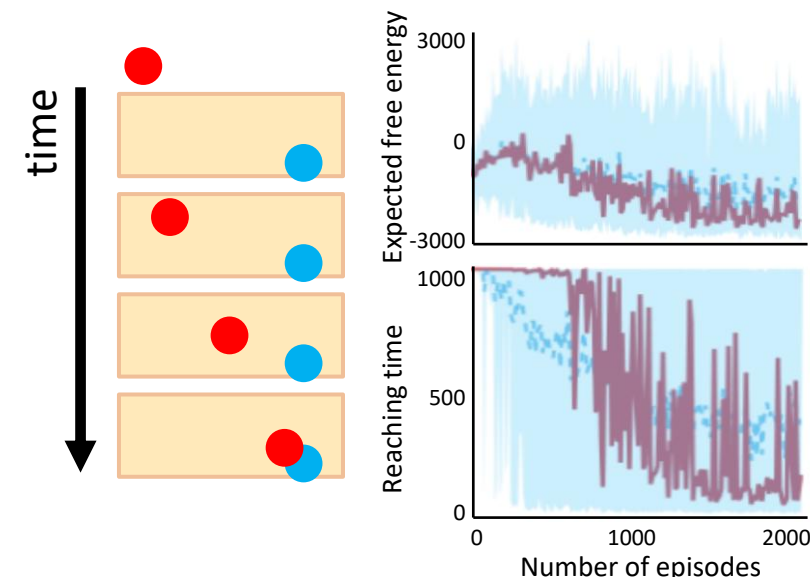
自発運動を介したSelf-priorの構築



Self-priorに基づく運動生成（触覚入力へのリーチ）

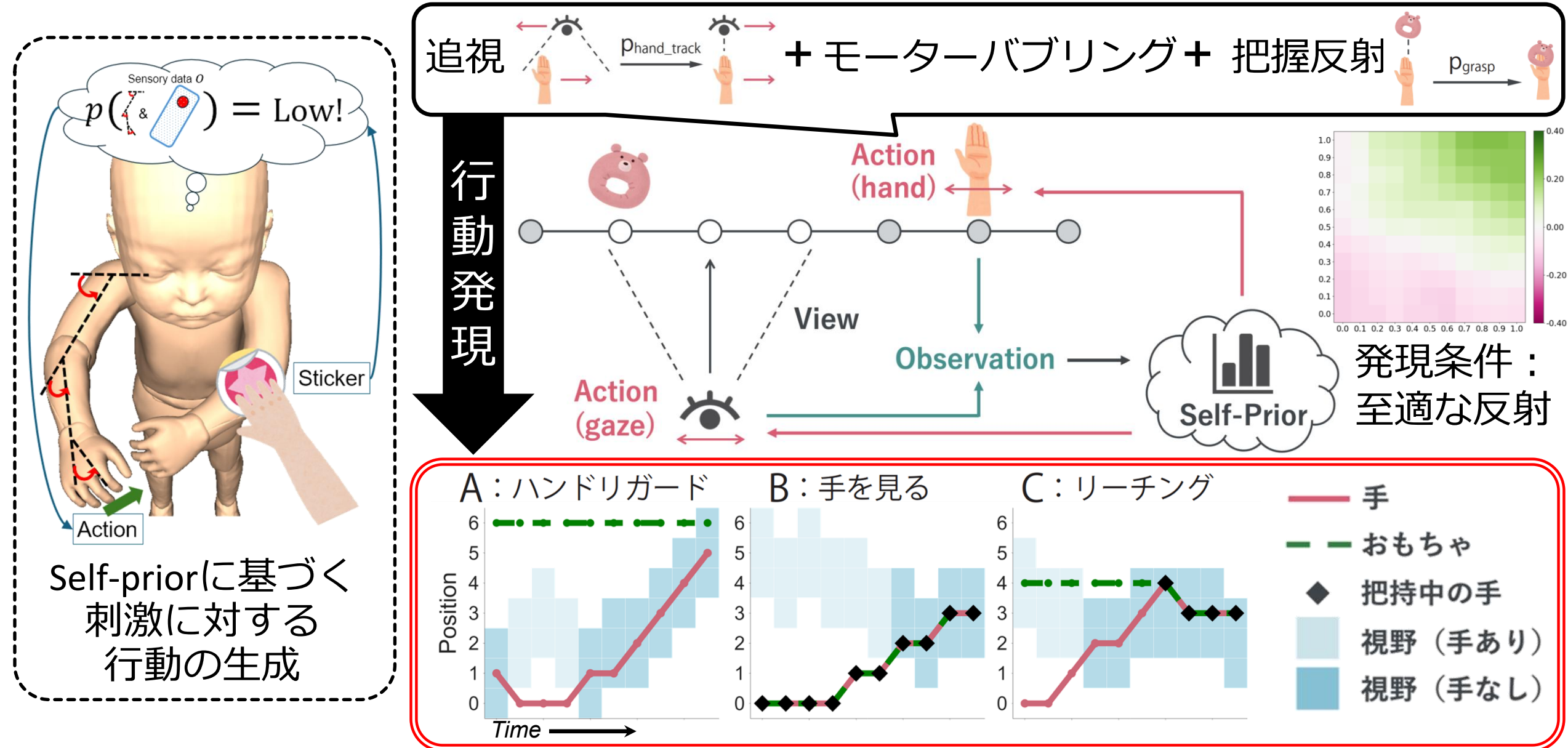


Arm model with tactile & prop

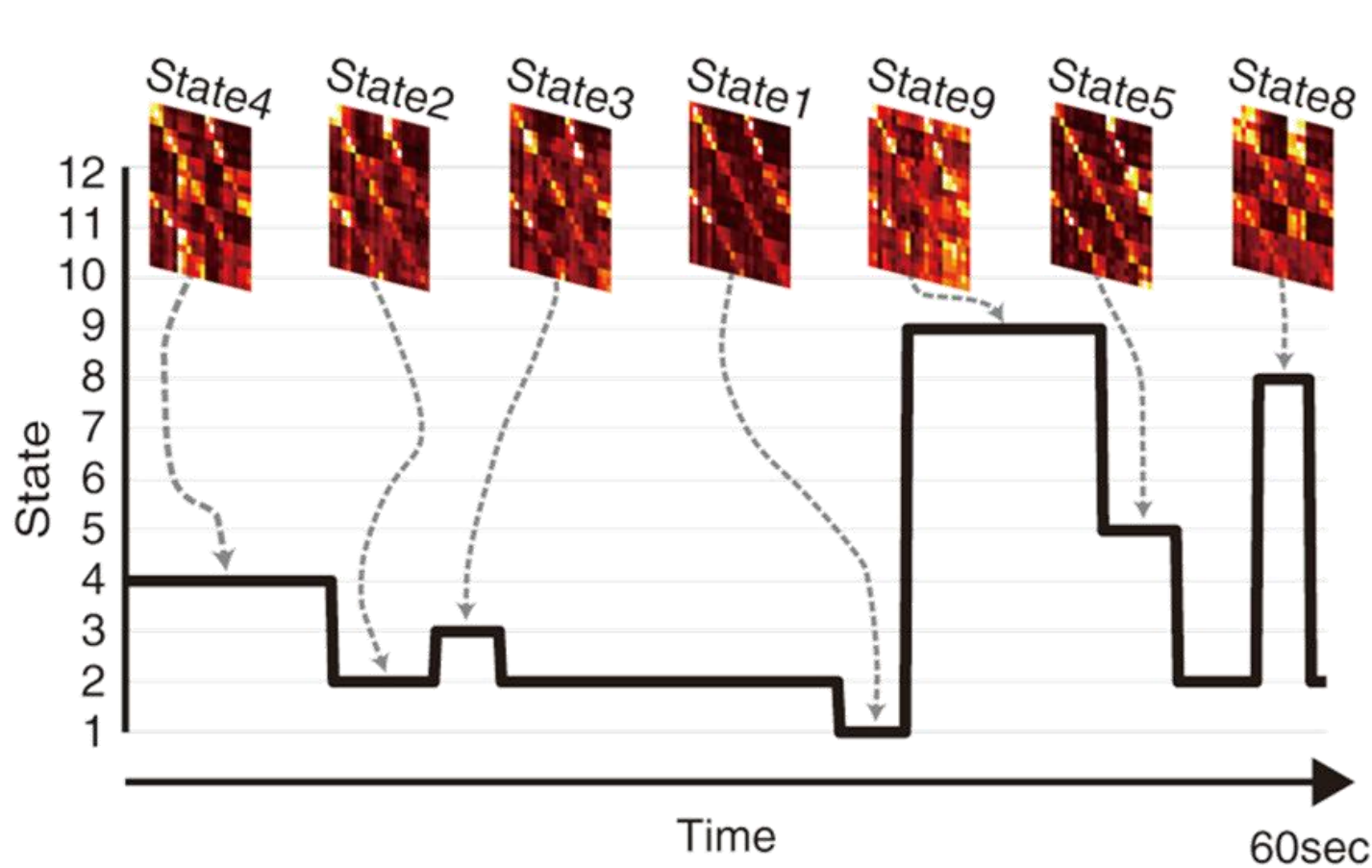
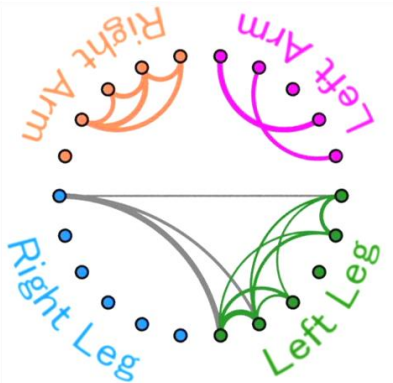
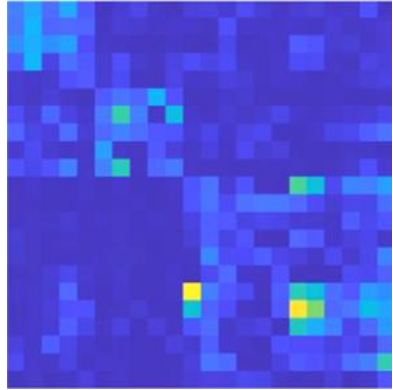


[Kim, Kanazawa, Kuniyoshi., *submitting*]

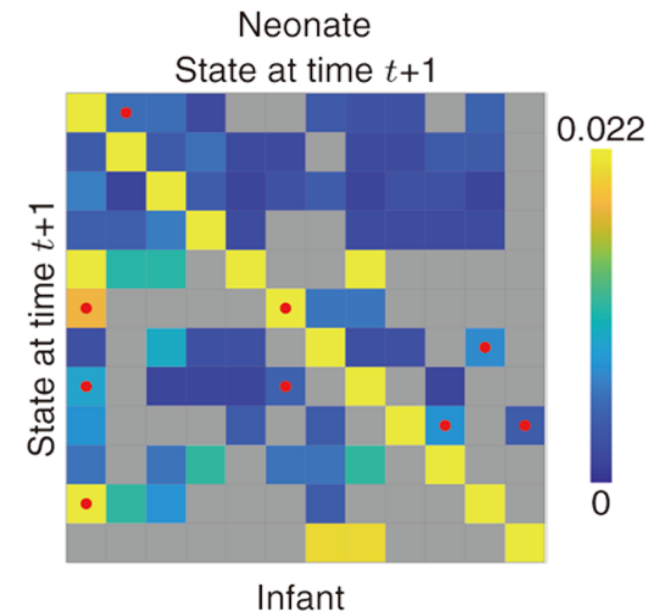
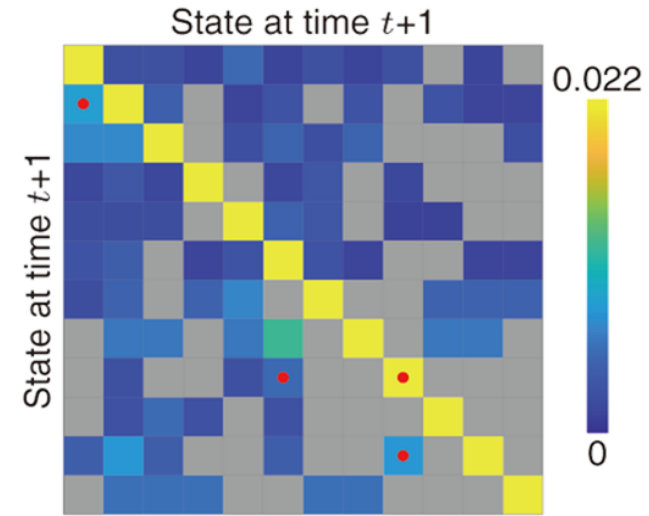
反射に基づく多感覚経験を介した多様な行動発現



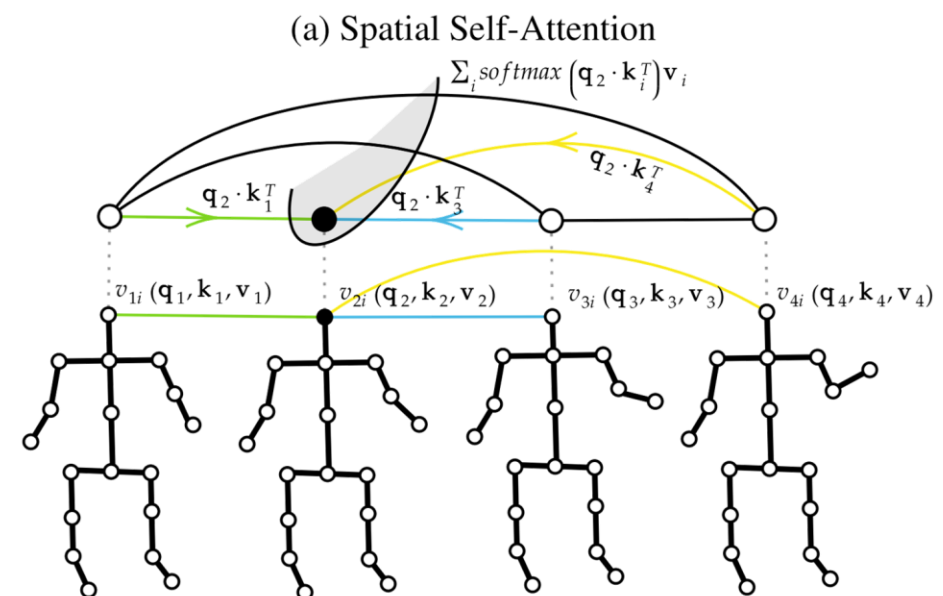
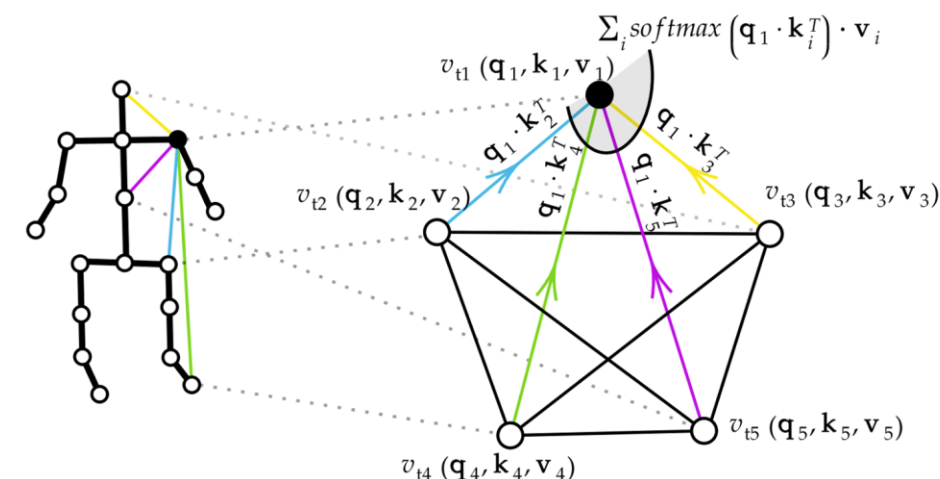
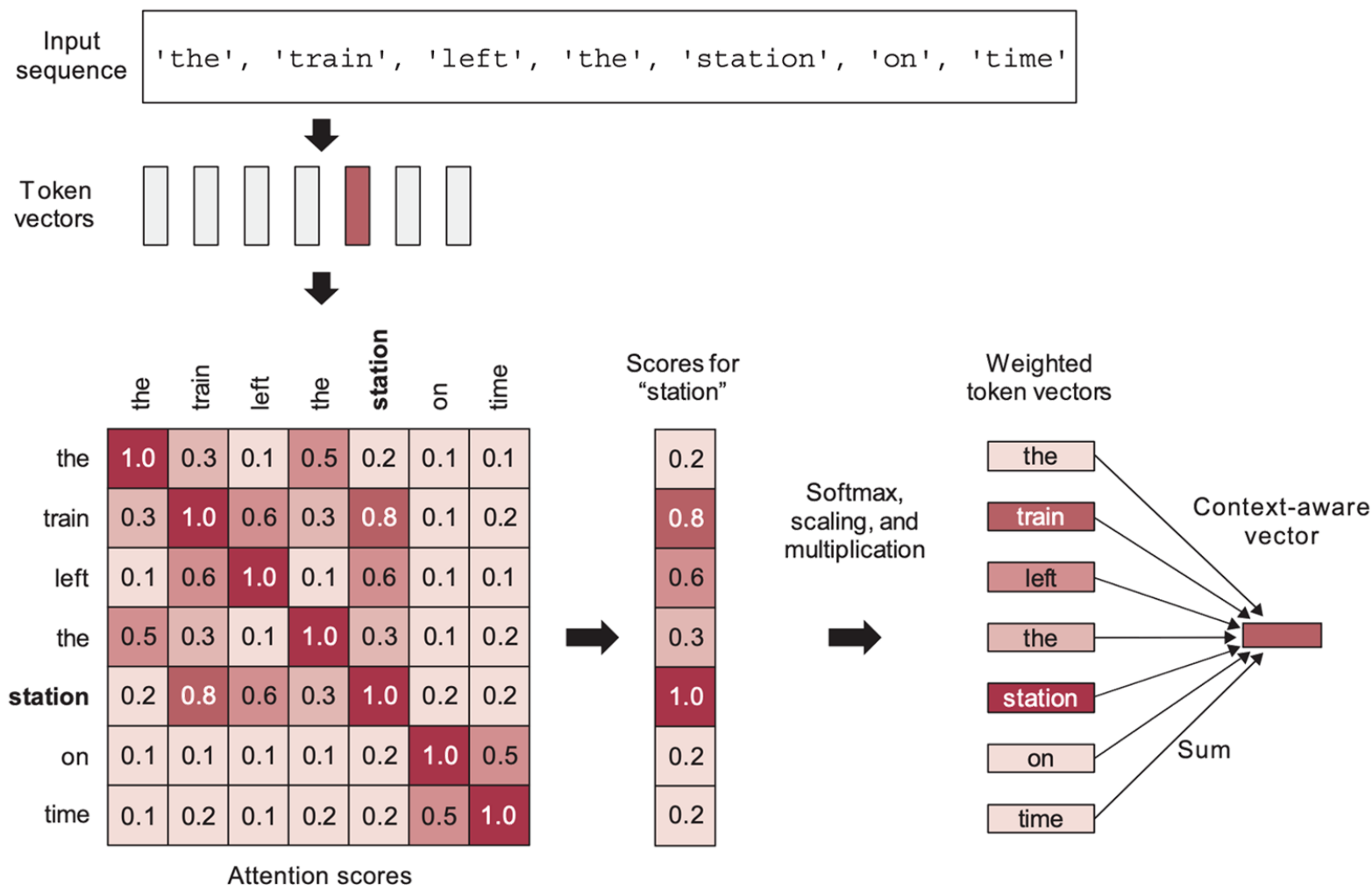
自発運動で生じる非ランダムな感覚運動状態遷移



➡発達に伴いランダム性が低下する
発達に伴う感覚運動パターンの増加



情報構造（関係性）は概念や知能、行動を形作る

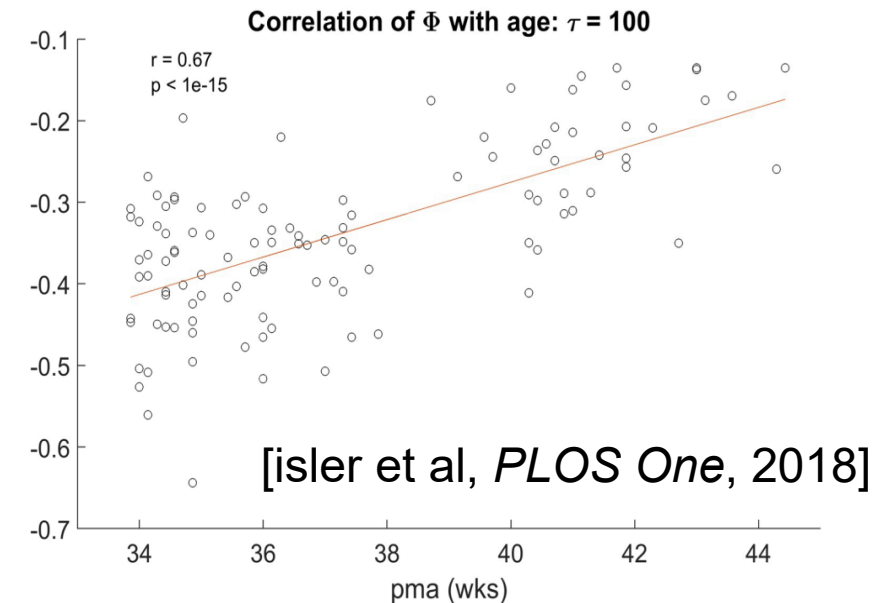
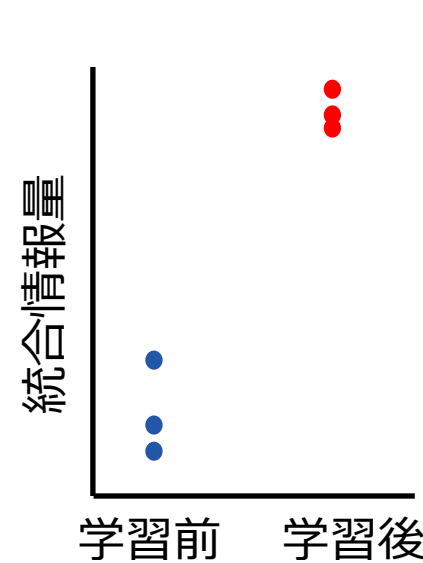
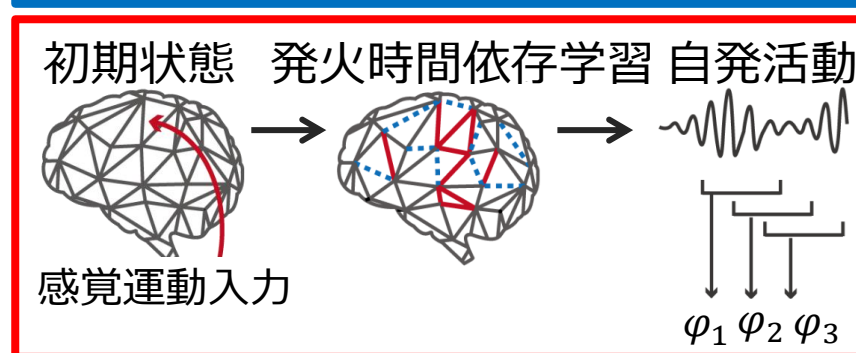
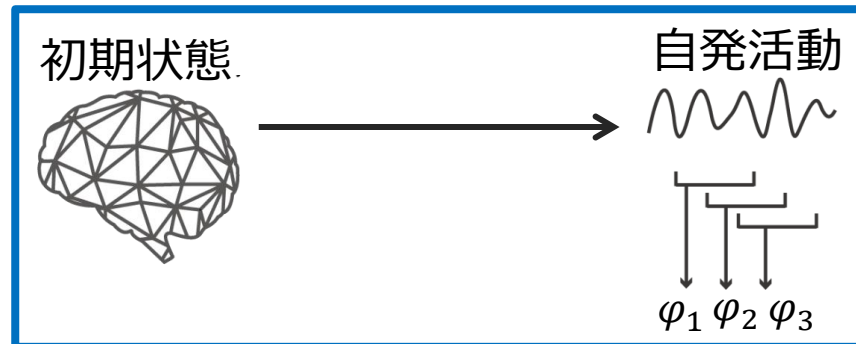
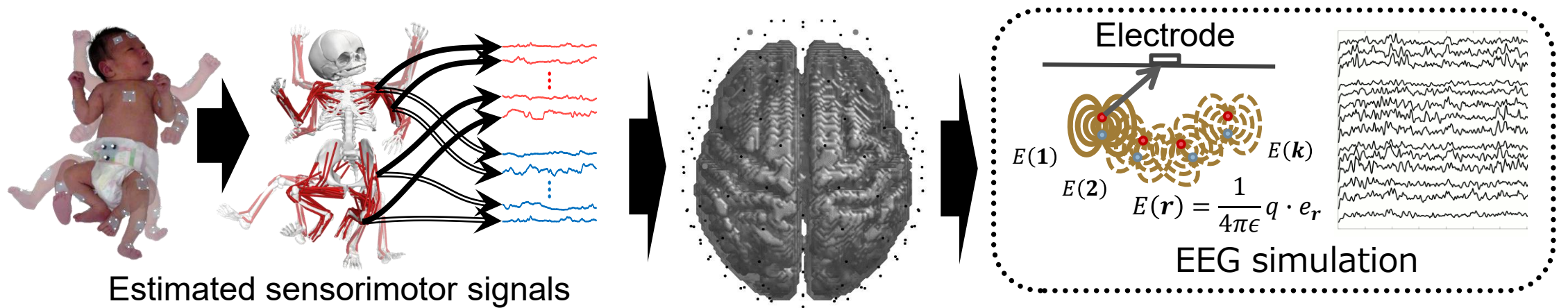


[Attention Is All You Need, *NIPS*, 2017]

[<https://fchollet.substack.com/p/how-i-think-about-llm-prompt-engineering>]

[Plizzari, Cannici, Matteucci, *CVIU*, 2021]

感覚運動情報構造が皮質の情報統合に与える影響



早産児の統合情報量の発達的变化
 ➡ 感覚運動情報の導入で説明可能?

後半のまとめ

感覚運動情報の構造化は行動獲得に寄与する
(最初期の自発運動の役割)

感覚運動情報の構造化は身体性のみでは説明不可
(感覚運動に関する探索行動や好奇心の重要性)

情報構造は単純な身体の感覚-運動から生まれるが、
行動生成や概念の理解、意識の創発まで繋がりを
(感覚運動情報構造が持つポテンシャル)

後半のまとめ

感覚運動情報の構造化は行動獲得に寄与する
(最初期の自発運動の役割)

感覚運動情報の構造化は身体性のみでは説明不可
(感覚運動に関する探索行動や好奇心の重要性)

情報構造は単純な身体の感覚-運動から生まれるが、
行動生成や概念の理解、意識の創発まで繋がりを
(感覚運動情報構造が持つポテンシャル)