

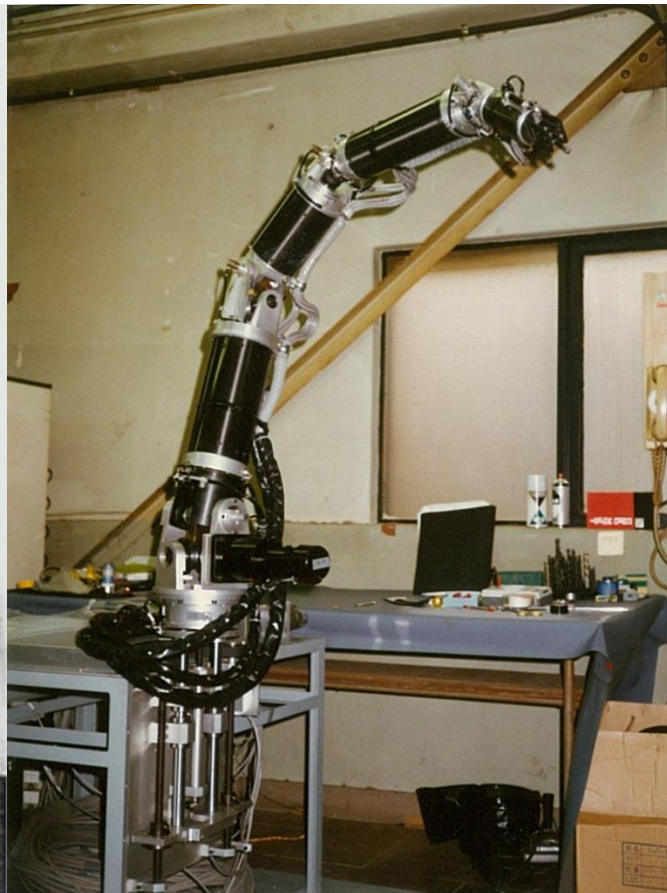
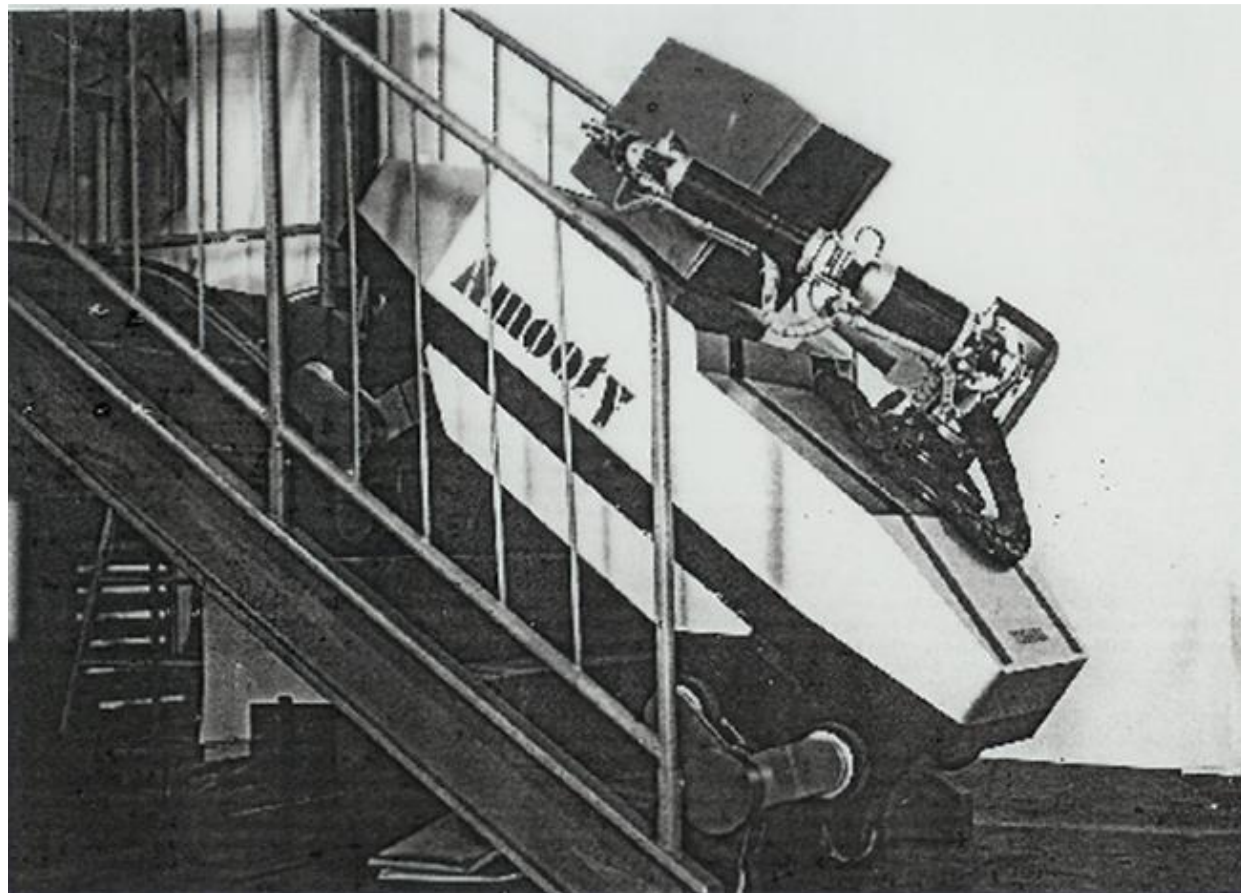
社会で必要とされる自律ロボットの 適応性・主体性について

東京大学 国際高等研究所 東京カレッジ
浅間 一

<http://www.robot.t.u-tokyo.ac.jp/asamalab/>
asama@robot.t.u-tokyo.ac.jp

A MOOTY(1980) --- A Maintenance Robot for Nuclear Power Plant

東京大学工学部精密機械工学科(新井, 三好, 小田原, 大園, 高野, 吉川) - 東芝



タスクの多様性・環境の無限定性



冗長性・動的構造計画

無限定環境における適応性(身体知能)は どうすれば実現できるのか

適応的に動作するシステムにおける
行動生成メカニズム？

適応性実現の手がかり

適応機能の設計論

自律分散化



自律分散システム

システムを構成する個々の要素に自律性を持たせ、
システムの機能の実現は要素の相互作用を通じて
達成するようなシステム

(日立製作所)

・自律分散システムとの対比

集中システム

階層システム

適応に関するシステム研究の歴史

自律分散システム(重点領域)

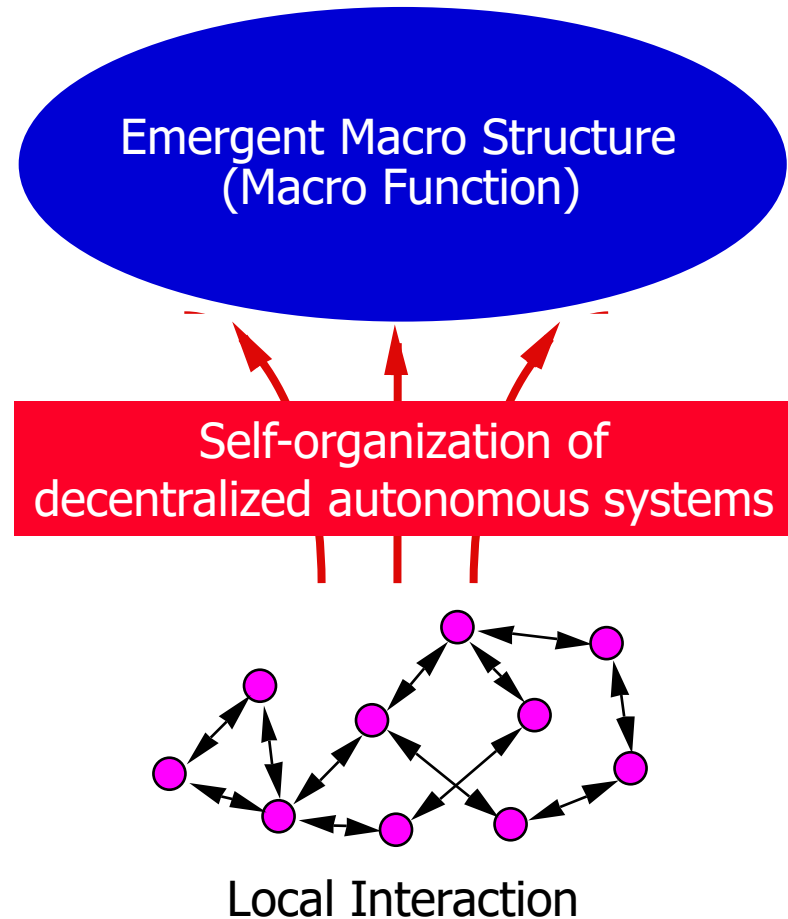
(領域代表: 伊藤正美(名大), 1990~1992年度)

自律分散システムの適応機能の分析・記述



適応的な機能を持つシステムには
自律分散的な構造があり
それは自己組織される

自律分散システムの自己組織化モデル



- ニューロン
- 細胞
- 個体

自律分散システム

- 集中と分散
 - 負荷分散・機能分散・空間分散
- 自己組織, 協調, 競争, エージェント, 創発

同質性と異質性

- Homogeneous (同質性)
- Heterogeneous (異質性)

同質性と異質性（多様性）

- 自然界における個は基本的にすべて異質
- 多様性（性質，属性，機能，役割）
- ただし，種などのように，共通な性質，属性を持つグループ内の個は同質ともいえる
- 同質性＝置き換え可能性

自律分散型ロボットシステム (1988-)

集中型から自律分散型へ

従来のロボット工学のアプローチ

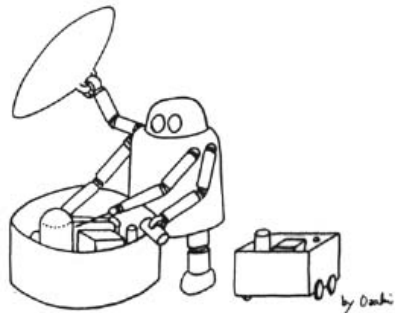
必要なすべての機能を1台のロボットに搭載

ロボット個体の知能化／高機能化

知能：集中型アーキテクチャ

典型的手本：人間

問題点：システムの複雑化・巨大化
信頼性の低下
非効率的



新しいロボット工学のアプローチ

必要な機能を多数のロボットに分散化し、状況に応じて協調させる

ロボット群としての知能化
システム全体の多機能化

知能：分散型アーキテクチャ

典型的手本：社会性昆虫（蟻）

特長：小型化・開発容易
耐故障性
並列処理による効率化



ツムギアリにみる自律分散系

(生息地: 中国南部, フィリピン, インドシナ半島, マレーシア, インド)



自己組織



大型対象物操作, 並列動作, 役割分担(引っ張る, 紡ぐ, 戦う, 子育て, etc.)

自律分散型ロボットシステムの特徴

利点

- 多機能性
- 頑健性・信頼性
- 柔軟性・適合性
- 保全性・拡張性
- 効率・生産性
- 適用性

欠点

- 最適性
- 整合性
- 同期

自律分散型ロボットシステムの課題

- システムの設計

システム全体の機能をいかに複数のエージェントに分散させるか

- システムの管理

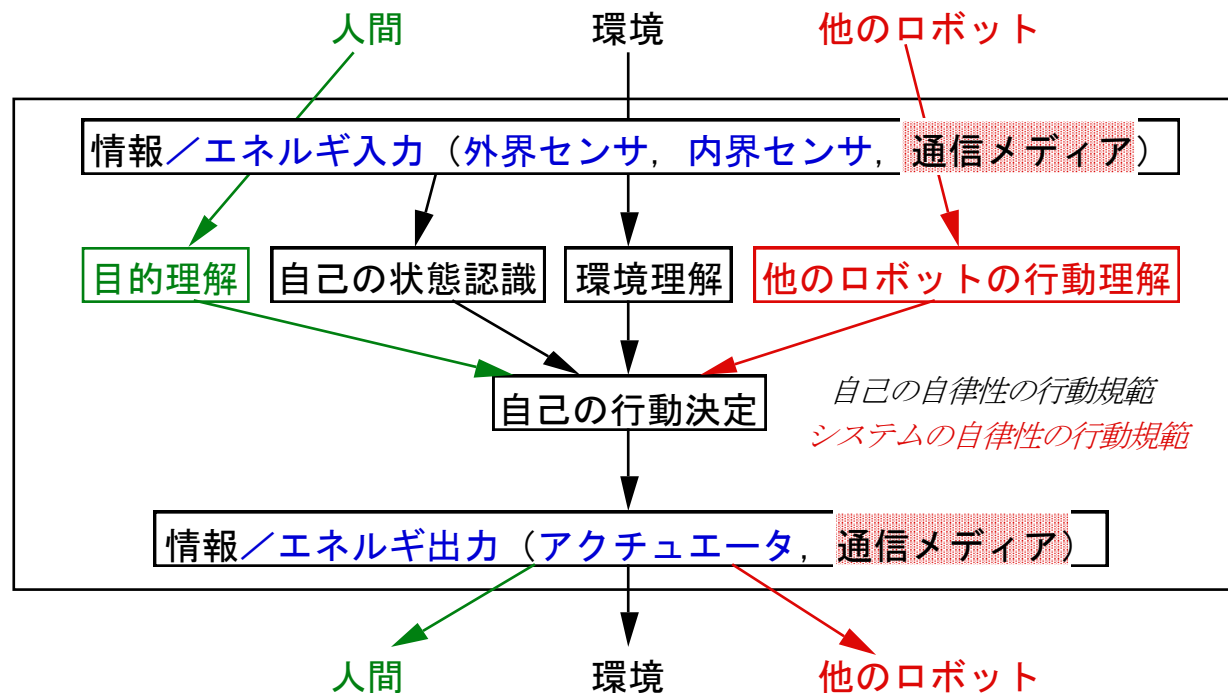
動的に変化する状況をいかに管理するか

- システムの制御

複数のエージェントの協調的行動をいかに実現するか

システム設計 = 個の行動規範とアルゴリズムの設計

マルチロボット環境でのロボットの自律性



協調*とは

*広辞苑第五版, 岩波書店

- 利害の対立する者同士がおだやかに相互間の問題を解決しようとする事
- 性格や意見の異なった者同士が互いにゆずりあって調和をはかる事
- [生]生体を構成する緒部分が相互に調整を保った活動をする事.



- お互いに邪魔しない協調 ← 個別行動
- お互いに助け合う協調 ← 協力行動

荷片づけ作業

作業目標

移動ロボットによってすべての荷を部屋の壁際まで押し移動し片付ける

前提条件

荷の個数，移動ロボットの台数：*複数*

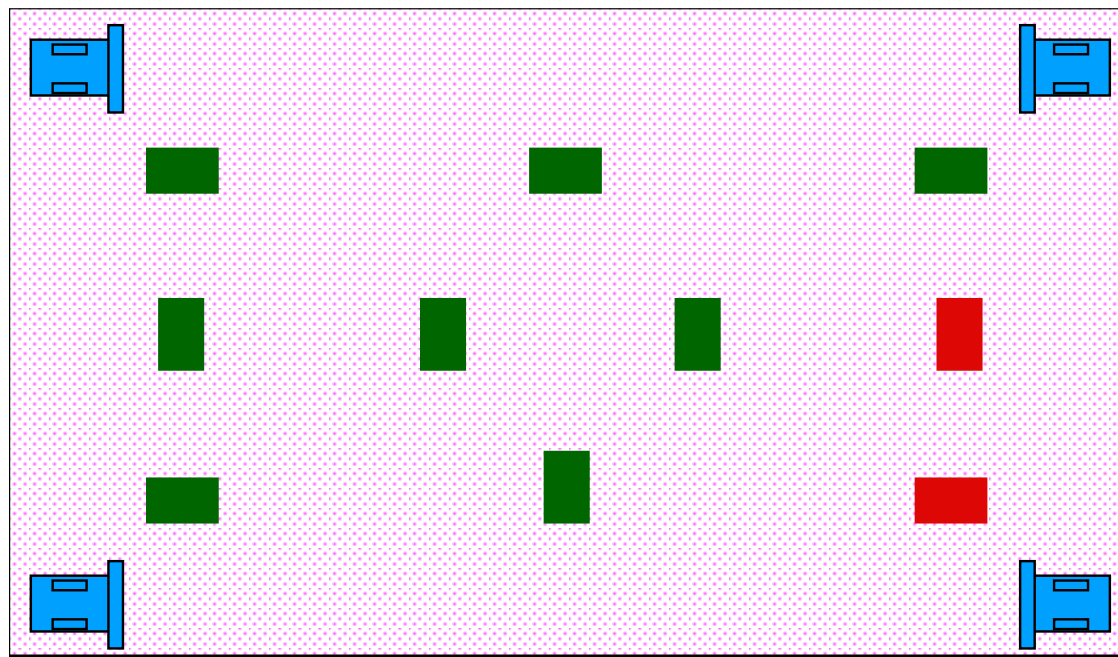
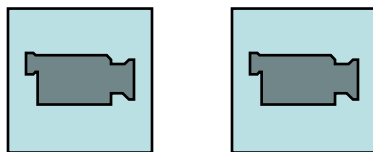
荷の種類

軽い荷 (1台の移動ロボット
で処理可能)

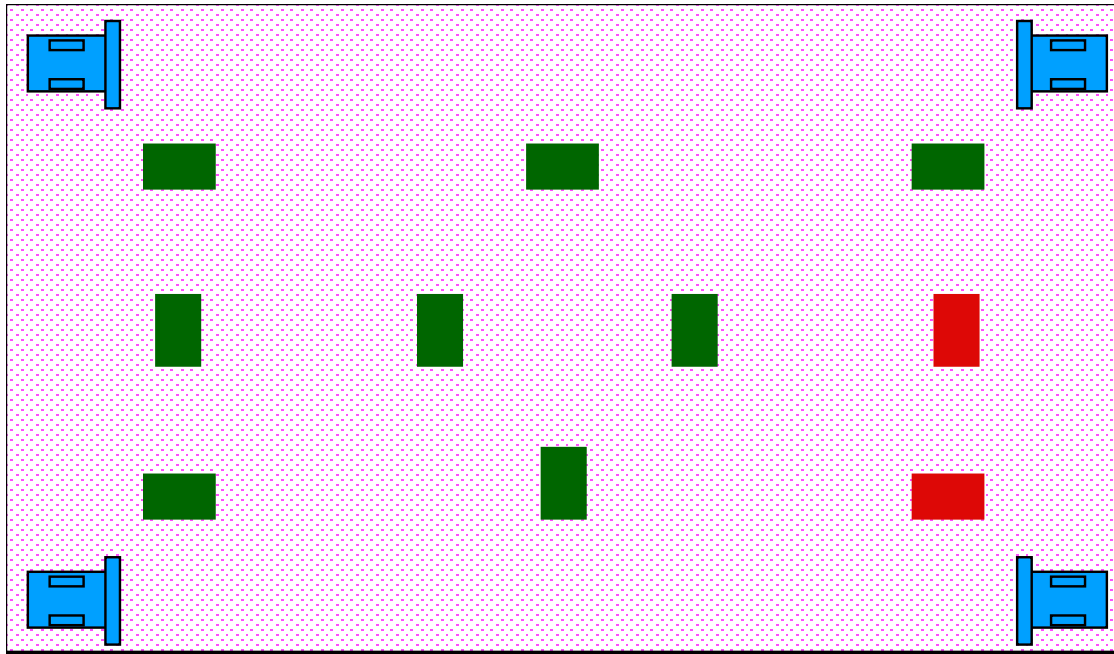
重い荷 (複数台移動ロボット
の協調が必要)

既知情報：*荷の位置，形状*

未知情報：*荷の重さ*



荷片づけ作業に必要な機能



- 作業状況の管理
- 作業分担の決定
- チームの組織化
- 環境情報の管理
- 動作計画
- 相互衝突回避
- 協調制御（同期）

- 役割分担の決定
- 故障時のバックアップ

ロボットの行動モード

個別行動

軽い荷を処理するのに、単独で並列的に作業を行っている状態

協力行動1(依頼)

重い荷を処理するのに、他の移動ロボットに協力を依頼して作業を行う状態

協力行動2(支援)

重い荷を処理するのに、他の移動ロボットに協力し、支援しながら作業を行う状態

待機

荷の処理を行わずに待機している状態

ロボットの行動形態

個別行動

複数のロボットがそれぞれ別々の目的を持ち、
並列的に行動する形態



邪魔しない協調が必要

協力行動

複数のロボットが共通の目的を持ち、
協力しあって行動する形態

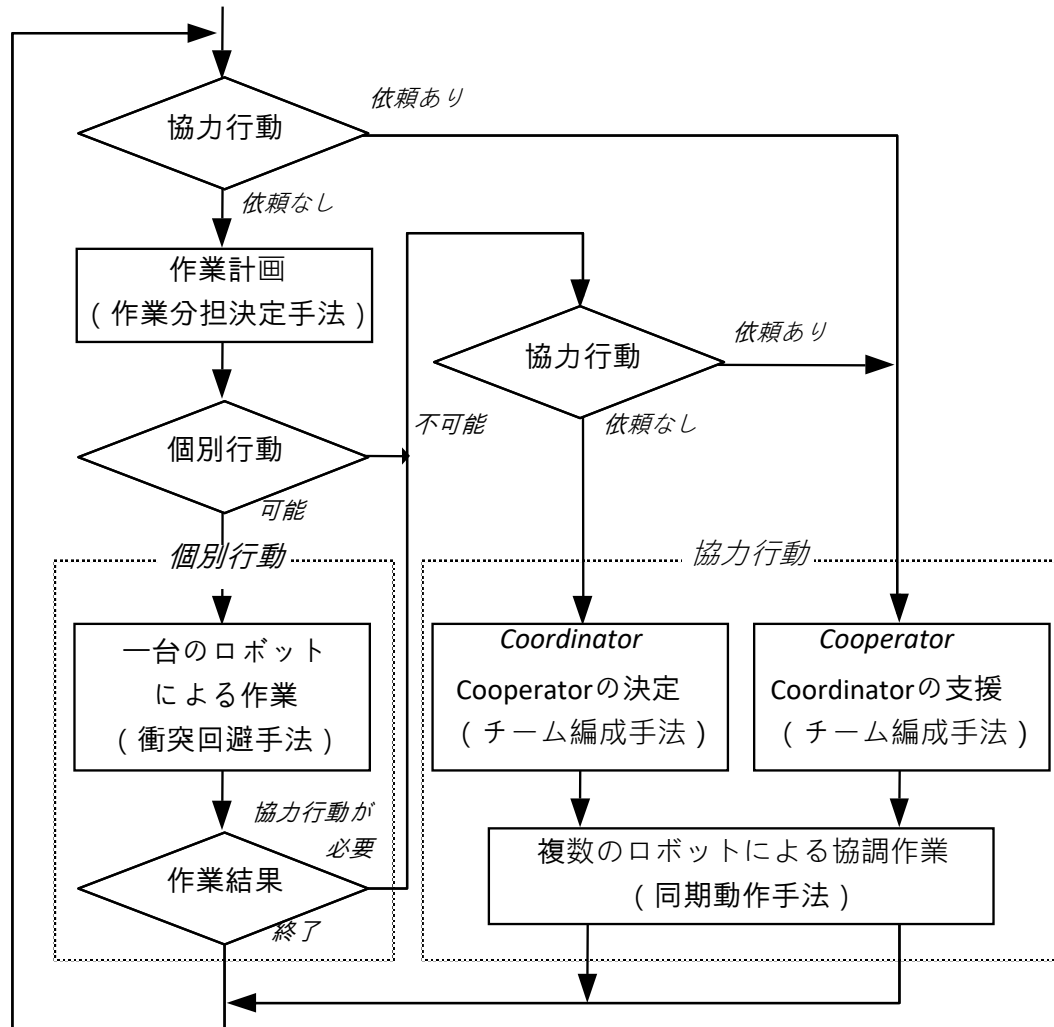


助け合う協調が必要

(役割分担)

協力を依頼するロボット と 依頼を受け支援するロボット
コーディネータ と 協調者

協調のアルゴリズム

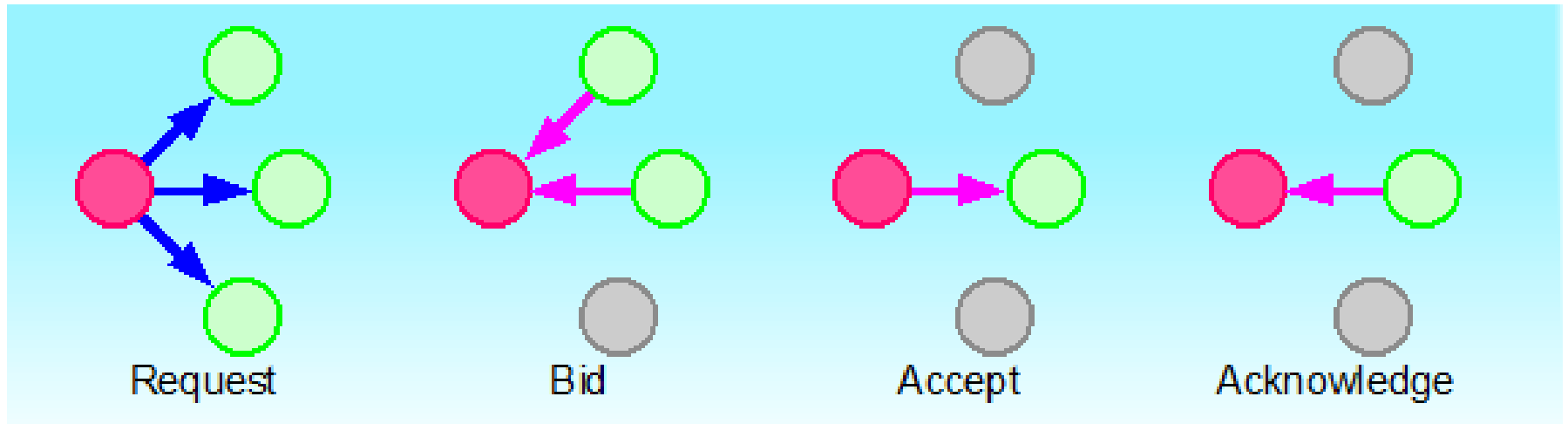


Contract-net protocol

公募
(アナウンス)

入札

落札



実作業実験



重い荷物なし

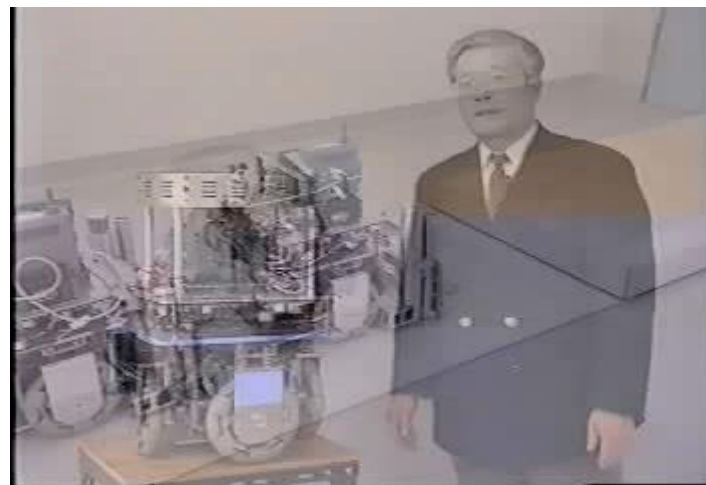


重い荷物あり

自律分散型ロボットシステム



作業分担決定と協調動作



協調段差乗り越え



相互衝突回避



電子フェロモンによる情報共有

群システムにおけるコミュニケーション

コミュニケーションが成り立つ条件

- 共通のプロトコルが存在すること(先天的・後天的)
単なる信号の授受ではない



- 意図の伝達(感情, 知識, ジェスチャ, 言語)
行動と知覚によって可能

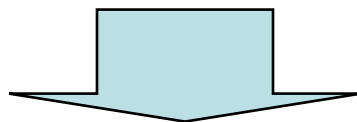


c.f. 情報理論, ノンバーバルコミュニケーション, 言語学

コミュニケーションの創発

課題:

ロボット間協調 → 情報の授受(意図, 意志の伝達を含む)機能必要
どのような状況でどのように行動(通信, 制御)し,
競合を回避すべきかの事前プログラムは不可能



- コミュニケーションも含めた行動学習
- 意図の伝達メカニズムはいかに獲得され得るか
- 意図伝達の枠組みを用意し, 学習によりそれをどのように使うようになるかを見る
 - (1) プロトコルを与え, 使い方を学習
 - (2) プロトコルの獲得

行動(ケース1)

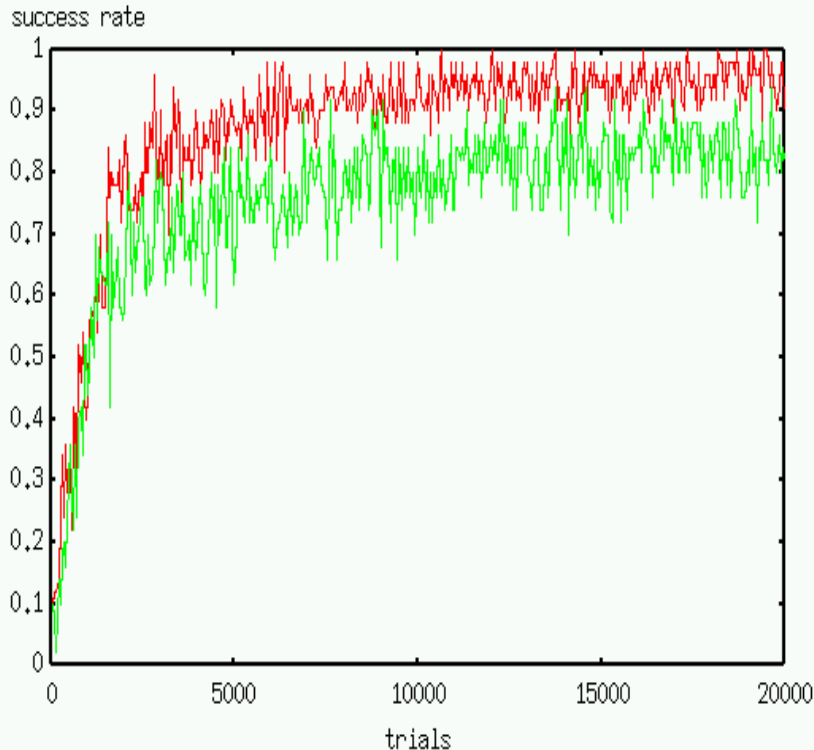
行動(9)

1. 直進移動
2. +45度軌道変更
3. - 45度軌道変更
4. 減速(-0.2[cm/sec])
5. 加速(+0.2[cm/sec])
6. 発話
 - +45度方向に軌道変更し, 減速
 - +45度方向に軌道変更し, 加速
 - - 45度方向に軌道変更し, 減速
 - - 45度方向に軌道変更し, 加速

ロボット間の共通プロトコルとして発話

結果(ケース1)

ゴール到達率 : 100試行中の成功回数



(—: 発話有り, —: 発話なし)

ロボット間距離による行動選択率

• 60cm未満

発話 **57.98%**

• 60cm以上120cm未満

発話 **31.04%**

• 120cm以上

発話 **33.83%**

➔ ロボット間の距離が
短い際に積極的に発話

行動と状態空間(ケース2)

行動(9)

1. 直進移動
2. +45度軌道変更
3. -45度軌道変更
4. 減速(-0.2[cm/sec])
5. 加速(+0.2[cm/sec])
6. 発話

- A
- B
- C
- D

内容変更

状態空間

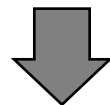
ケース1と同様

×

相手からの発話(5)
A, B, C, D, 無

状態数
: 97200

- ・意図伝達的手段を与える
(特定の為, 記号化)
- ・相手からの発話を状態として持つ

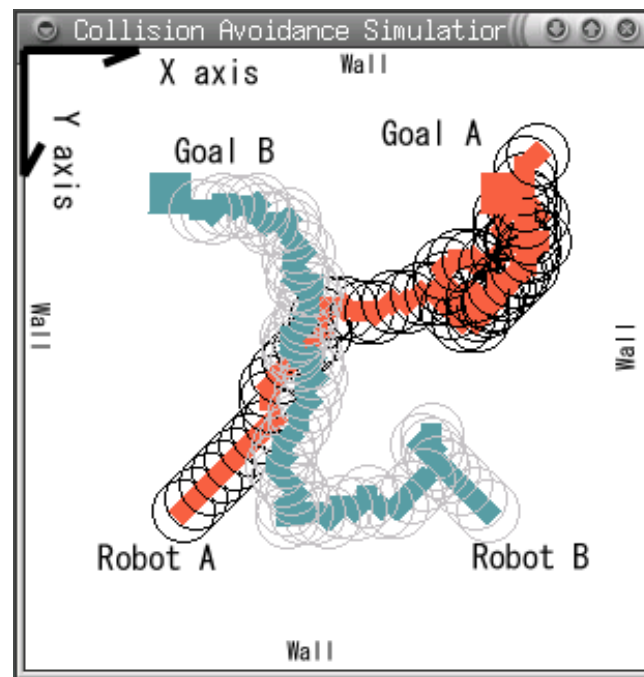
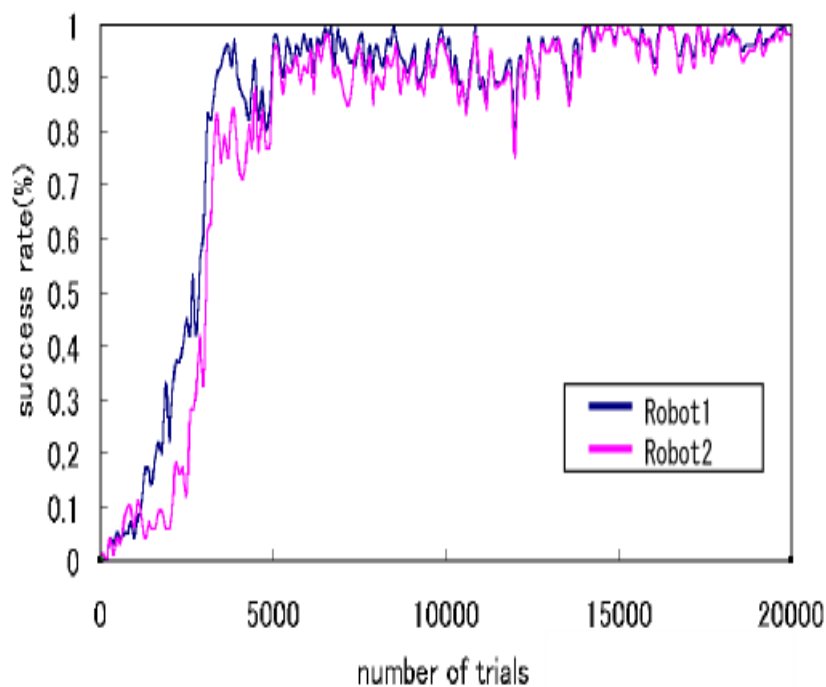


20000試行学習

共通プロトコルを獲得可能か観察

結果(ケース2)

ゴール到達率
: 100試行ごとの成功回数



移動軌跡

シミュレーションによる通信学習結果

プロトコル定義、一方的学習

- 通信がある場合のほうが到達率が高い
- 距離が近距離の方が、通信を積極的に使う(有効)

■ 行動としての通信による意図の伝達(各自行動)の有効性

プロトコル未定義、双方学習

- 受信した発話ごとの行動選択率が同じ(プロトコル獲得)

■ プロトコル獲得の可能性

コミュニケーションの意義

- 個体と群の本質的相違／制御という観点から考える

従来のシステムの考え方

- 入力(知覚の手段:センサ) 環境の状態
- 出力(動作の手段:アクチュエータ) 自己の身体

➡ 自己制約

本研究での考え方(コミュニケーションを陽に扱う)

- 入力:環境の状態+他のロボットの意図
- 出力:自己および他の身体

➡ 自由度の拡大・オープン化

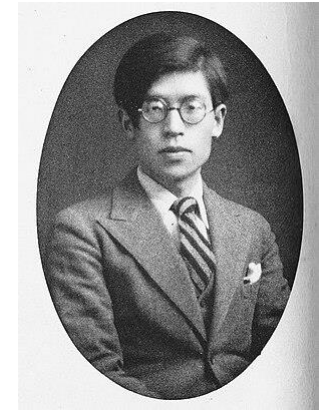
身体を動かすのみならず他者への発話(送信)も行動と考える

拡自行動

自由度の拡張, 自分の拡張

中島 敦

「悟浄歎異」



所与を必然と捉え、その必然を完全と捉え、
完全を自由と見なす(必然と自由の等置)

- チームの現状を必然と捉え、(現時点で欠けているものがあることを認めただうえで)現状は(これから)完全(になりうる)と理解し、それ(チームを完全とするために、欠けているもの)を自由に埋めることができる(堀宗朗先生)
- 適応性・主体性という観点での解釈(浅間)
 - 所与: Affordance
 - 必然: 境界条件の設定(仮設), 非オープン化
 - 自由: 脱抑制, 自分の内部の自由度の発掘

自由からの逃走／エーリッヒ・フロム

Escape from Freedom / Erich Fromm

- ファシズム批判、デモクラシー批判
- 自由の獲得と同様な熱心さで自由を捨てる
- 自由の2面性
- 古い権威や束縛から解放される「自由」の拡大は、個人に独立と自律をもたらしたが、同時に「孤独と無力」の感情をもたらす
- 「孤独と無力」がもたらす重荷
- 「匿名の権威」の支配：世論・常識
- 他人の期待に一致するように注意を払う。期待に外れることを非常に恐れる
- 「自己の喪失」への逃避



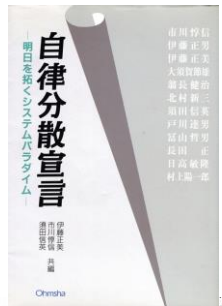
Erich Fromm
(1900-1980)

適応に関するシステム研究の歴史

自律分散システム(重点領域)

(領域代表: 伊藤正美(名大), 1990 ~ 1992年度)

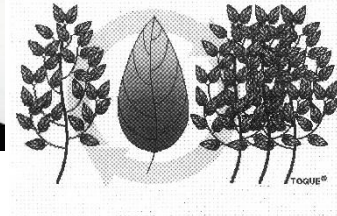
自律分散システムの適応機能の分析・記述



創発的機能形成のシステム理論(重点領域)

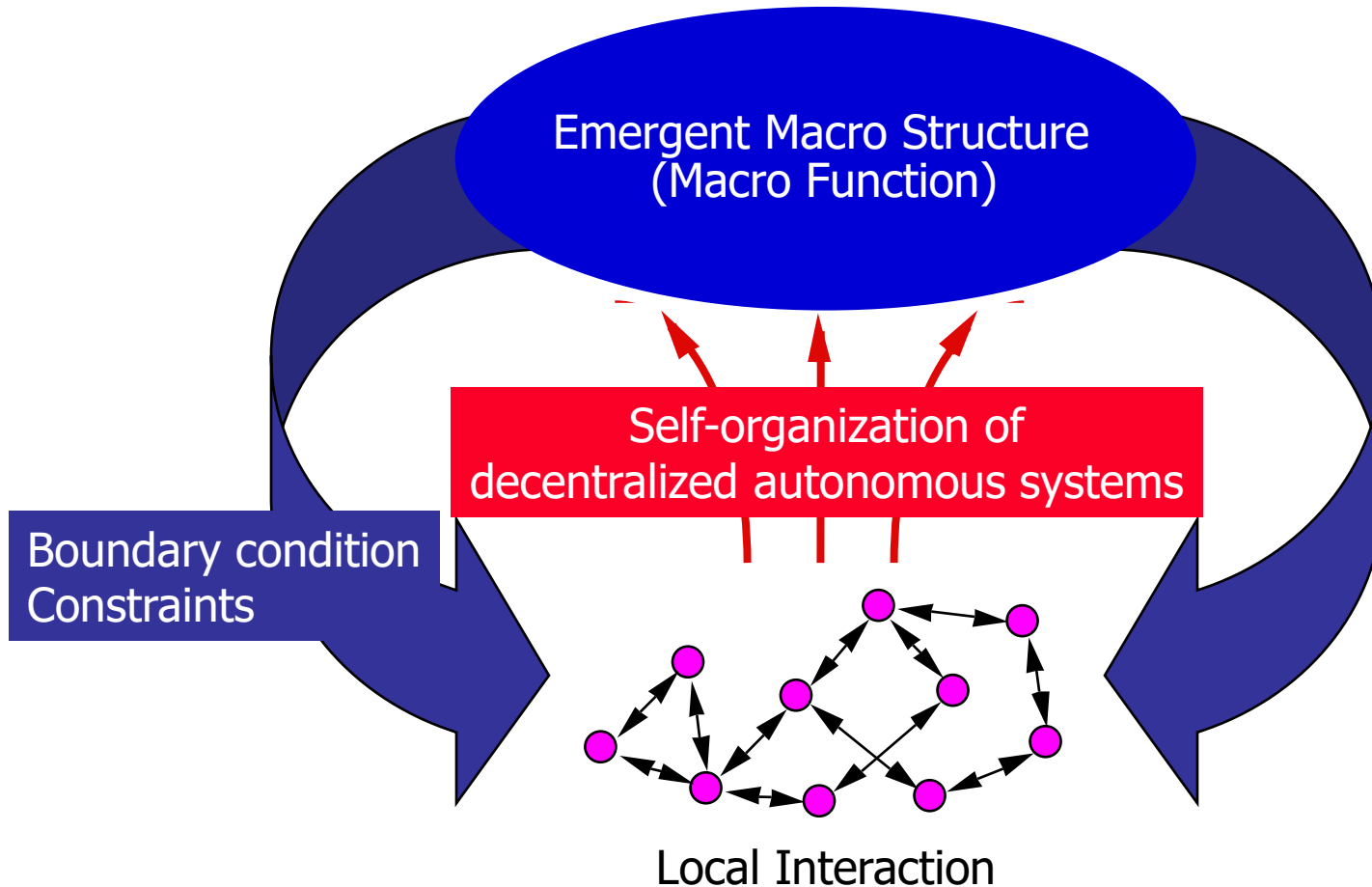
(領域代表: 北村新三(神戸大), 1995 ~ 1997年度)

適応的設計手法



適応的な機能は
大局から局所へのフィードバックにより
自律分散的に創発される

創発システムのモデル



ロボットの知能化

+

環境(空間)の構造化・情報化・知能化

空間知能化（知的データキャリア） （1995-）

蟻のコミュニケーション フェロモン



The African weaver ant establishes vast territories in tree canopies. In the left foreground a worker threatens a member of a rival colony. Behind her, nestmates pin another enemy down, while to their right a worker runs along a branch to the nest, laying a chemical trail from the tip of her abdomen that will lead other nestmates into the fray. In the lower right still other colony members subdue a large ponerine hunting ant. (Painting by John D. Dawson, courtesy of the National Geographic Society.)

E. O. Wilson: *Journey to the Ants*, The Belknap Press, 1994

知的データキャリア (IDC) の概念

環境に知的データキャリア (IDC) を設置し、
近づくロボットがその場において有用な情報を獲得できる

ロボットは IDC を好きな場所へ設置でき、
情報を残す (更新する) こともできる



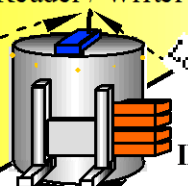
ロボットどうしの
標識・伝言板



通行規制・方向指示
他のロボット への伝言

進入禁止!

Reader / Writer



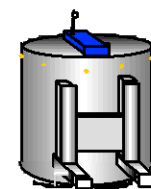
Robot

Local Channel

荷物の属性
搬送目的地
搬送時の注意



Object



IDCを用いた空間知能化と自律分散型ロボット応用の概念



全方向移動ロボットによるIDCの設置・回収



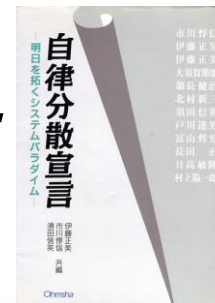
電子フェロモンによる情報共有



適応に関するシステム研究の歴史

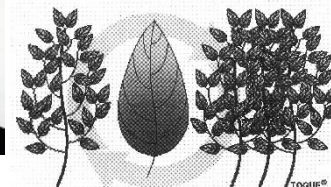
自律分散システム(重点領域)

(領域代表: 伊藤正美(名大), 1990 ~ 1992年度)
自律分散システムの適応機能の分析・記述



創発的機能形成のシステム理論(重点領域)

(領域代表: 北村新三(神戸大), 1995 ~ 1997年度)
適応的設計手法



身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現

— 移動知の構成論的理解 — (特定領域)

(領域代表: 浅間 一(東大), 2005 ~ 2009年度)
適応的運動／行動の発現メカニズムの解明



- 適応的システムのメカニズムの理解
 - 生物の適応性(身体性+脳)
 - 知覚と運動の相互連関
 - バランスの力学

本領域の目指すもの



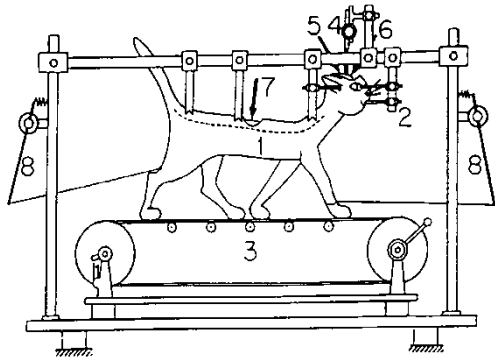
移動知



本領域のアプローチ

生物学

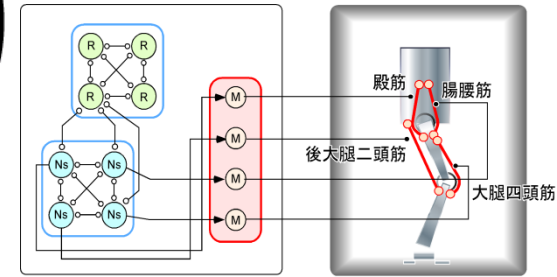
神経生理学などの
知見・仮説



新たな仮説

工学

動的モデリング
メカトロニクス技術



適応的システムの
設計論

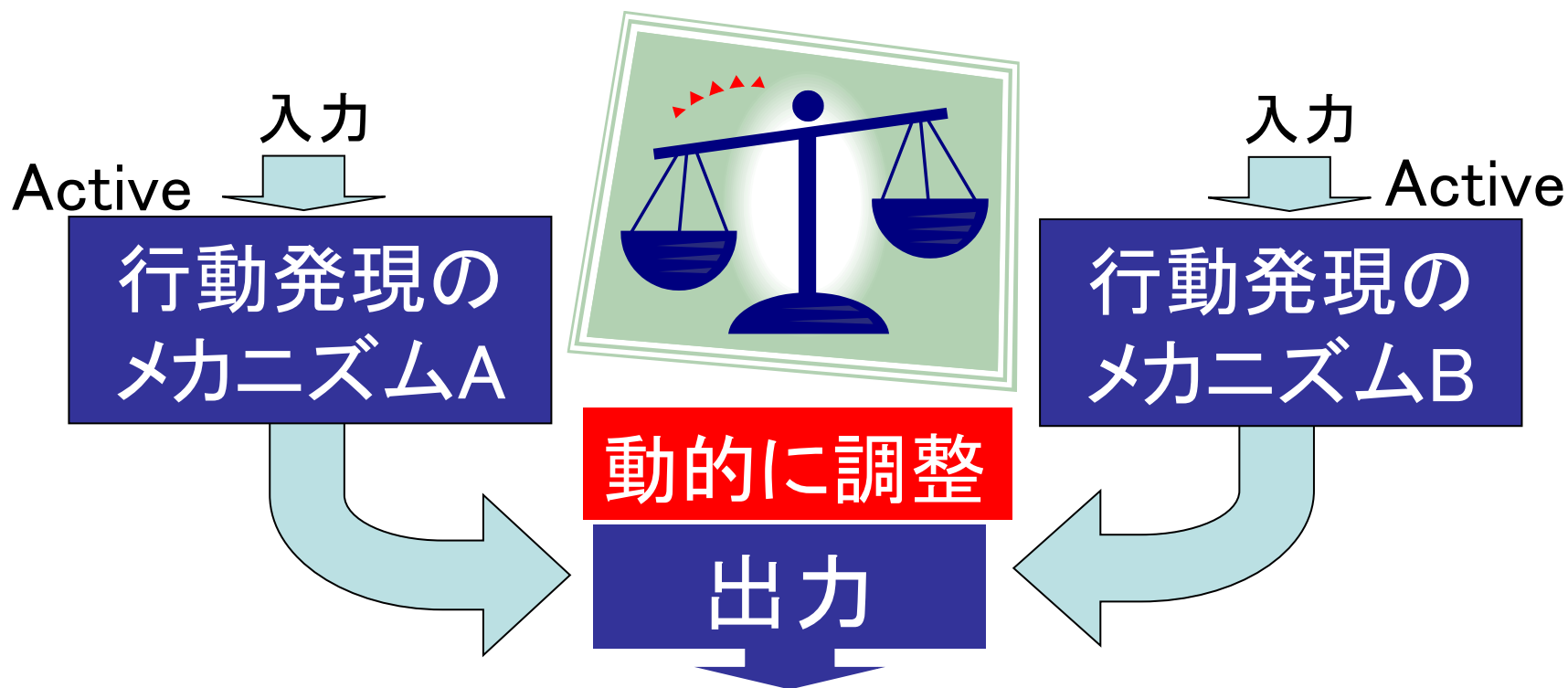


生体システムモデル

生工融合による構成論的アプローチ

BMハイブリッドシステム シミュレータ ロボット

バランスの力学の概念



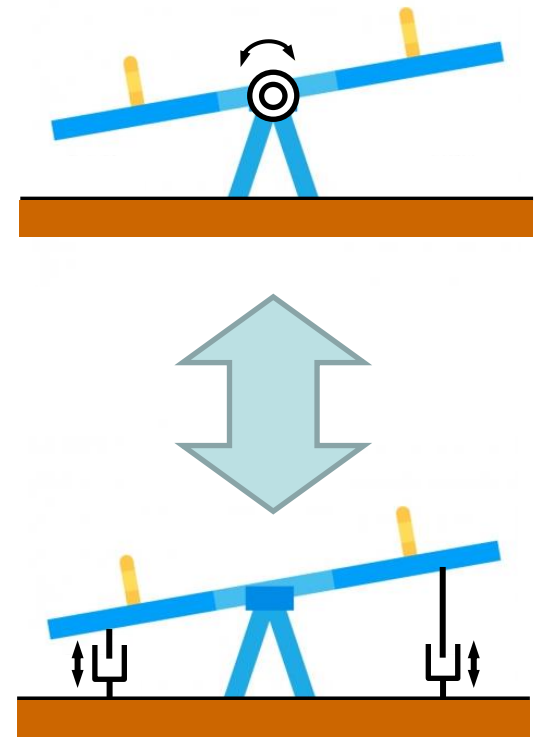
バランスの力学

二つの力学のバランス(双対性・トレードオフ \Leftrightarrow 冗長性, 二元性一原論)

- 効率とリスク回避
- 応答と安定性
- 位置(速度)制御と力制御
- 屈筋と伸筋
- 神経回路網の興奮性と抑制性
- 競争と協調
- 最適化と探索(自己組織化)
- 身体と制御
- FeedbackとFeedforward

バランスの力学の数理の必要性

- 平衡論?



自他帰属

身体意識

運動主体感

Sense of Agency (SoA)

自己の身体運動の主体が自分であるという感覚

身体保有(保持)感

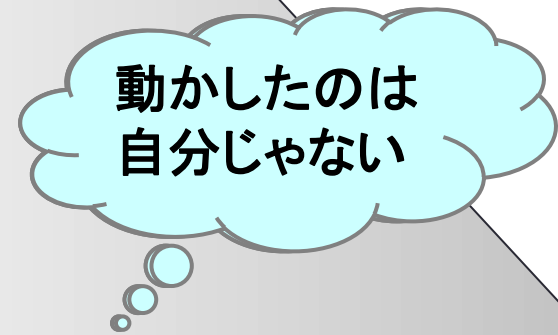
Sense of (Body) Ownership (SoO)

自己の身体が自分のものだという感覚

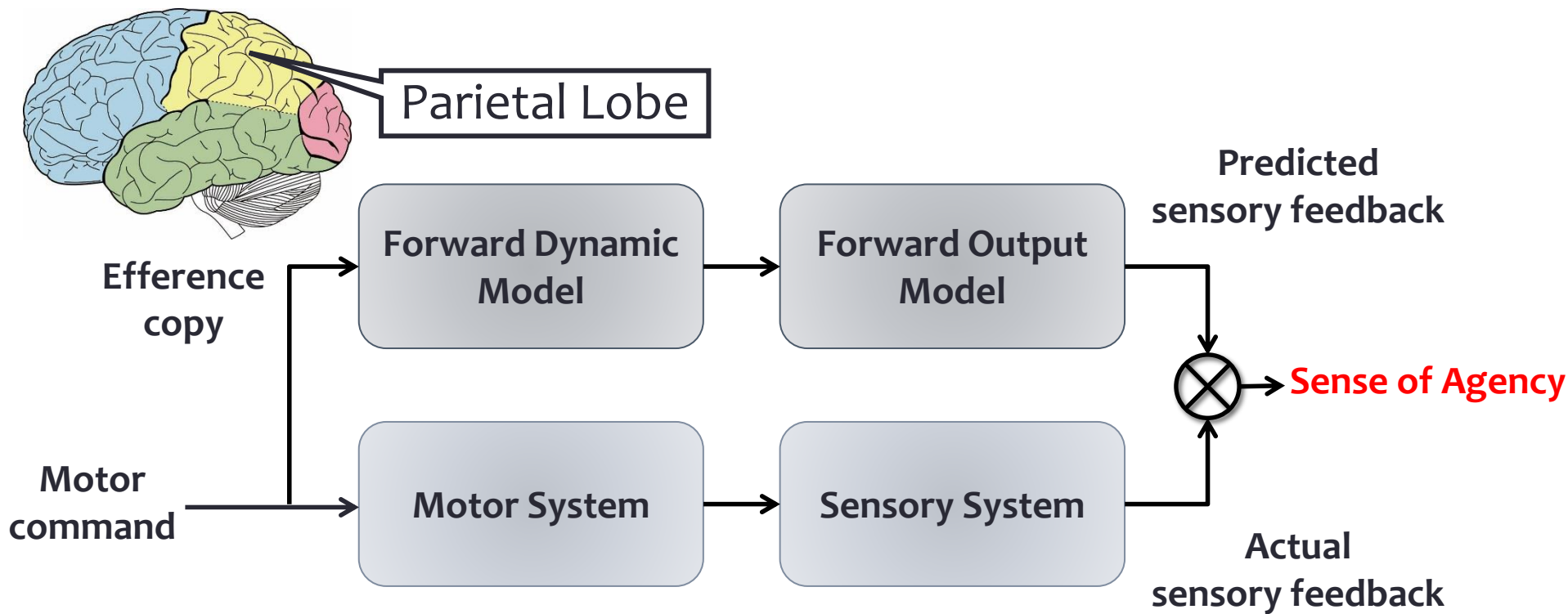
運動主体感 (SoA: Sense of Agency)

- 自己の身体運動の主体が自分であるという感覚
 - 脳内で生起
 - 主体の能動的運動に関連

[Farrer 2002]



コンパレータ(フォワード)・モデル

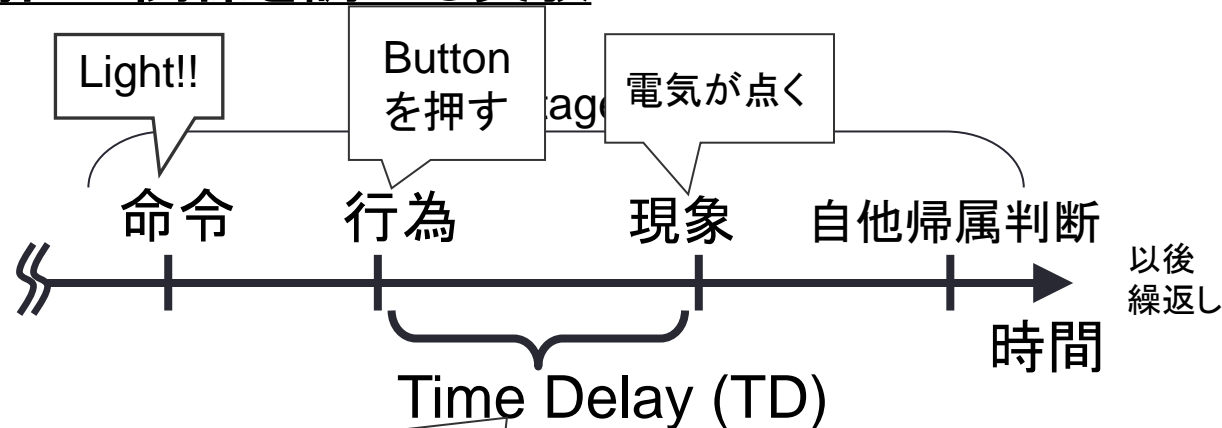
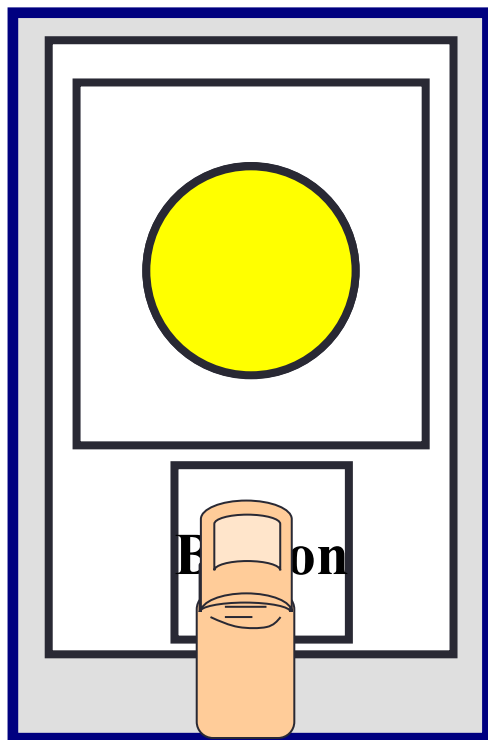


(Blakemore, 2003)

Difference is small: Motion is attributed to “self”
Difference is large: Motion is attributed to “others”

実験方法

時間遅れと自他帰属性の関係を調べる実験



- ・0~400[ms]まで40[ms]間隔で11段階
- ・各TDは4回ずつランダムに登場(4 × 11 = 44stages)

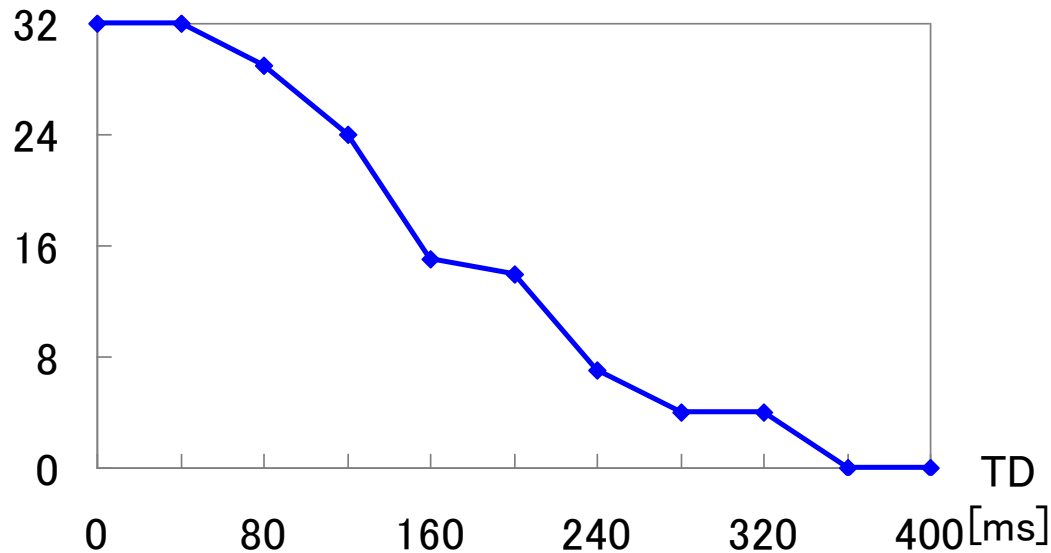
自他帰属の判断:

- 自分が光を点けたと感じたか
- 自分で光を点けた感覚がないか

実験結果

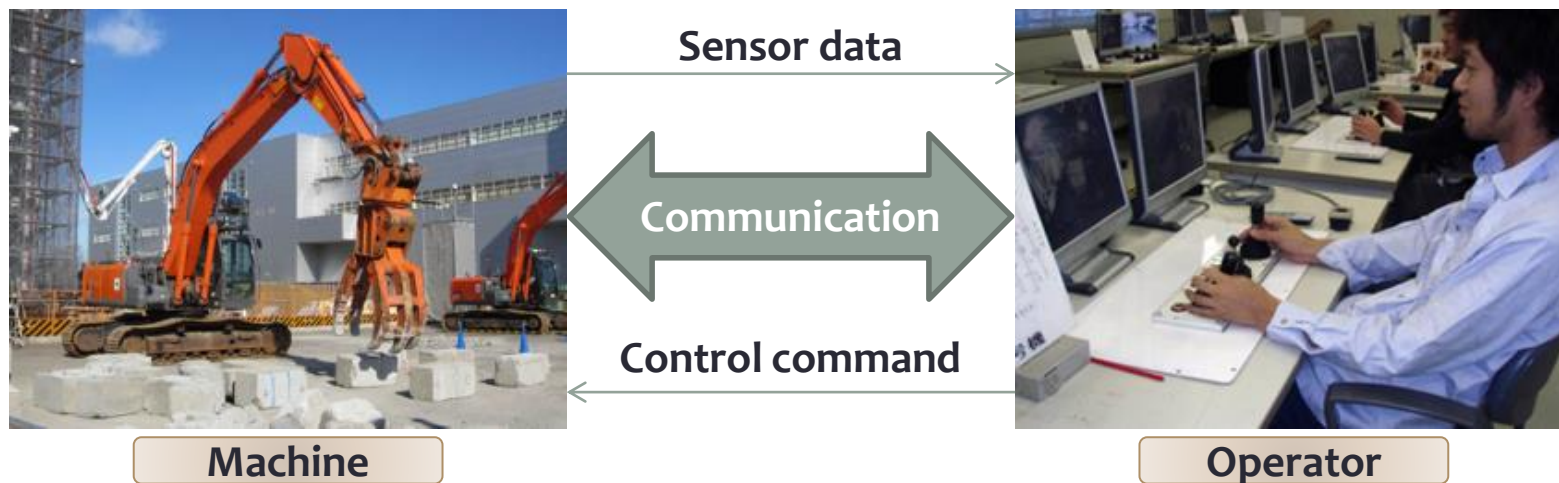
自己帰属
回数[回]

被験者8名合計



- ・TDが大きくなるほど自己帰属回数は下がる
- ・0から400[ms]の間でロジスティックな形(逆S字型)になる

遠隔操作における時間遅れ



適応に関するシステム研究の歴史

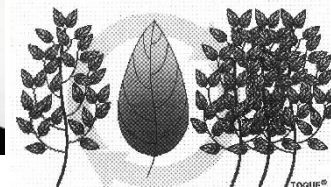
自律分散システム(重点領域)

(領域代表: 伊藤正美(名大), 1990 ~ 1992年度)
自律分散システムの適応機能の分析・記述



創発的機能形成のシステム理論(重点領域)

(領域代表: 北村新三(神戸大), 1995 ~ 1997年度)
適応的設計手法



身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現

— 移動知の構成論的理解 — (特定領域)

(領域代表: 浅間 一(東大), 2005 ~ 2009年度)
適応的運動／行動の発現メカニズムの解明

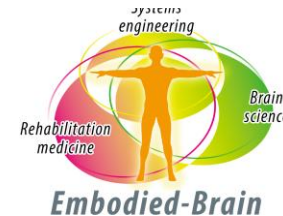


脳内身体表現の変容機構の理解と制御

(身体性システム)(新学術領域)

(領域代表: 太田 順(東大), 2014 ~ 2018年度)

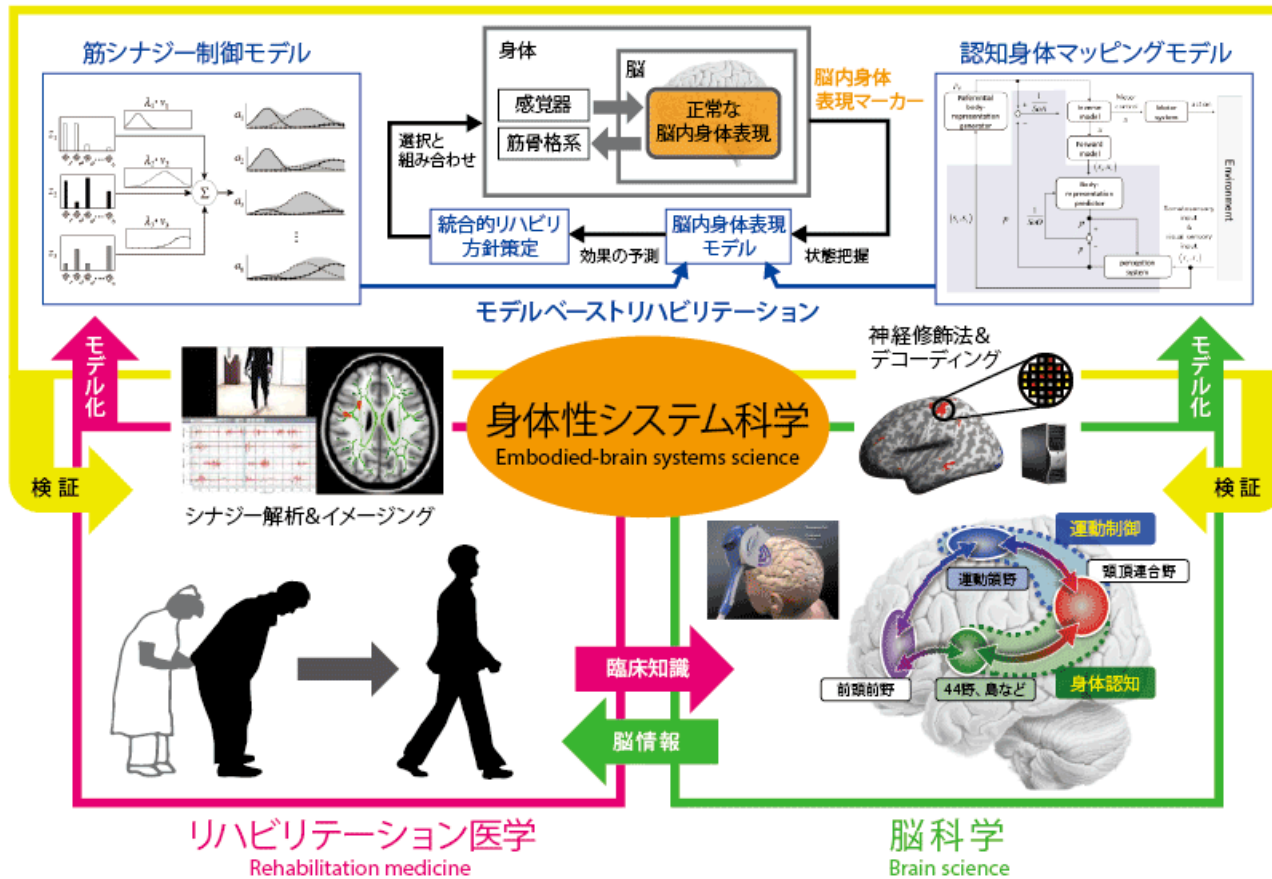
脳内身体表現／スローダイナミクス／リハビリり応用



脳内身体表現, スローダイナミクス,
身体意識(運動主体感・身体保有感)

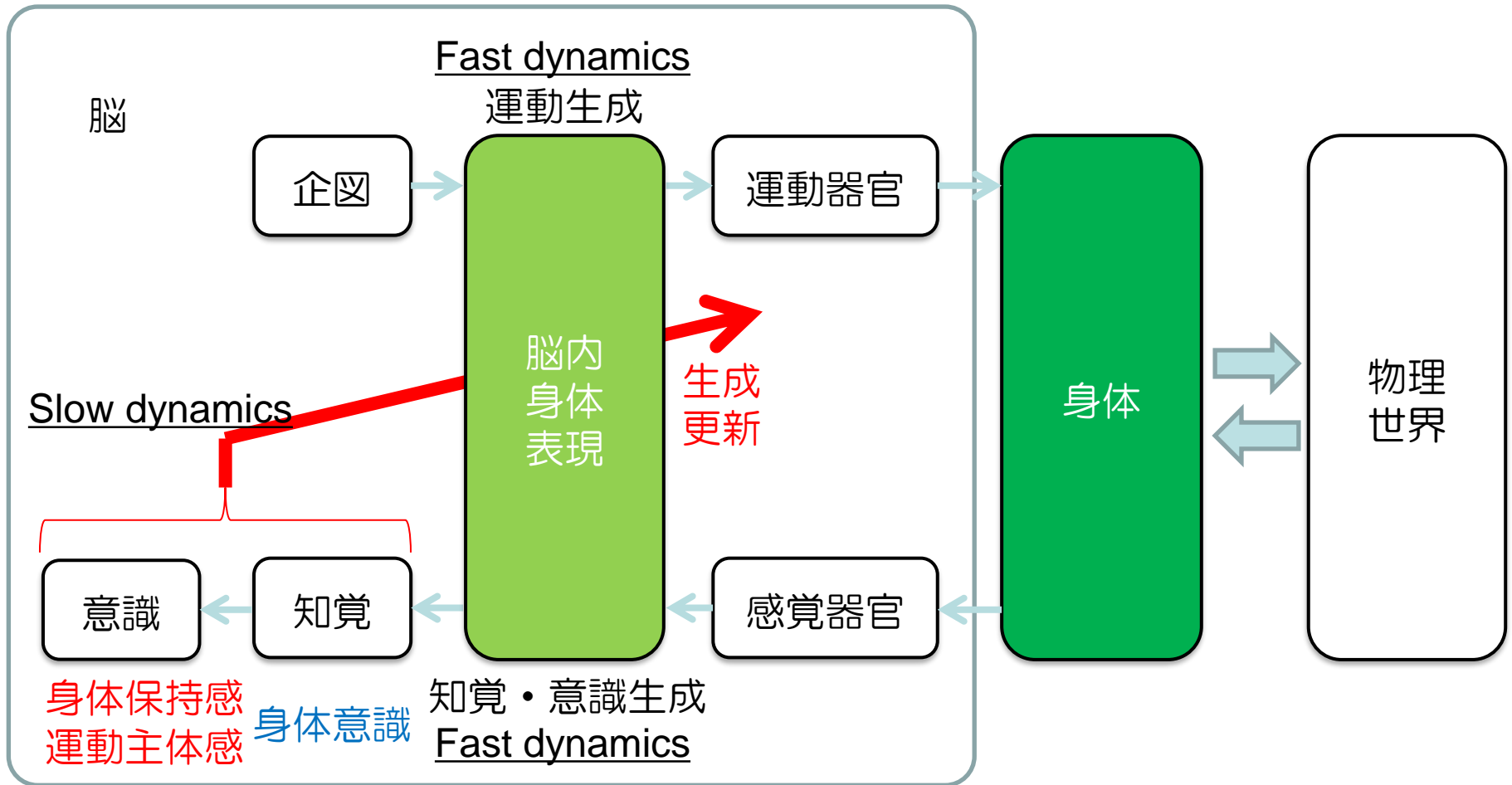
平成26～30年度文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究 脳内身体表現の変容機構の理解と制御 (身体性システム)

システム工学
Systems engineering



身体性基盤

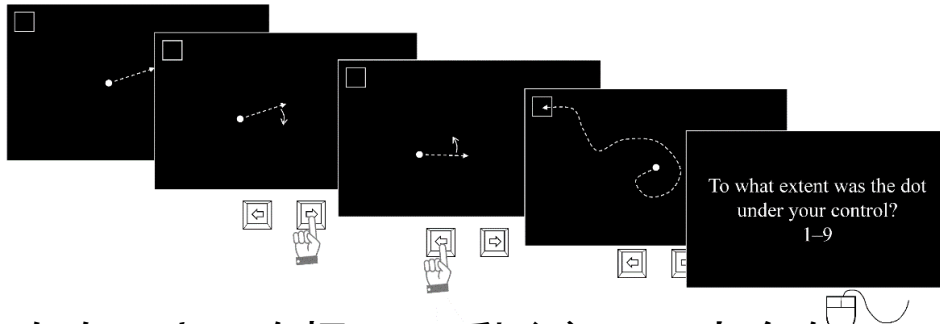
脳内身体表現に修飾された知覚に基づく 運動主体感・身体保有感生成機構のモデル化



感覚レベルvs高次認知レベル



温文



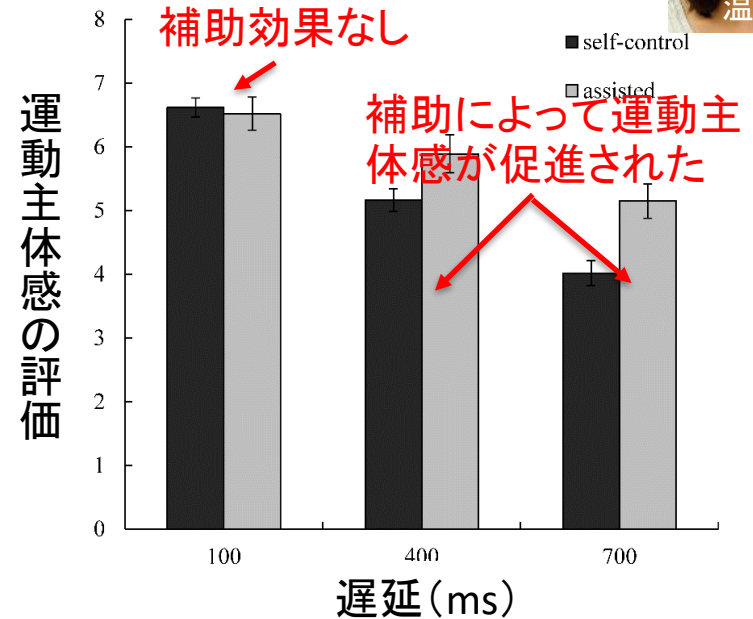
左右のキーを押して、動くドットを方向を制御し、目的地に入れる課題

独立変数:

- ①ドットの遅延 100, 400, or 700 ms
- ②**コンピューターの補助の有無**

コンピューターの補助:ドットの進行方向を目的地に向かう方向から離れる操作を無視する機能

補助あり:課題のパフォーマンスがよくなるが、一部の操作が無視されたため、感覚レベルの処理を妨害する。

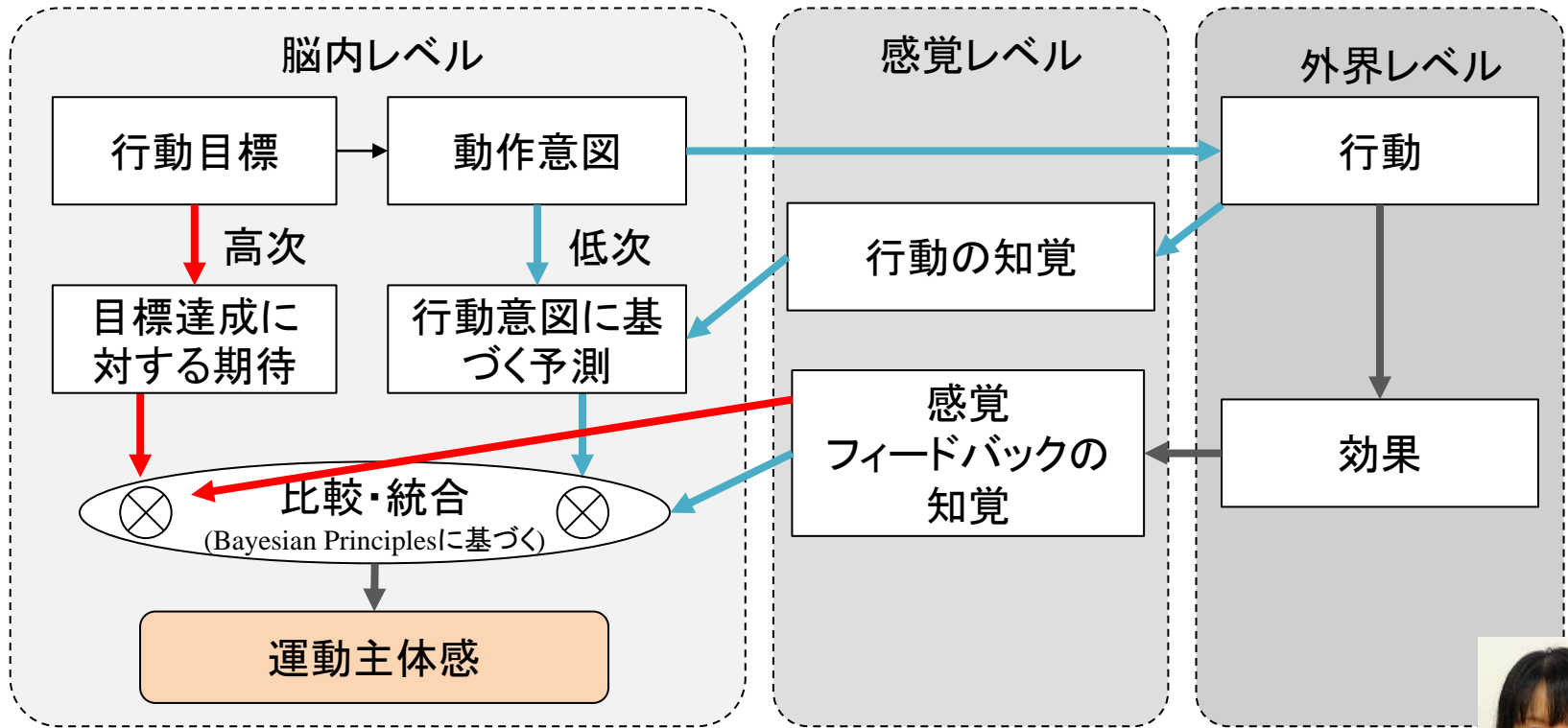


- 運動主体感は、感覚レベルと高次認知レベルの両方の処理に影響される。
- 感覚レベルの処理が信頼できない場合、高次認知レベルの処理が優位になる。

Wen Wen, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: "The Sense of Agency during Continuous Action: Performance is More Important than Action-Feedback Association", PLoS ONE, vol. 10, no. 4, e0125226, pp. 1-16 (2015).

運動主体感の生起における高次認知プロセスの役割

- 運動主体感の生起モデルの提案



- 従来のComparator Modelによる感覚レベルの比較プロセス
- 高次認知レベルにおける比較プロセス(本研究)

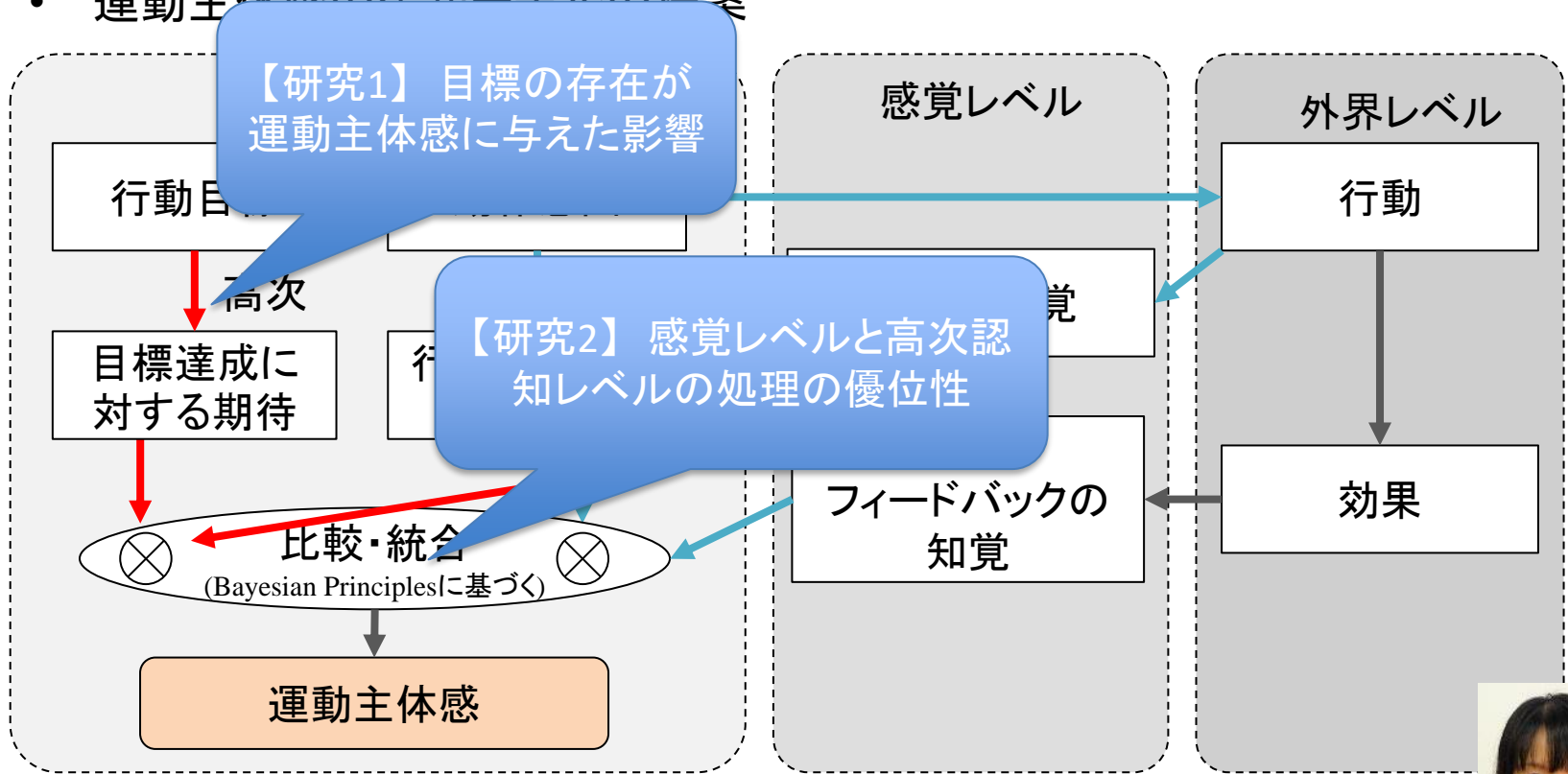


温文

Wen Wen, Atsushi Yamashita, Hajime Asama: "The Influence of Goals on Sense Control", *Consciousness and Cognition*, Vol.37, pp.83-90 (2015).

運動主体感の生起における高次認知プロセスの役割

- 運動主体感の生起モデルの提案



- 従来のComparator Modelによる感覚レベルの比較プロセス
- 高次認知レベルにおける比較プロセス(本研究)



温文

Wen Wen, Atsushi Yamashita, Hajime Asama: "The Influence of Goals on Sense Control", *Consciousness and Cognition*, Vol.37, pp.83-90 (2015).

能動性

運動主体感

認知能力

- **in Passive Condition**

- Cognition from Perception
- Prediction only based on Perception



- **In Active Condition**

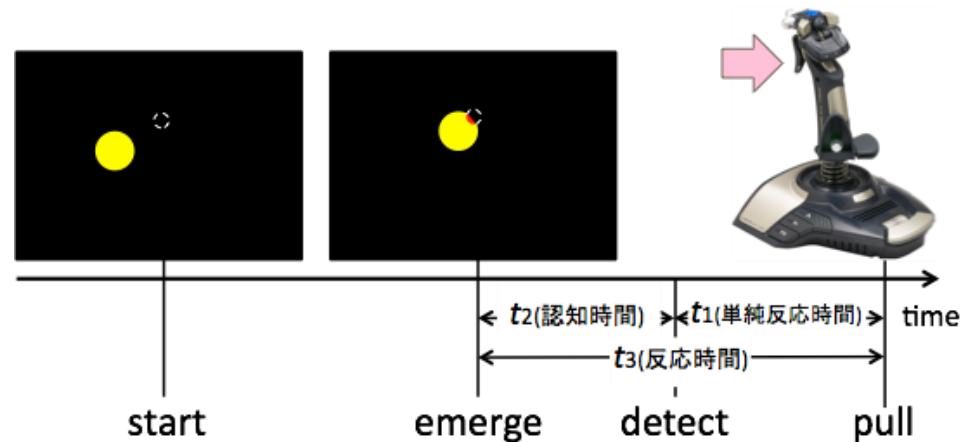
- Cognition from Perception
- Prediction based on not only Perception but also SoA Automatically Driven by Active Interaction



実験概要

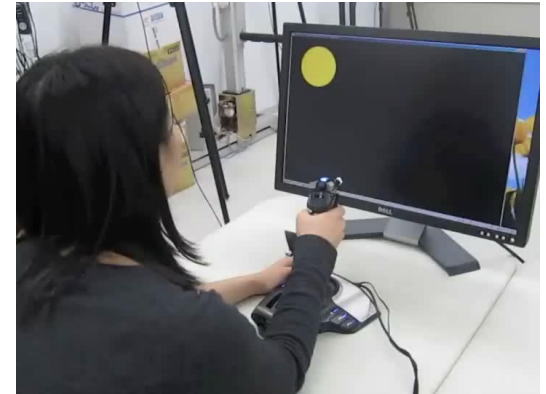


- 暗い環境内にあるターゲットを, サーチライトを用いて探索する, という視覚探索課題を行う
- ターゲットを発見したら即座にトリガを引き, ターゲット出現からトリガを引くまでの反応時間(t_3)を測定する
- 認知時間 (t_2)を認知能力の指標とする ($t_2 = t_3 - t_1$)

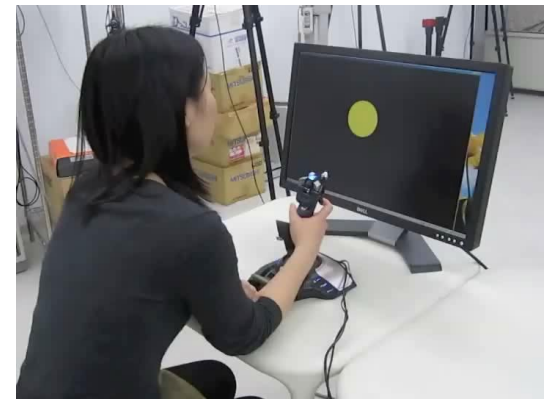


実験(能動性)

- 能動性と認知能力の関係を調べる
 - 能動性: 自分から外界へ主体的にはたらきかけ動作を行うこと
- 被験者
 - 健常な20代の男女21名 (男性:12名, 女性:9名)
- 実験設定
 - 能動的: 被験者がジョイスティックでサーチライトを動かす
 - 受動的: コンピュータが自動的にサーチライトを動かす
- 実験手順
 - ジョイスティックの操作に慣れるために練習時間をとる
 - 能動的20回, 受動的20回と条件を入れ替え, 合計80回で反応時間(t_3)を測定する



能動的



受動的

能動／受動条件における反応時間(時間遅れなし)

Active: Participants use the joystick to control the searchlight.

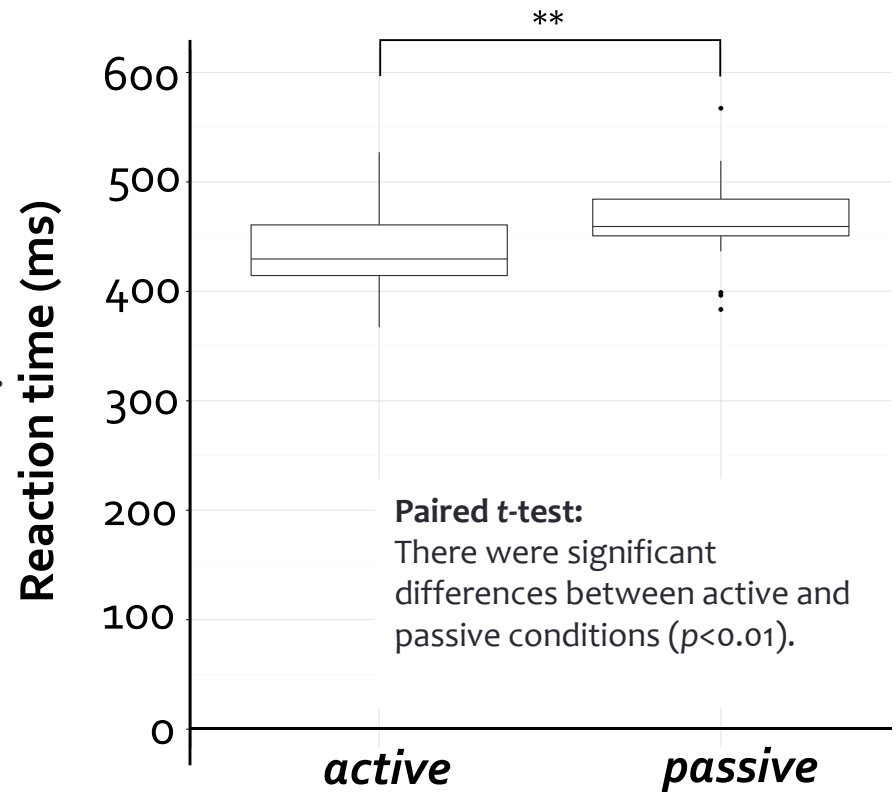
Passive: The searchlight moves automatically.

Participants:

21 volunteers (12 men, 9 women)

The experiment consists of 4 blocks
(2 active + 2 passive conditions)

In each block, 20 trials were conducted.



適応に関するシステム研究の歴史

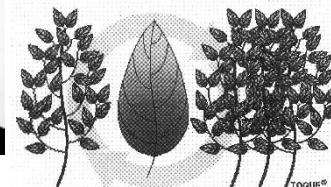
自律分散システム(重点領域)

(領域代表: 伊藤正美(名大), 1990 ~ 1992年度)
自律分散システムの適応機能の分析・記述



創発的機能形成のシステム理論(重点領域)

(領域代表: 北村新三(神戸大), 1995 ~ 1997年度)
適応的設計手法



身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現

—移動知の構成論的理解—(特定領域)

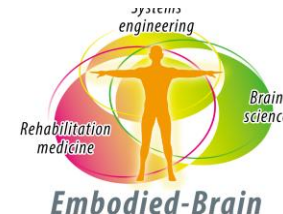
(領域代表: 浅間 一(東大), 2005 ~ 2009年度)
適応的運動／行動の発現メカニズムの解明



脳内身体表現の変容機構の理解と制御

(身体性システム)(新学術領域)

(領域代表: 太田 順(東大), 2014 ~ 2018年度)
脳内身体表現／スローダイナミクス／リハビリリ応用



身体—脳の機能不全を克服する潜在的適応力のシステム論的理解

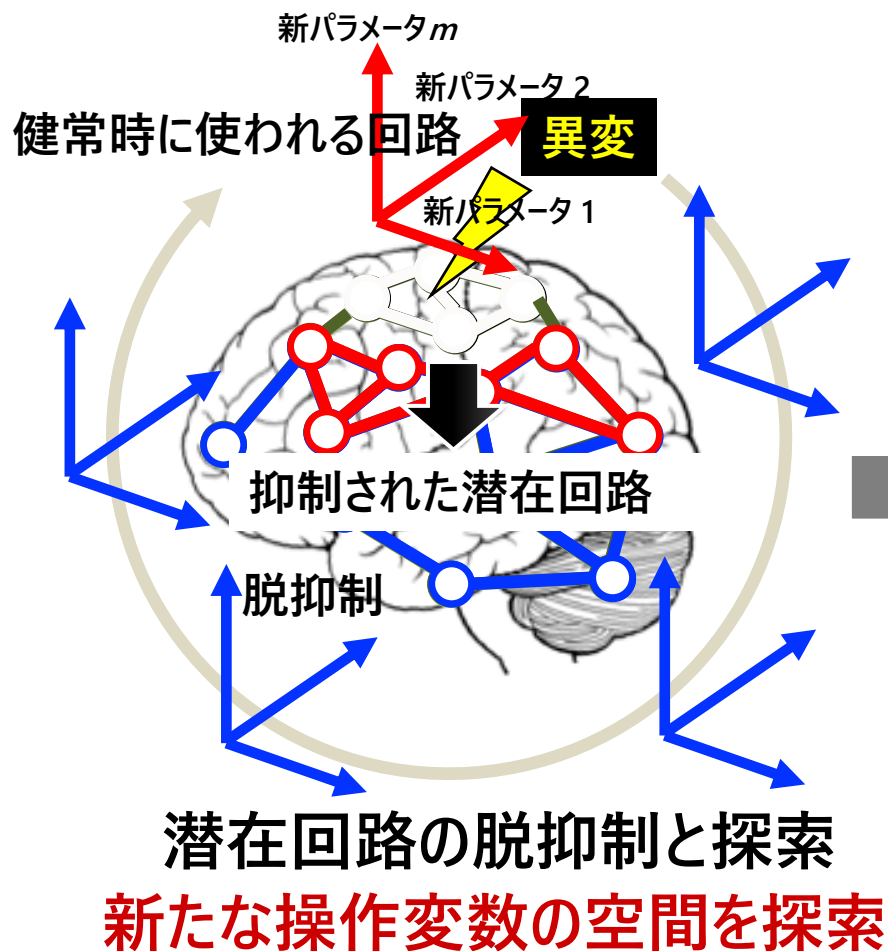
(超適応)(新学術領域)

(領域代表: 太田 順(東大), 2019 ~ 2023年度)
生体構造の再構成／行動遂行則の再編成

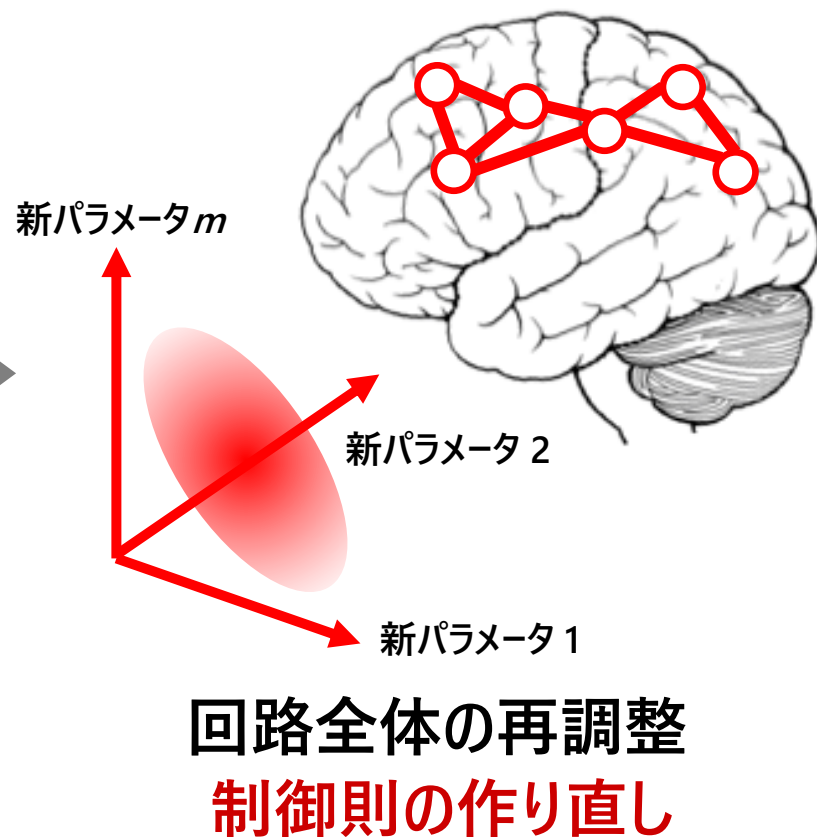


超適応の作業仮説

1. 生体構造の再構成



2. 行動遂行則の再編成



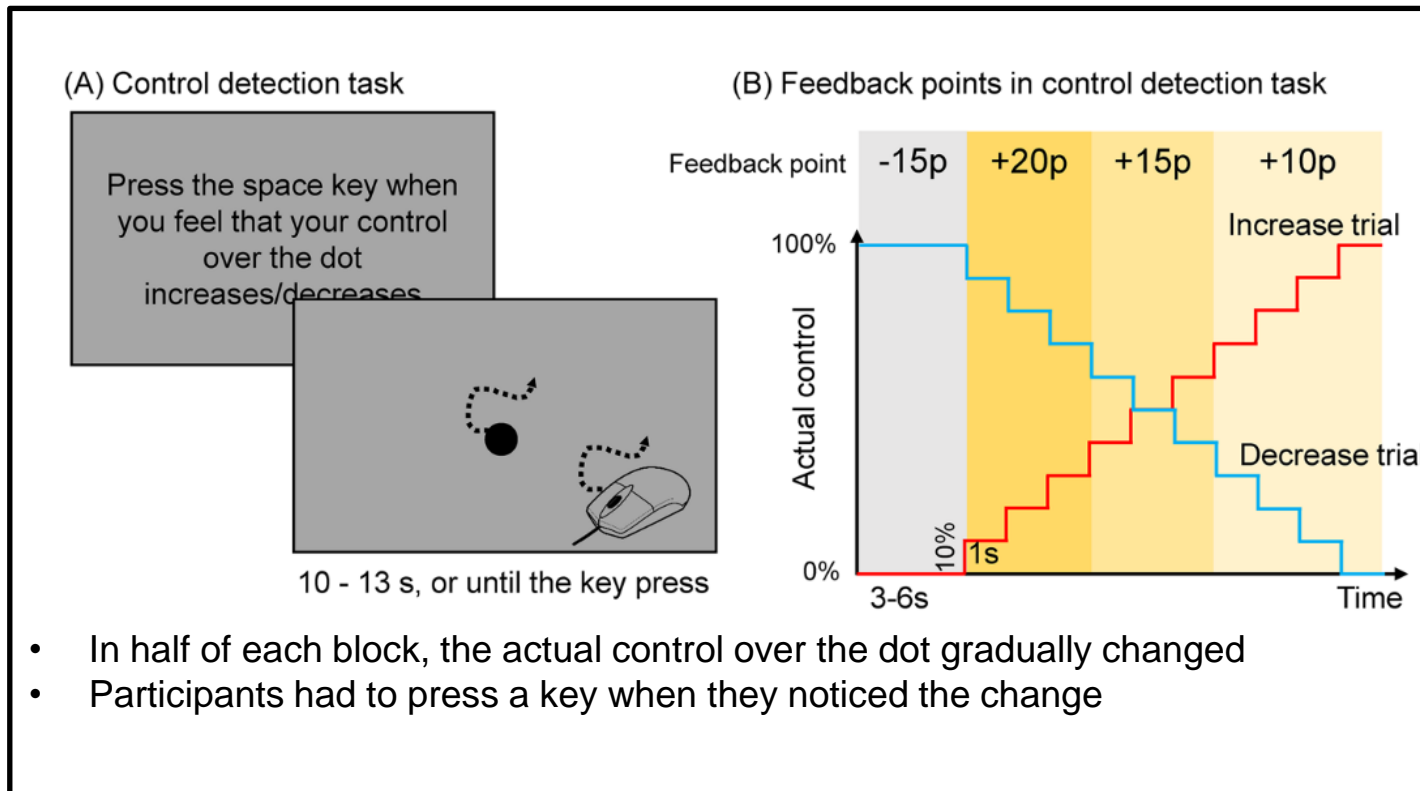
↳ 超適応：学習的な制御構造 ‹

超適応B03研究項目

認知・情動に着目した超適応現象の システム論的理解と実現

研究代表者 浅間 一(東大)
研究分担者 井澤 淳(筑波大), 温 文(立教大), 安 琪(東大)
研究協力者 濱田裕幸(東大), 山下 淳(東大), 矢野雅文(東北大)
連携 A03今水 寛(東大), A05前田貴記(慶応大)

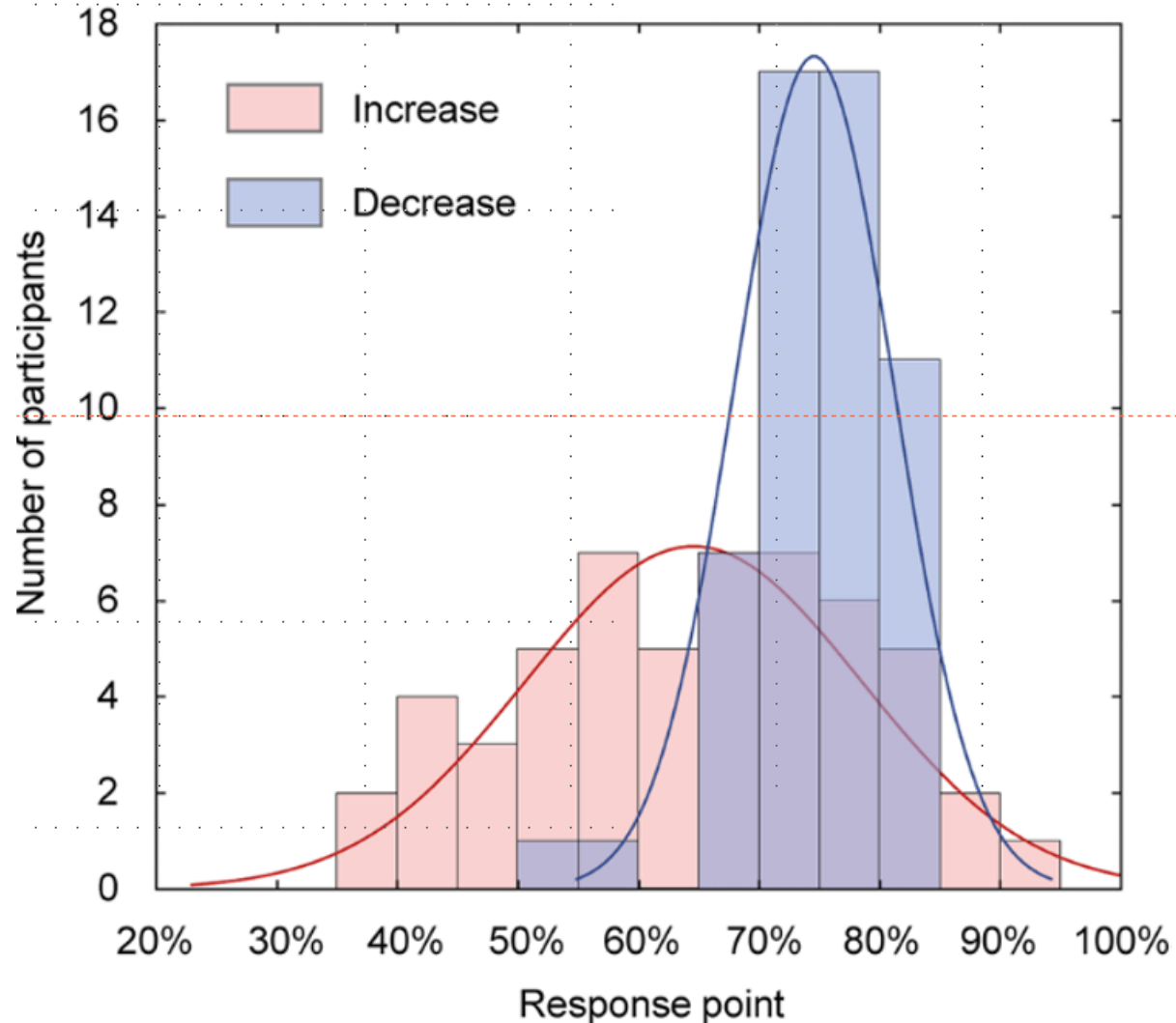
Individual difference in detecting control and detecting losing control



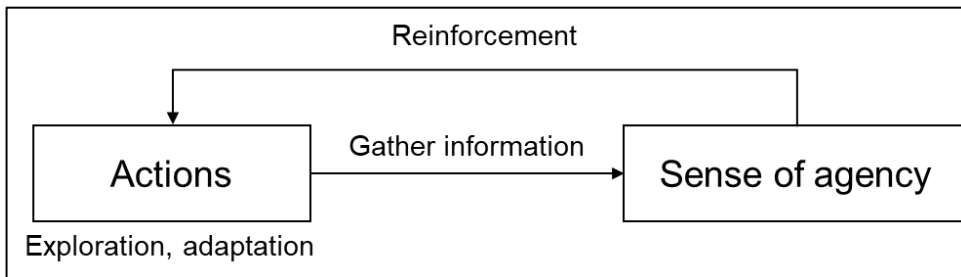
[W. Wen, H. Ishii, R. Ohata, A. Yamashita, H. Asama and H. Imamizu: "Perception and Control: Individual Difference in the Sense of Agency is Associated with Learnability in Sensorimotor Adaptation", Scientific Reports, Vol. 11, Article 20542, October 2021]

Individual differences

Histograms of increase and decrease response point

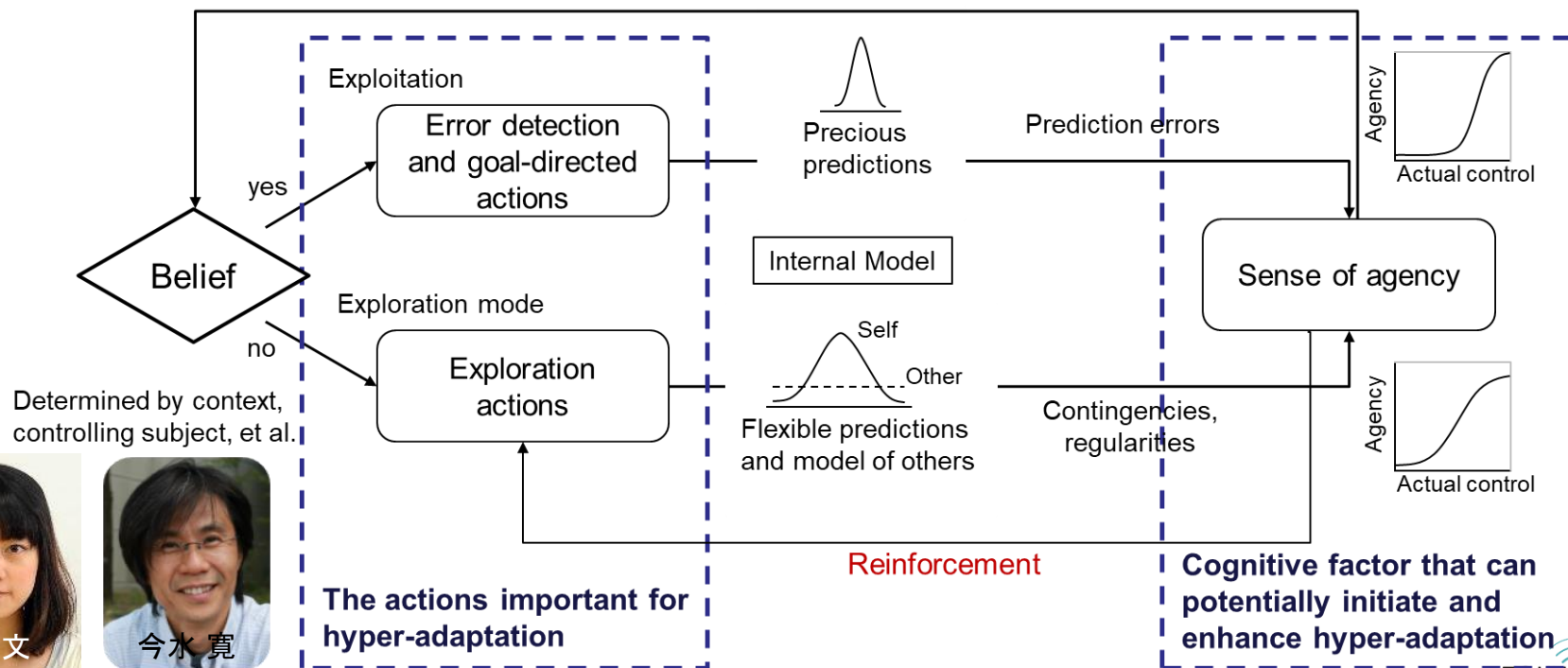


The dual-mode model (exploration-exploitation model)



Asama, Wen, Hamada, "Understanding and modeling the effects of cognition and emotion on the exploration of body awareness", HypAd 2023

The update of the belief may change the mode



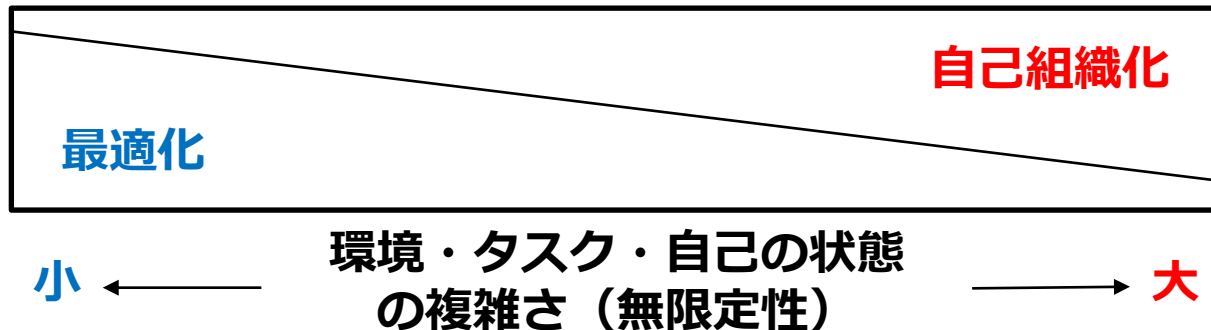
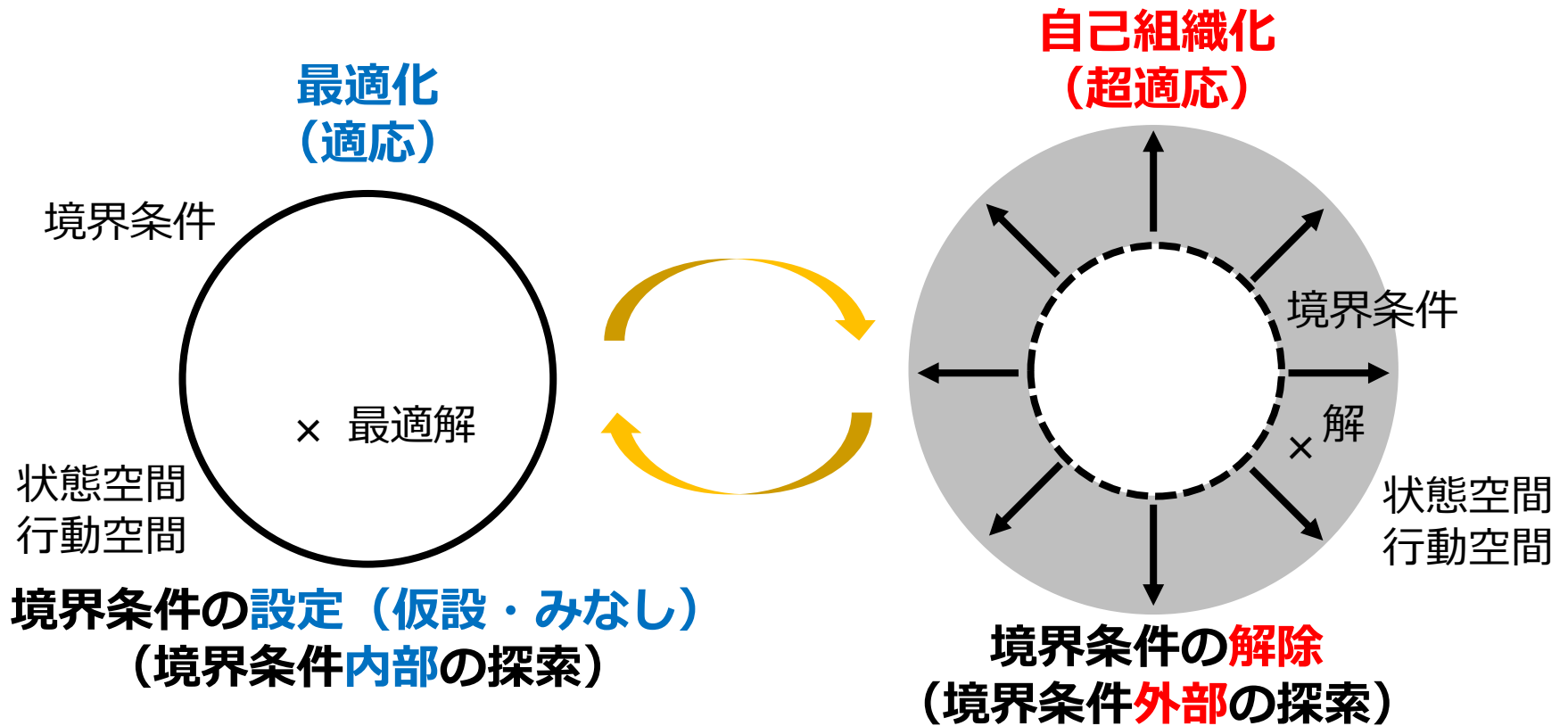
運動主体感(可制御性)のポイント

- 可制御性が失われた場合は, ほとんどの人がすぐに気づく
- 可制御性を見出す場合は, 人によってばらつくが, 遅い

バランスの力学に基づく超適応の考察

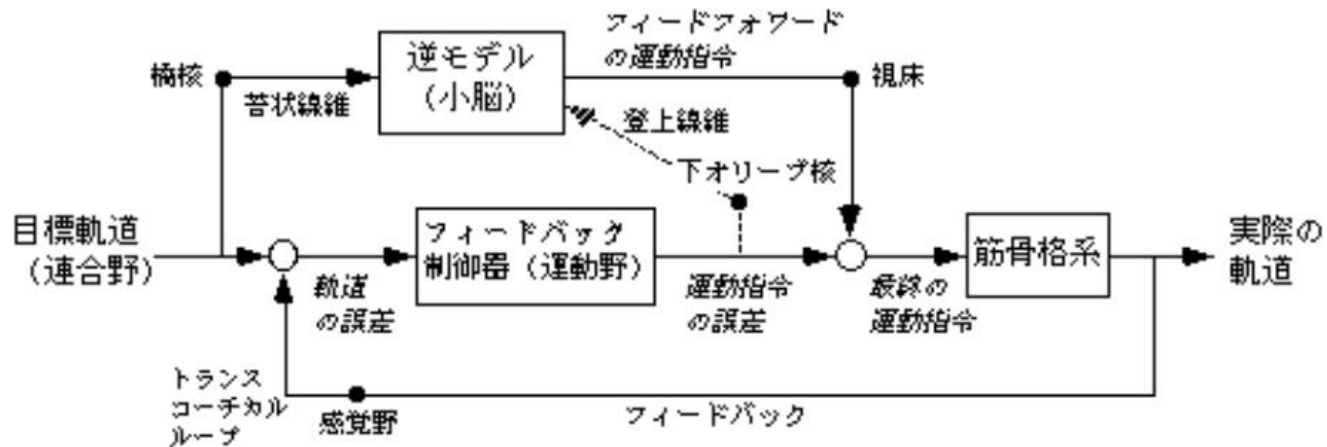
- 最適化と自己組織化
 - 自由エネルギー原理 (Karl J. Friston) ?
 - 解法系における時空間的な状態空間 / 行動空間の次元の拡大

最適化と自己組織化



バランスの力学に基づく超適応の考察

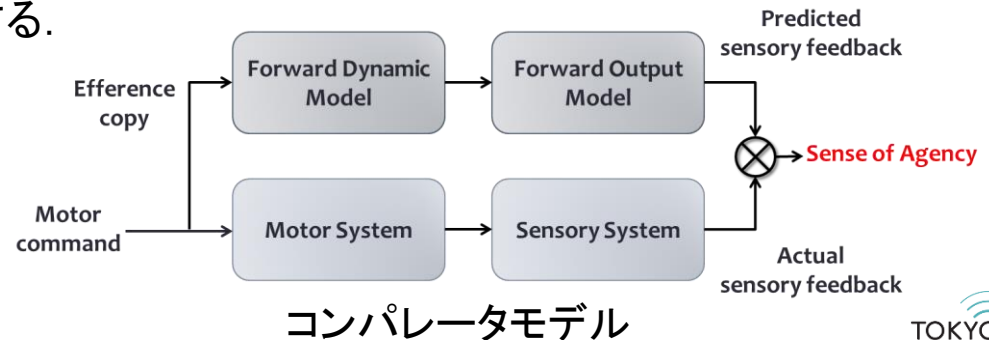
- 最適化と自己組織化
 - 自由エネルギー原理 (Karl J. Friston) ?
 - 開放系における時空間的な状態空間 / 行動空間の次元の拡大
- 予測誤差に基づく学習と予測誤差を生む機構
 - 無限定性への対応 (川人モデルにおける超適応の位置づけ)
 - 目標を作り出せるか (チャレンジ / ハングリー / 好奇心 / 自律 / 意欲)



川人モデル

バランスの力学に基づく超適応の考察

- 最適化と自己組織化
 - 自由エネルギー原理 (Karl J. Friston) ?
 - 解法系における時空間的な状態空間 / 行動空間の次元の拡大
- 予測誤差に基づく学習と予測誤差を生む機構
 - 無限定性への対応 (川人モデルにおける超適応の位置づけ)
 - 目標を作り出せるか (チャレンジ / ハングリー / 好奇心 / 自律 / 意欲)
- 自他帰属
 - 能動性に基づく可制御性 (自分) の発見
 - 自分の脳, 身体, 環境には, 自分が操作できる極めて多くの潜在的自由度が存在する. それを探索し, 利用する.
 - 拡自行動
 - 自己 / 自由度の拡大



バランスの力学に基づく超適応の考察

- 最適化と自己組織化
 - 自由エネルギー原理 (Karl J. Friston) ?
 - 開放系における時空間的な状態空間 / 行動空間の次元の拡大
- 予測誤差に基づく学習と予測誤差を生む機構
 - 無限定性への対応 (川人モデルにおける超適応の位置づけ)
 - 目標を作り出せるか (チャレンジ / ハングリー / 好奇心 / 自律 / 意欲)
- 自他帰属
 - 能動性に基づく可制御性 (自分) の発見
 - 拡自行動
- 意欲
 - 上記を実現ようとする能動性の度合い
 - 評価する方法論? 向上させる方法論?

主体感から主体性へ

- 結果としての主体感 (Feedbackベース)
 - Feedbackの中に可制御性を見出せば, 主体感が得られる
- 適応的機能のために必要な主体性
 - 自己=システムの主体
 - 主体的に自らが関わる (自分が動かないと始まらない / 解決できない) (能動性, 随意性)
 - 自分の行動の影響に関する信念 / 予測 (Feedforward)
 - すぐに (時間的・空間的に) Feedbackが得られなくても

神林照道先生の話



みんなの中に
わたしがいる

わたしの中に
みんながいる

- 個の重要性
わたし(主体) = システムという意識
(社会における主体感)
システムへの個の貢献・影響
- 個性に配慮した教育
→ 個の多様性
→ 多様性の維持

ムーンショット型研究開発事業

我が国発の破壊的イノベーションの創出を目指し、従来技術の延長にない、より大胆な発想に基づく挑戦的な研究開発(ムーンショット)を推進する新たな制度

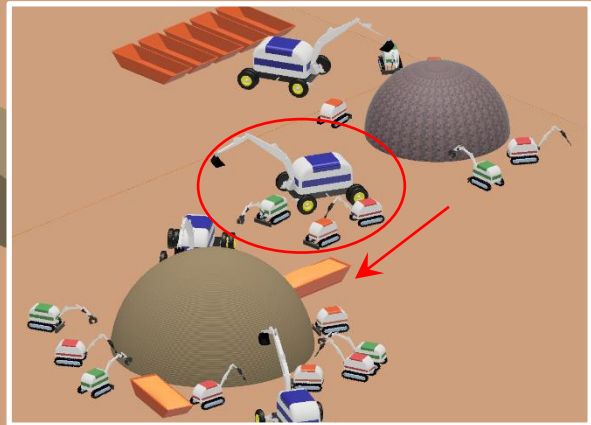
ムーンショット目標3 (PD:福田敏男先生)

- 2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現
- 多様な環境に適応しインフラ構築を革新する協働AIロボット (PM: 永谷圭司先生)
- 動的協働技術



動的協働技術（月面インフラ構築／自然災害対応）

- ・ オープン自己組織化
- ・ Domain-free Physical AI
- ・ 群協働操作



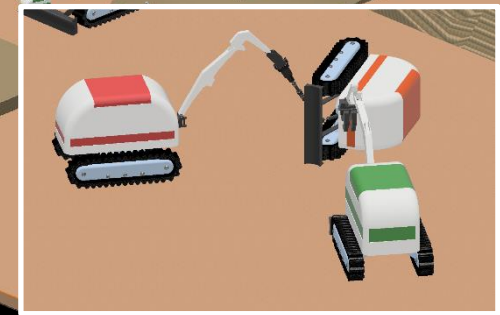
3. 他の群との交渉

相補的な通信, 協調

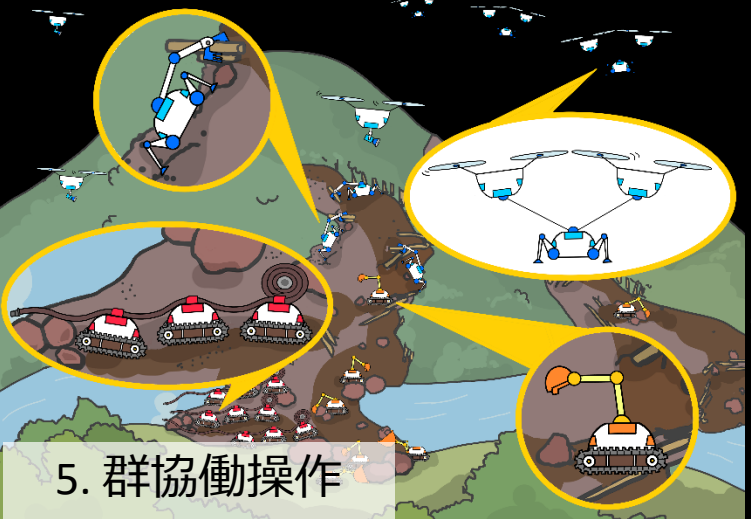
2. チームの自己組織

協調運搬

1. 知識・データの獲得・共有



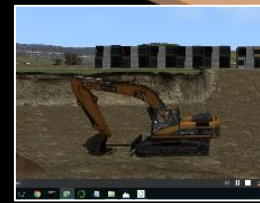
4. 自己異常検出



5. 群協働操作



群管理



シミュレーション



Physical AI



Cyber AI

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x$$

数理モデル



水中バックホウ

これまでの研究開発の進捗報告

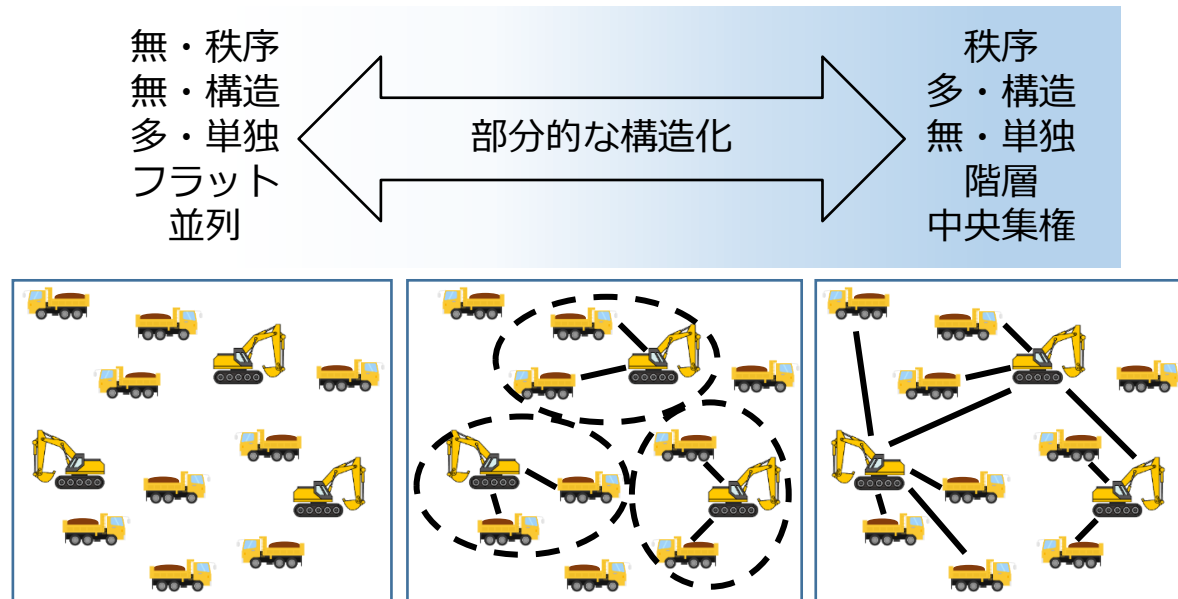
動的協働AIの体系化について

技術課題：

無限定環境・想定外事象への対応には、無秩序状態から中央集権的な秩序状態を状況に応じて変化可能な構造化（チーム編成）が必要である。しかし、**無限定環境・想定外事象に対応可能な構造化に必要なシステムアーキテクチャ**はなく、そのための数学的体系も存在しない

アプローチ：

- 無限定環境・想定外事象に対応可能な自律分散型システムアーキテクチャの構築
- 数学的枠組みの検討



動的協働での基本的戦略

- **下位レベルの行動（最適化）**：自分（達）で頑張る

- 境界条件（自己（チーム）という枠）の設定と境界条件内における行動計画・探索
- 変動要因（環境，タスク，自己の状態）→適応

- **上位レベルの行動（自己組織化）**：外部リソースの獲得

- 境界条件（自己（チーム）という枠）の解除・境界条件外の探索

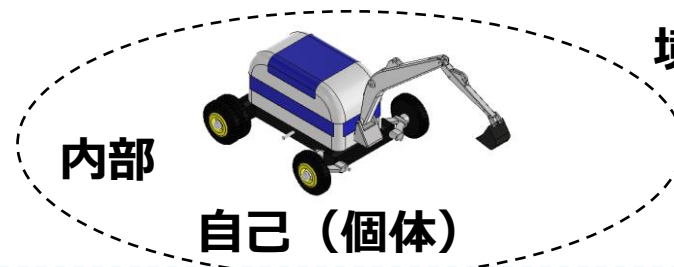
- **無限定要因**（環境，タスク，自己の状態）→自己組織化

- **環境**：未知環境要因：新たな発見，想定外の環境変化（地盤形状変化）
 - 既知パラメータ：移動する盛土の位置／量，放土場の位置，建機の数
 - 未知パラメータ（作業実行に伴い入手可能な情報）：搬送する土の性質，走行する土の性質，状態の変化（柔らかい土→固い土，土→石）...
- **ヒト**：共働・共存対象（内部状態を持つ）
- **タスク**：新たなタスクの発生・追加
- **自己の状態**：劣化・故障による機能低下
- **他のロボット**：競合，コミュニケーションによる相互作用，自己拡大・縮小



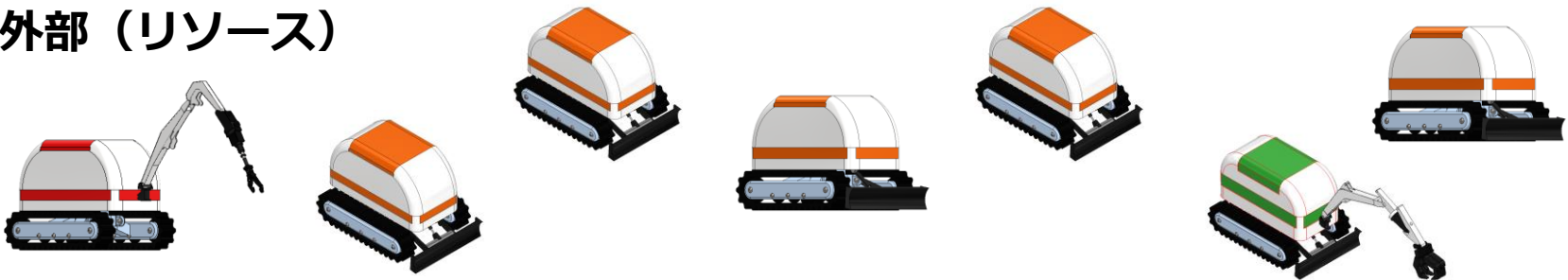
境界条件としての自己

- **境界条件**
 - 自己に帰属している自由度
 - 拡自行動（チームの組織化）による外部リソースの自由度の取り込み（拡大）
- **自由度が変化する数理の必要性**



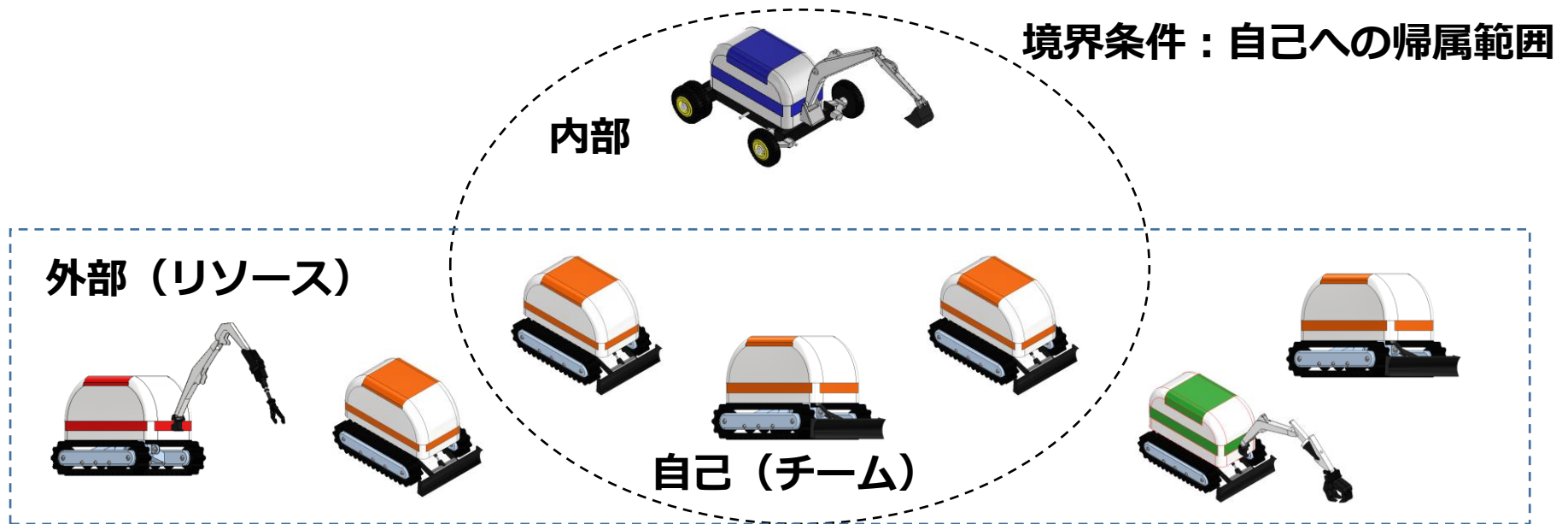
境界条件：自己に帰属

外部（リソース）

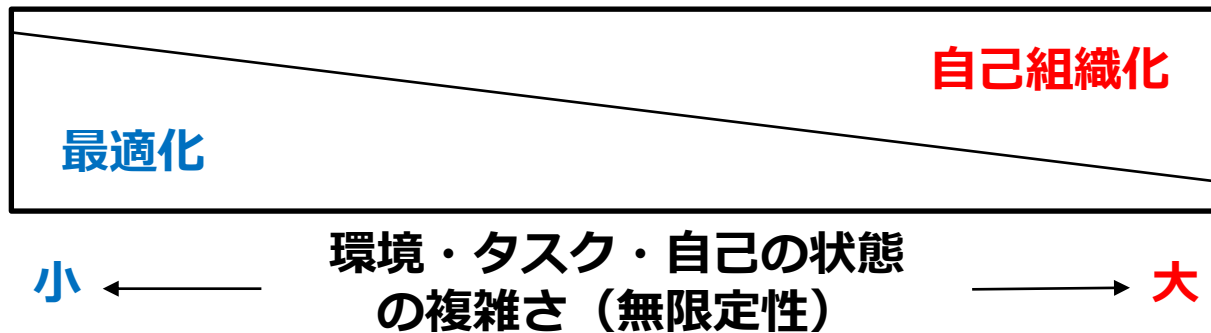
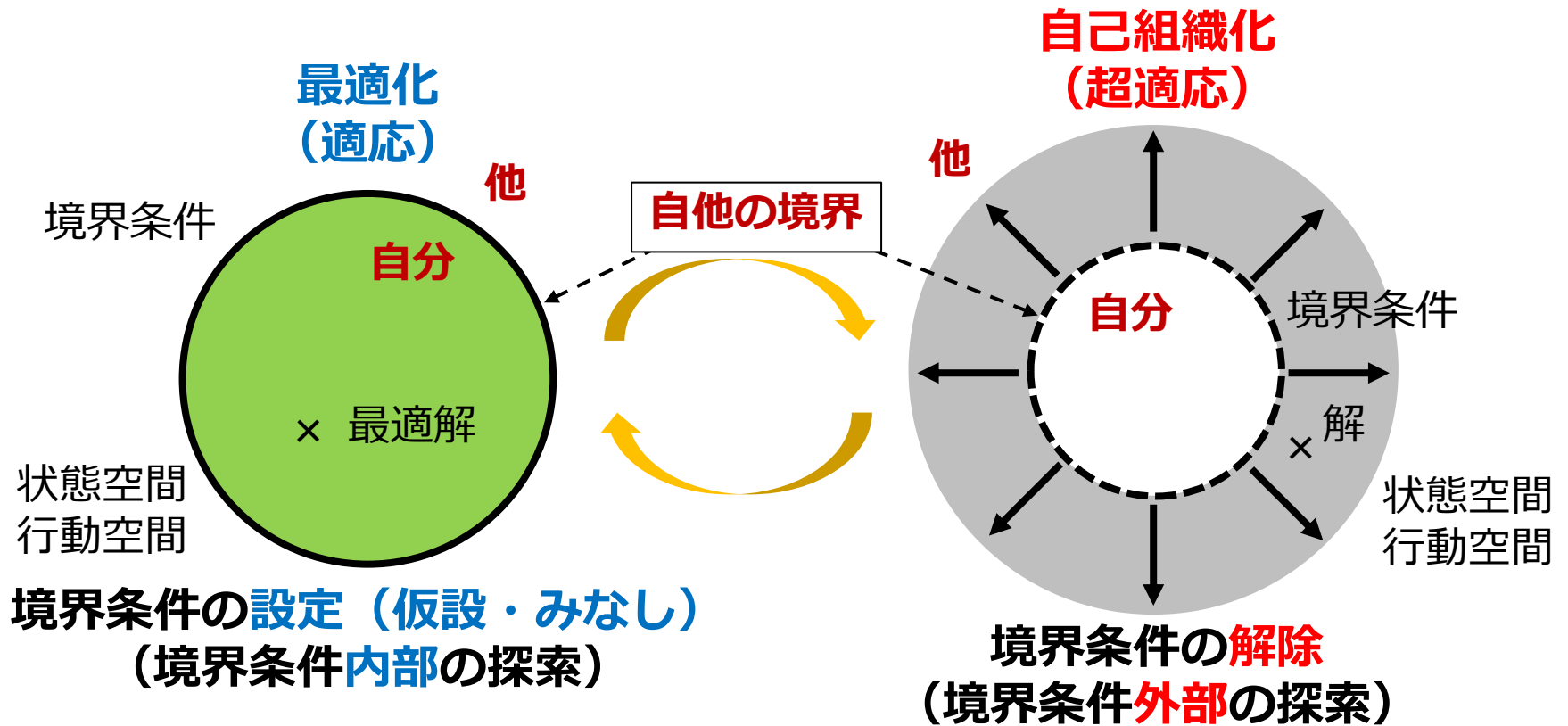


境界条件としての自己

- **境界条件**
 - 自己に帰属している自由度
 - 拡自行動（チームの組織化）による外部リソースの自由度の取り込み（拡大）
- **自由度が変化する数理の必要性**



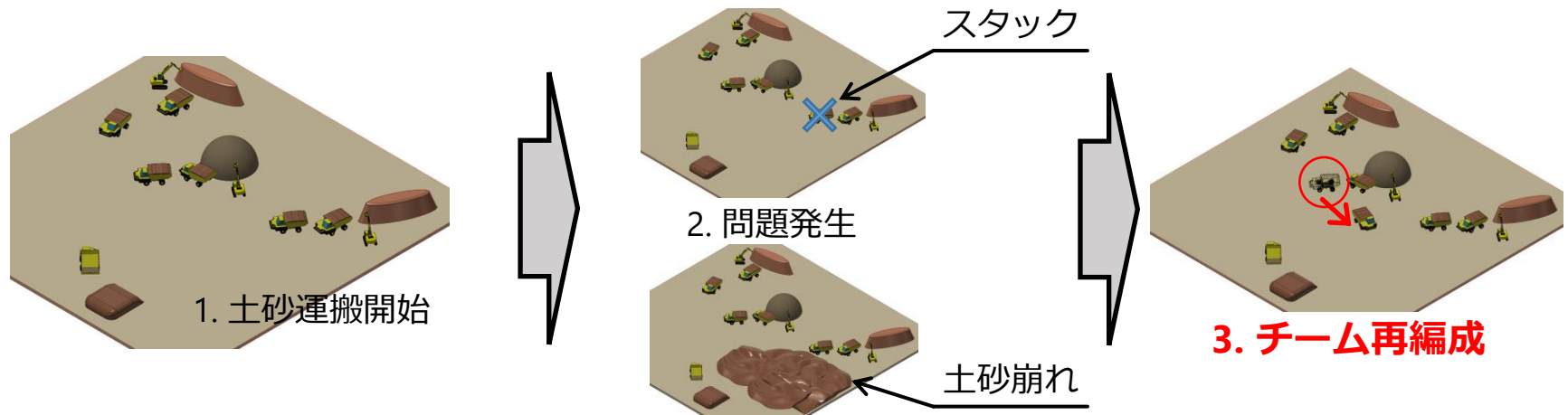
最適化と自己組織化



動的協働アルゴリズムによる臨機応変なチーム編成の実現

技術課題：

無限定・想定外事象が起こりうる環境において、複数台ロボットを運用するためには、状況に応じた臨機応変なチーム編成（自己組織化）を行う必要がある



アプローチ：

納期までに作業を終了させるために必要な機能を、「パフォーマンス」として表現し、チームのパフォーマンスを事前に得られる情報から予測しつつ、センサや通信から得られる情報から現状のパフォーマンスを実測し、それに基づいてチーム組織化をするアルゴリズムを開発した

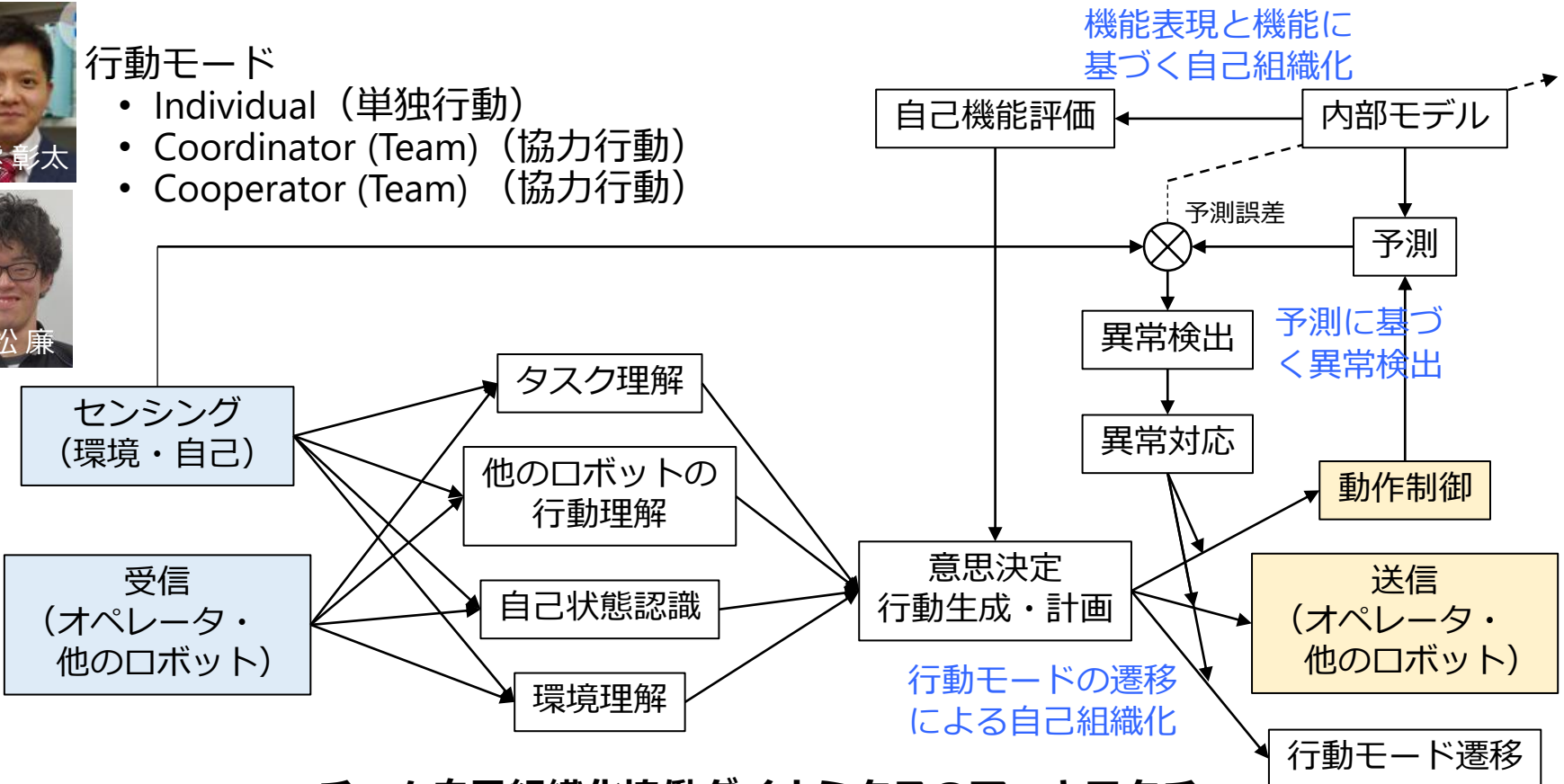
動的協働AIの体系化

複数台のロボット間のインタラクションを考慮した“チーム自己組織化協働ダイナミクス”を構築する。そのため、チーム自己組織化協働ダイナミクスの仕様検討、アルゴリズムの構築を行う



行動モード

- Individual (単独行動)
- Coordinator (Team) (協力行動)
- Cooperator (Team) (協力行動)



チーム自己組織化協働ダイナミクスのアーキテクチャ



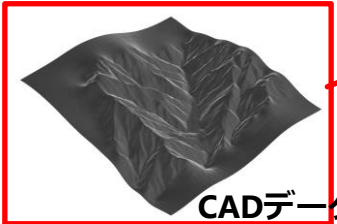
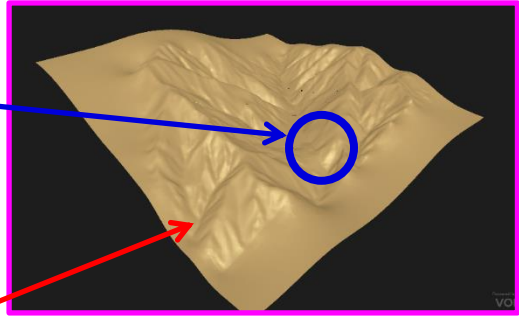
動的協働アルゴリズムによる臨機応変なチーム編成の実現

動的協働AIを用いた土砂運搬シミュレーションとアルゴリズムへのフィードバック

- シミュレーション環境において、20台のロボット群による土砂運搬タスクを実現



土砂の掘削運搬アルゴリズム

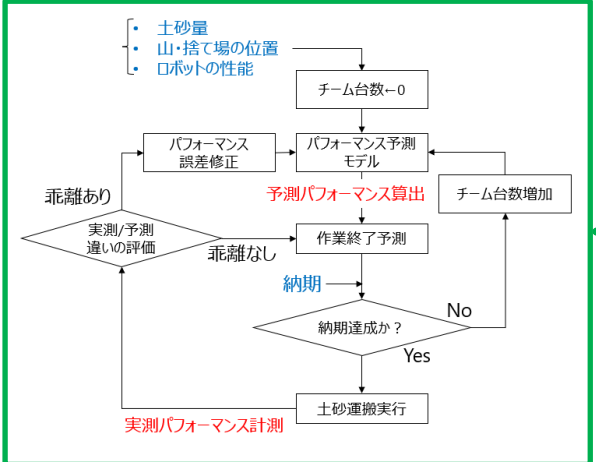


CADデータ

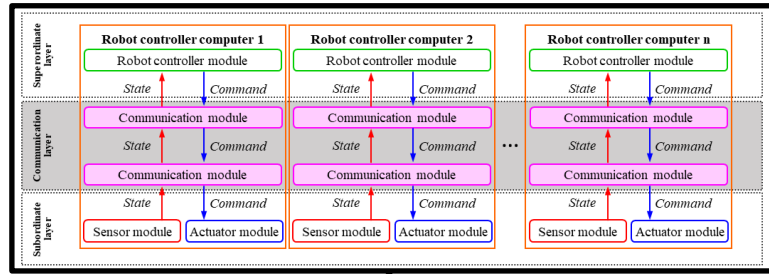


オルソ画像

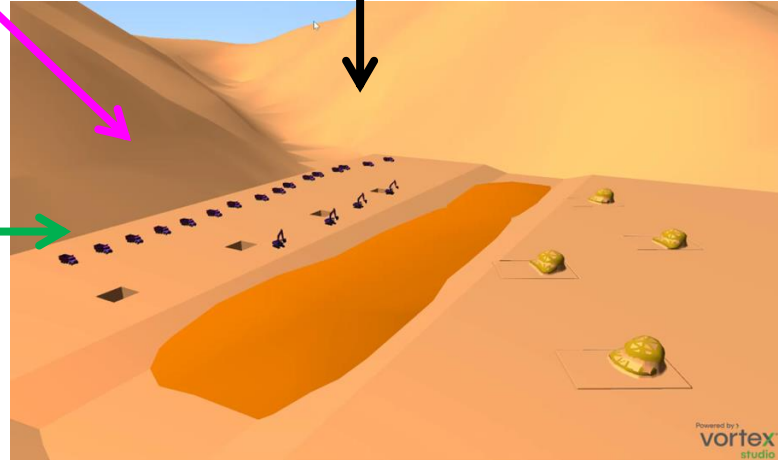
実際の河道閉塞現場 (紀伊山地 長殿地区)



オープン自己組織化提案アルゴリズム



システムアーキテクチャ



土砂特性を考慮した三次元シミュレーション



動的協働アルゴリズムによる臨機応変なチーム編成の実現

複数の模型ロボット／実機ロボットへの動的協働アルゴリズムの実装

- 模型ロボット2台のバックホウによる初期チーム編成（ダンプ3台ずつ要請）と自律分散的な協働土砂運搬を実現



谷島 諒丞

- 実機ロボット6台の建設機械で自律分散的な協働土砂運搬を実現



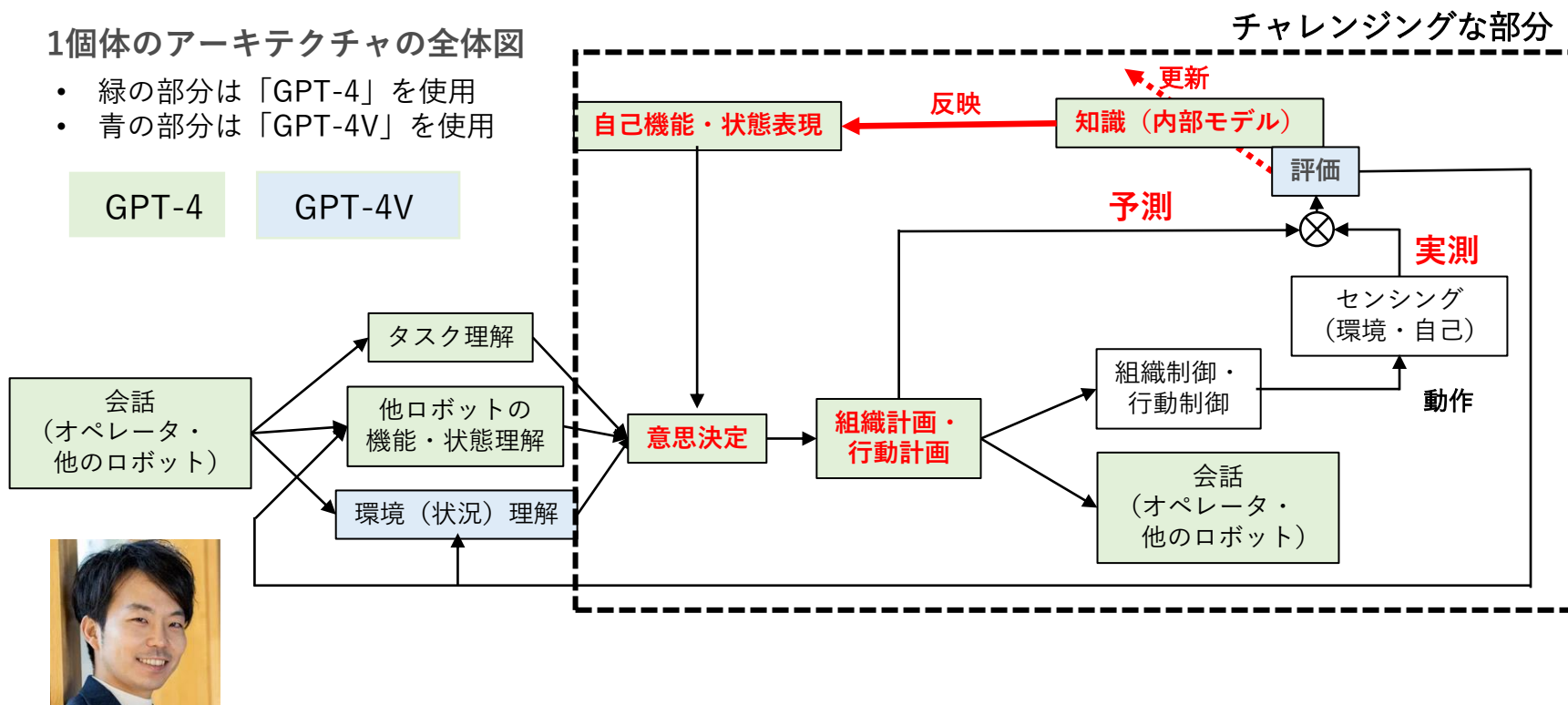
竹園 年延

大規模言語モデルを活用したアーキテクチャの設計

オペレータから与えられたタスクに対し、タスクの理解、自己の機能・状態表現、他者の機能・状態の理解、環境(状況)理解の上、各ロボットが自律分散的に意思決定し、想定外の事象に対しても臨機応変に協働し、タスクを実行するアーキテクチャ構築を進めている。

1個体のアーキテクチャの全体図

- 緑の部分は「GPT-4」を使用
- 青の部分は「GPT-4V」を使用



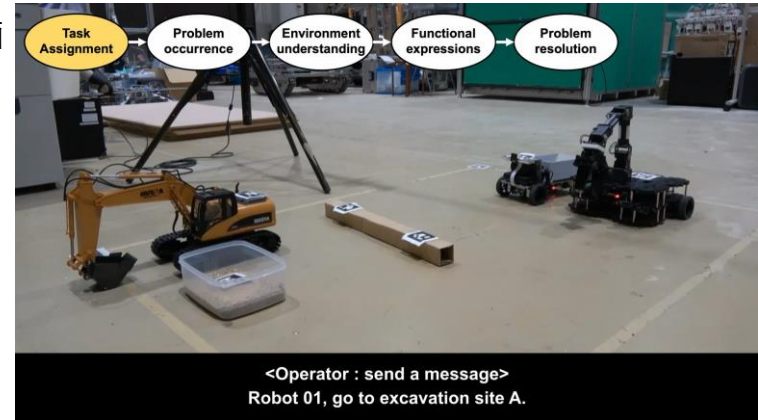
末岡裕一郎

想定外事象に対して、機能表現と環境理解を通じた臨機応変な協働

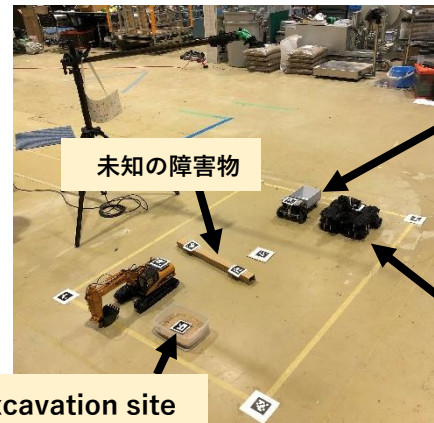
全体の流れ

- オペレータからダンプトラック (Robot 01) へタスク指示「Excavation site Aに移動してください」
- ダンプトラックがタスクを理解し、自身のmove機能を利用して、Excavation site Aに移動開始。
- ダンプトラックの超音波センサが未知の障害物を検知し、移動停止 (想定外発生)
- ダンプトラックが行動失敗と判断し、自身のカメラ情報を基に、目の前の障害物が原因で移動できないと環境理解する。
- 自身の機能では解決できないと判断し、マニピュレータロボット (Robot 02) に機能を聞き、助け (協働) を求める。
- Robot 02が「pick & place」の機能を用い、障害物の位置を聞いて、除去する (想定外解決)。
- ダンプトラックがExcavation site Aに到達。

実験動画



実験の様子



(Y. Kato, T. Yoshida, Y. Sueoka, et al.)

ダンプトラック
(Robot 01)
機能(Function): move, dispose of soil, stop

マニピュレータロボット
(Robot 02)
機能(Function): move, pick & place, stop

想定外の状況が異なる場合にも設計アーキテクチャは対応可能

ケース1: ロボットが経路を塞いでいる場合

マニピュレータロボットが障害物として存在する場合、ダンプトラックは自身のカメラ画像を基に「アームロボットさん、移動してください」とメッセージを送る

→ **アームロボットが退避して、想定外解決**

実験の様子



(Y. Kato, T. Yoshida, Y. Sueoka, et al.)

ケース2: 障害物が重い場合

障害物が重い場合、マニピュレータロボットは「Pick & Place」行動中にモータのトルク値を基にPick行動を止め、Push行動に切り替える

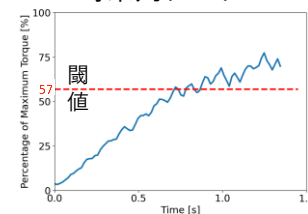
→ **障害物を押して動かして、想定外解決**

実験の様子



(Y. Sueoka, Y. Kato, T. Yoshida, et al.)

トルク値の時系列データ



Robot 01の機能とプロンプト（意思決定の部分）

ロボットの内部モデルを、基礎情報として与え、チーム内のロボットに対して、お互いの機能を聞いて協調するプロンプトを記述している。群システムは、他のロボットも作業を行う「動的環境」であるため、チーム内の報連相（自分が何をしているかを連絡する、他人が何をしているかを知る）は非常に重要である。

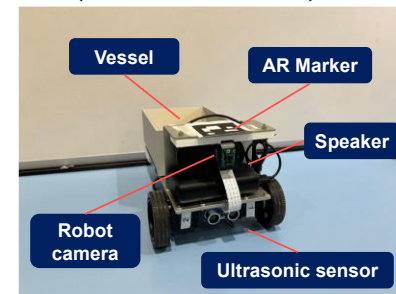
ロボットに与える基礎情報の例 (basic informationとしてプロンプト記述)

- Name: Robot 01 ロボットの名前
- Organization: Working robot ロボットの所属チーム
- Functions: {Loading soil and sand, Discharging soil and sand, Movement} 機能
- Performance: {Movement speed: ◎, Loading of soil and sand: ◎} 性能

協調のためのプロンプトの一部 (報連相のためのプロンプト)

- Your name is {robot name}. {robot name} can exchange messages and use its own functions. Check the functions of other targets connected to the network, then cooperate to solve the issue. If the assigned task is accomplished, report to the entity that made the request and wait for the next one. Below is the basic information provided for the accomplishment of this task. It includes information about yourself as well.

Robot 01
(ダンプトラック)



土砂運搬時の水たまり時の想定外対応シミュレーション

ロボットの台数に依存せず、様々なロボット(開発中も!)と機能表現を通じて臨機応変に協働できる自律分散システムを設計可能である。

タスク: 土砂山の土を土砂捨て場まで運んでください。

シミュレータの開発 (Thanks to T. Yoshida, Osaka Univ.)



ロボットの名前: 大型ロボットC
i-CentiPot-Ammonite,
ムーンショット 目標3 大須賀G (永谷PM) にて開発

機能

移動速度: ○

排水: ◎



バックホウ, ダンプトラックで役割分担
チーム内のロボット同士で機能表現し, バックホウが土砂山の掘削を, ダンプトラックが土砂の搬送を担当.

土砂山への自律移動中に水たまりの
トラブルに遭遇

大型ロボットC (排水機能) を追加要請.

排水作業の開始/完了後に作業続行
バックホウとダンプトラックが協働して
土砂協働運搬の実現.

社会のニーズに応えるロボットシステム

適応機能の実現

- 自律分散化と協調(システムの設計)
 - 超多自由度環境(余裕, リソース)と**拡自行動**(**自由度**の動的獲得)
 - 機能分散、負荷分散、空間分散
 - 繋ぐ／繋がない(繋ぎの抑制)
- 個の自律機能(個の行動アルゴリズムへの落とし込み)
 - **内部モデル**の獲得とそれに基づく**予測**(適応的行動, 異常検出)
 - **予測誤差**の利用と予測誤差を生む機構(含目標の生成)
 - **同質性**と**異質性**の両面を持つこと
 - 多様性を生み維持するメカニズム(ばらつき, ゆらぎ, 好奇心)
 - **自己**の理解／**主体感**／**自他帰属**(能動性に基づく可制御性(自分)の発見, 拡自行動)
 - **最適化**と**自己組織化**の**バランス**

ご清聴ありがとうございました