

ポストコロナ社会における 人共存サービスロボット技術とその社会実装

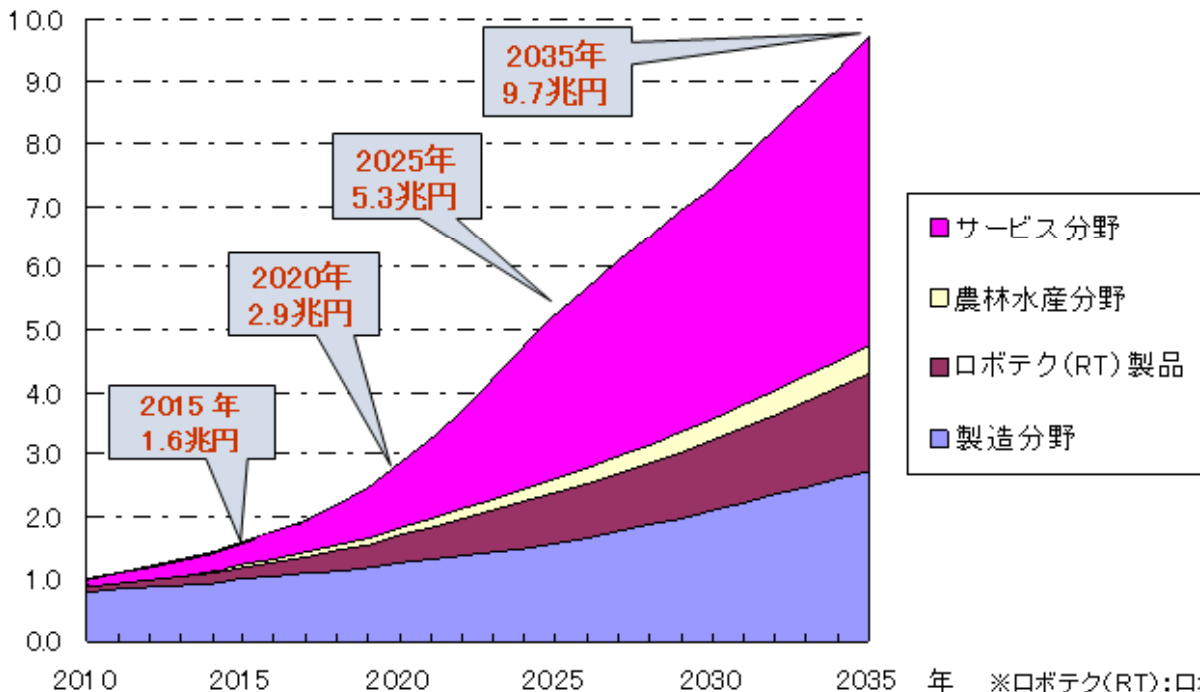
東京大学 大学院工学系研究科 精密工学専攻
浅間 一

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

2035年に向けたロボット産業の将来市場予測

2035年までのロボット産業の将来市場予測 (NEDO/METI 平成22年4月23日発表)

兆円



パーソナルサービス

医療(含手術, セラピー),
介護(含福祉用),
警備, 掃除, 案内, 教育,
アミューズメント, 娯楽, 等

パブリックサービス

メンテナンス,
災害対応,
建設・土木,
農業・林業,
地雷探査・除去, 等

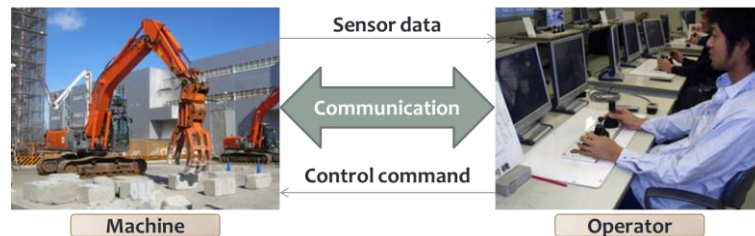
製造業を始めとした現在市場が形成されている分野の成長に加え、サービス分野を始めとした新たな分野へのロボットの普及により、2035年に9.7兆円まで市場拡大し得る。

人共存ロボティクスが求められる場面 (開発者やユーザとのインタラクション)

- 協働ロボット
- アシストスーツ
- 手術ロボット
- 介護支援(介護者, 被介護者)
- セラピーロボット
- 遠隔操作
- 自動運転
- サービスロボット
- VR, 他



Walking Assist Device 2013.05.28



新型コロナウイルス対策のための ロボット技術のニーズと導入事例

感染を予防するために制約されていること

- 人同士の**接触**
- 3密
 - 密閉空間
 - **密集**場所
 - **密接**場面



ロボット技術のニーズ

新型コロナウイルスの集団発生防止にご協力をお願いします

3つの**密**を避けましょう!

①換気の悪い**密閉空間** ②多数が集まる**密集場所** ③間近で会話や発声をする**密接場面**

新型コロナウイルスへの対策として、クラスター(集団)の発生を防止することが重要です。
日頃の生活の中で3つの「密」が重ならないよう工夫しましょう。

3つの条件がそろう場所が
クラスター(集団)発生の
リスクが高い!

※3つの条件のほか、共同で使う物品には
消毒などを行ってください。

首相官邸 Prime Minister's Office of Japan 厚生労働省 厚労省 コロナ 検索

ロボット技術のニーズ

人同士が接触せずにサービスを提供する

- 直接的ニーズ(医療)

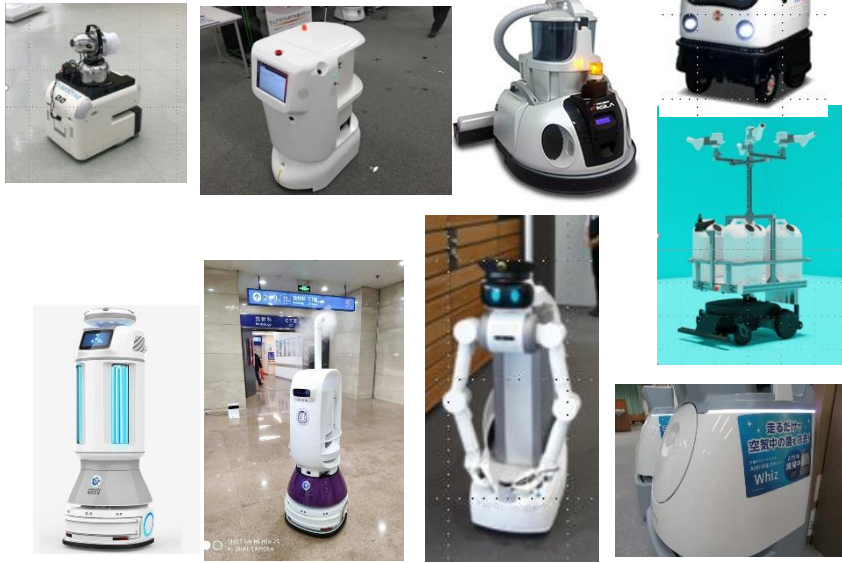
- 延命措置, 治療
- 検査
- 患者の搬送: モニタリング・見守り
- 消毒・洗浄・汚染物処理・廃棄
- 搬送(食事, 薬)

- 間接的ニーズ

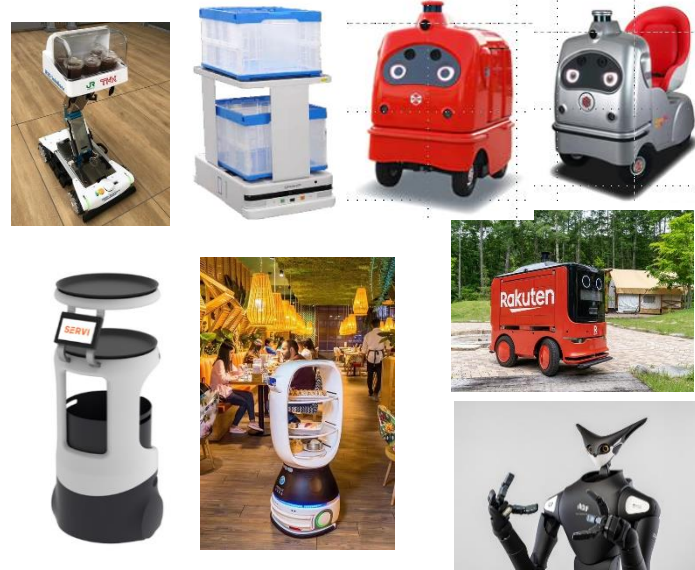
- 配達・配膳・配達・運搬・搬送(食事・薬)
- 遠隔コミュニケーション(含接客, 見守り)
- 消毒
- 検温

導入／実証試験の事例

消毒・清掃



配送・配膳・陳列・搬送



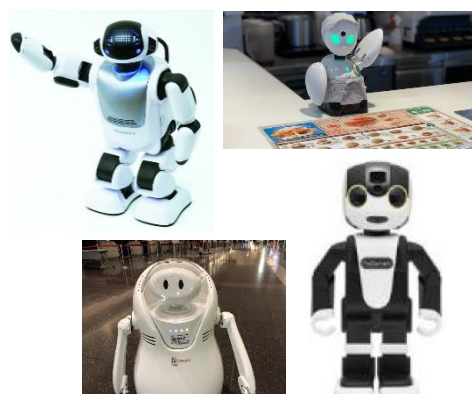
検温



検査



コミュニケーション



受付・接客



見守り



ポストコロナ社会 (With/After/Post Corona)

新型コロナウイルスが社会にもたらした功罪

功

- デジタル化 (ICT (ネットワーク) による接続)
- On-line化, On-demand化によるサービス
- 働き方改革, Diversity & Inclusion

罪

- 物理的・情動的インタラクションの制約
- 様々な機会 (サービスを含む) の喪失
- 健康への影響
- 多忙

With/After/Post コロナ社会の制約

- 情動的インタラクション → 一部可能, 一部制約
→ ICT(5G), デジタル技術, AIである程度は可能
対面コミュニケーションと同等とは言えない

失うもの

- 場の雰囲気 → コミュニケーションの手がかり
- 視線の共有 → 共同注意

ノンバーバル・コミュニケーション

ジェスチャーや目の表情などが言語と同時に、何かを伝達するための手段となっている。人と人が直接かかわりあい、情報、感情などをコミュニケーションする時、ジェスチャーなどの非言語行動に負うところが多い。

この分野は言語学、文化人類学、動物行動学、心理学、コミュニケーション学、社会学などにかかわる学際的アプローチによって開拓されつつある。

身体の動きや顔の表情の研究

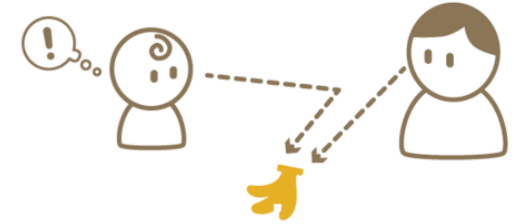
- (1) 表象(エンブレム)(yes/no, 静かに!)
- (2) 身体操作(ボディ・マニピュレーション)
- (3) 例示的動作(イラストレーター)
- (4) 情動表出
- (5) 規制的動作(レギュレータ)



W.フォン・ラフラーエンゲル:ノンバーバル・コミュニケーション(本名信行、他訳)、大修館書店、1994

照れ隠しに頭を掻く(今時、誰もしないか)、何か気が付いたとき指をパチンと鳴らすか、手の平を拳で打つ、電話をしながらしきりにおじぎをする

共同注意 (Joint attention)



- 共同注意とは、他者の注意の所在を理解しその対象に対する他者の態度を共有することや、自分の注意の所在を他者に理解させその対象に対する自分の態度を他者に共有してもらう行動を指す。
- ヒトにおいて、狭義の共同注意に関する行動はだいたい生後9か月頃から出現すると言われている。それは、大人がいる時に乳児が見てほしいものを指さす(指さし行動)、大人がある対象物を見てそれを乳児も見る(視線追従)、乳児がある対象に対する評価を大人の表情などを見ることで参考にする(社会的参照)などである。
- この狭義の共同注意では、乳児は、大人の行動の意図をある程度理解し、注意対象に対する態度(例:それは危ないから近づいてはいけない)を共有していると考えられている。ただし、最近では、他者の意図理解の伴わない乳児の視線の移動など、3・4か月頃に見られる、より単純な行動も広義の共同注意とされ研究されている。類似の概念として、自己と他者とその注意共有対象となるものの三者の関係を表す三項関係があり、三項関係において共同注意は達成されているとする。一方、三項関係以前の、注意共有対象を含まない自己と他者だけの1対1のやりとりは二項関係と呼ばれ、三項関係とは区別される。

With/After/Post コロナ社会の制約

- 物理的インタラクション→制約

ロボット技術によって一部可能になると思われるが、技術的にまだほとんど不可能

失うもの

- 物理的接触→体性感覚
- 反応時間・間→実時間性

フィジカル・インタラクション

- 体性感覚

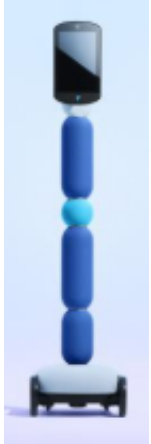
体性感覚とは触覚、温度感覚、痛覚の**皮膚感覚**と、筋や腱、関節などに起こる**深部感覚**から成り、内臓感覚は含まない。皮膚感覚が皮膚表面における感覚であるのに対し、深部感覚とは身体内部の感覚を意味する。後者は**固有感覚**または**自己受容感覚**とも呼ばれ、筋受容器からの伸縮の情報により、身体部位の位置の情報が得られる。

[体性感覚 - 脳科学辞典 \(neuroinf.jp\)](http://neuroinf.jp)



川平法(促通反復療法)(川平和美先生: 感覚フィードバックを返すことによるリハビリ(脳機能の回復))

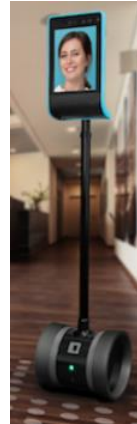
アバターロボット



Newme
(avatarin)



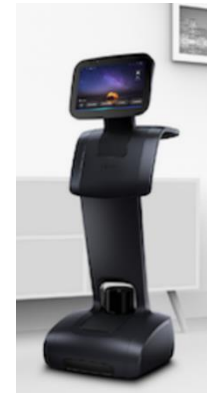
オムニロボ
(ISO総合研究所)



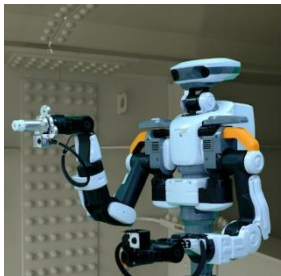
Double 3
(テックファームHD)



Ugo
(Mira Robotics)



Temi
(hapi-robot)



アバターロボット
(川田テクノロジーズ)



JET
(日本航空)



ホンダ
(アバターロボット)

サイバネティックアバター

2050年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現



フィジカル・インタラクション

- 体性感覚
- ボディ・タッチ



ボディタッチは相手との距離感を縮める方法

<https://successbeginstoday.org/topics/32/>



川平法(促通反復療法)(川平和美先生: 感覚フィードバックを返すことによるリハビリ(脳機能の回復))

オキシトシン

(愛情ホルモン／癒しホルモン)

人と人との肉体的な接触や、簡単なボディタッチでも分泌されるというこのオキシトシン。IT革命の副作用で、「現実(リアル)=オフライン」での触れ合いの機会がどんどん減少して、触るものといえば「キーボードかスマホ画面」という、21世紀ニュータイプなわれわれ現代人は、明らかに「オキシトシン不足」になりやすい状況にいます。



NHK ガッテン！「痛み & 認知症に効く！「癒やしホルモン」の驚きパワー」2016年6月1日
<https://www9.nhk.or.jp/gatten/articles/20160601/index.html>

反応時間・間 実時間性

身体意識

運動主体感

Sense of Agency (SoA)

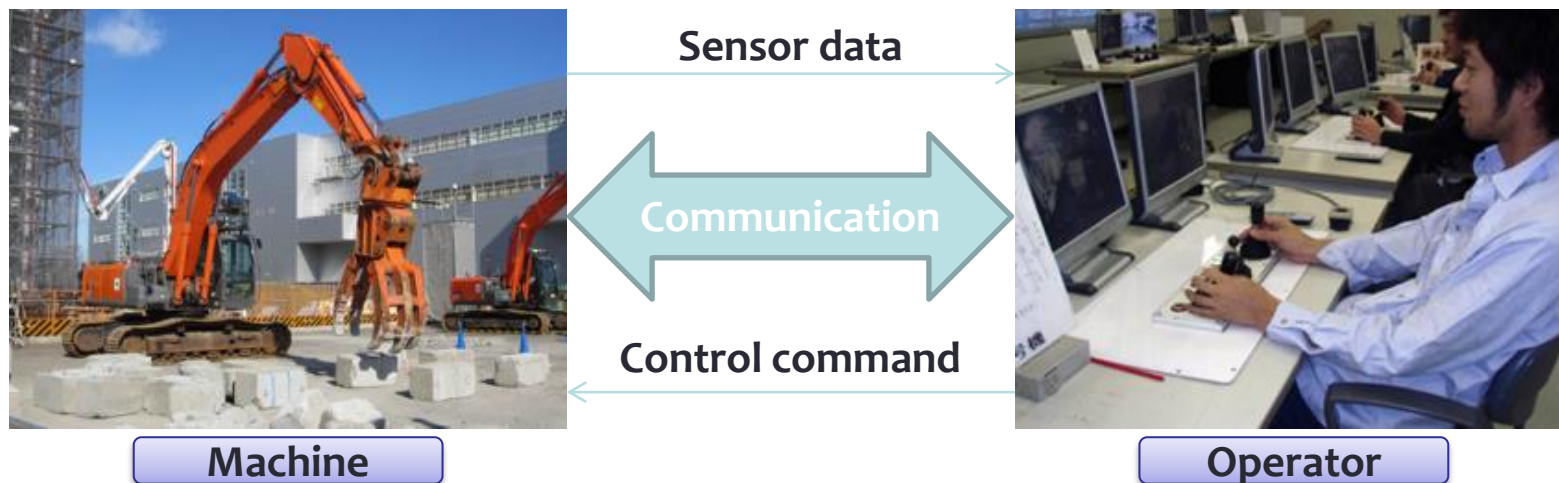
自己の身体運動の主体が自分であるという感覚

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

遠隔操作における時間遅れ



運動主体感 (SoA: Sense of Agency)

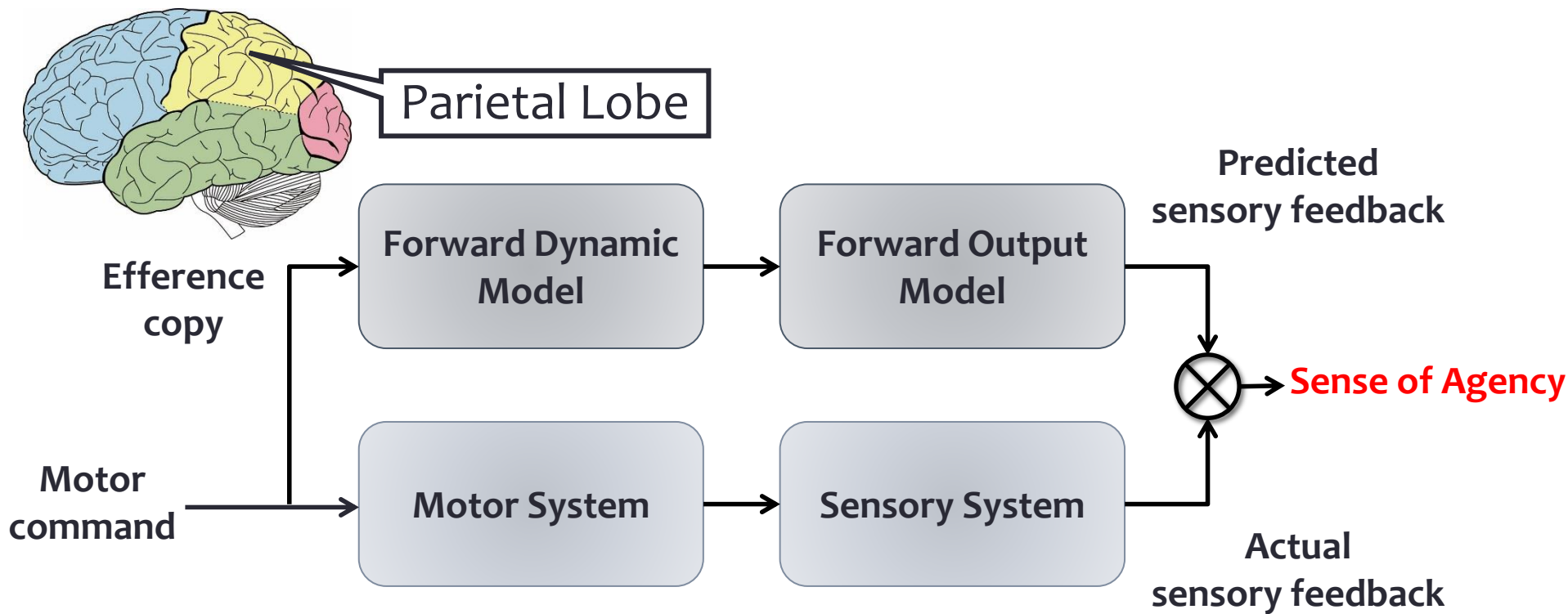
- 自己の身体運動の主体が自分であるという感覚
 - 脳内で生起
 - 主体の能動的運動に関連

[Farrer 2002]



動かしたのは
自分じゃない

コンパレータ(フォワード)・モデル

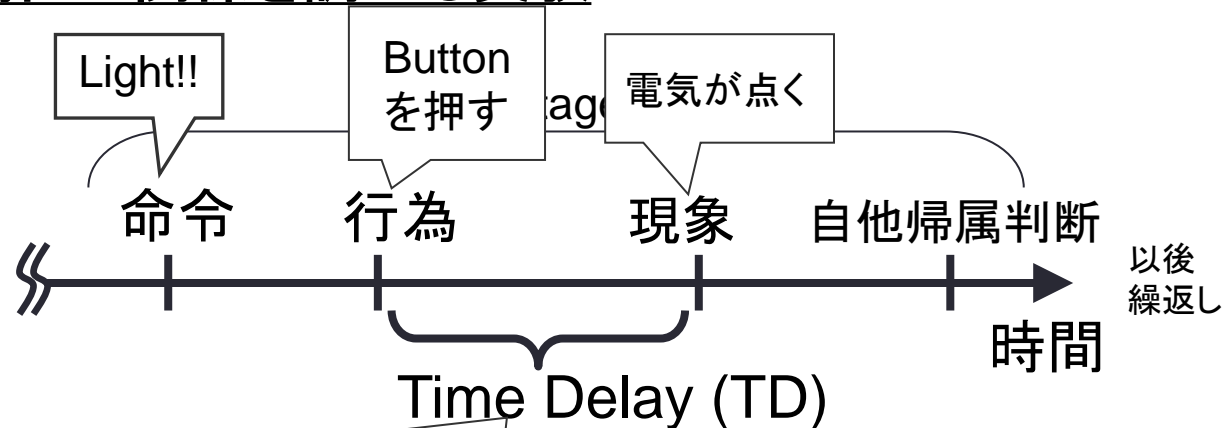
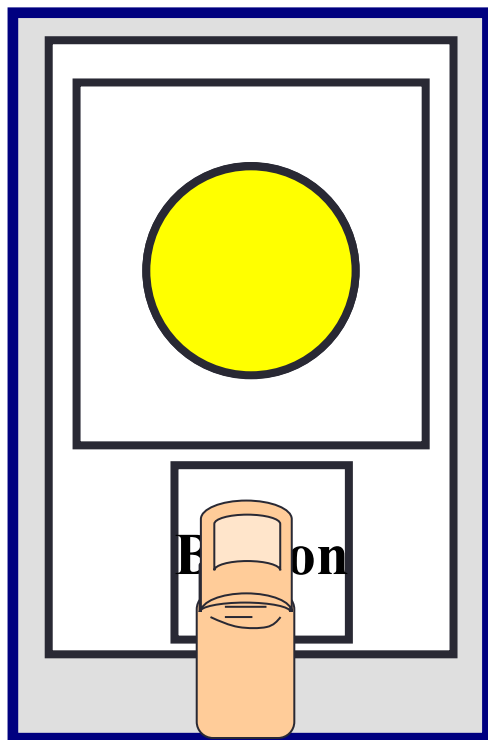


(Blakemore, 2003)

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)

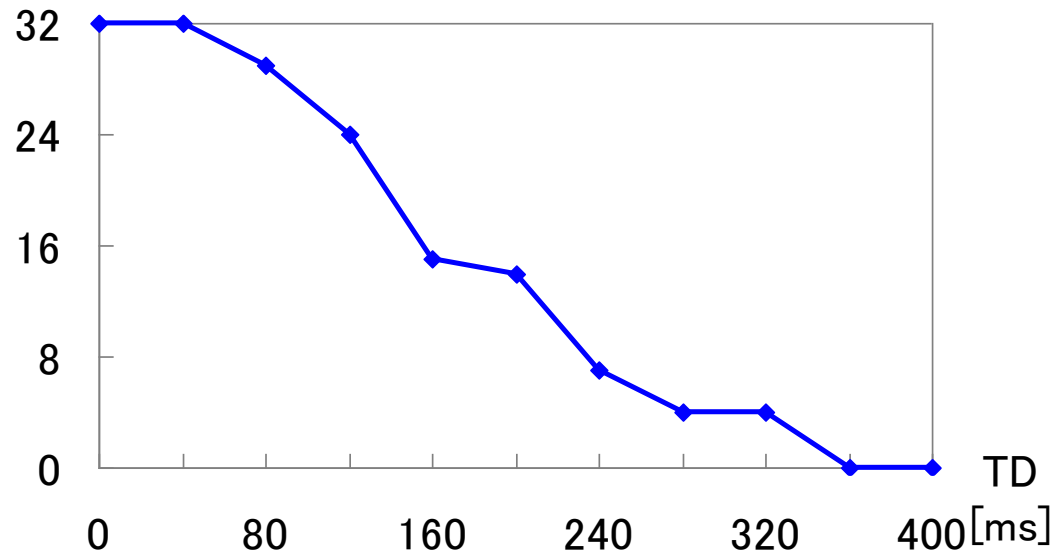
自他帰属の判断:

- 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

認知能力

- **in Passive Condition**

- Cognition from Perception
- Prediction only based on Perception



- **In Active Condition**

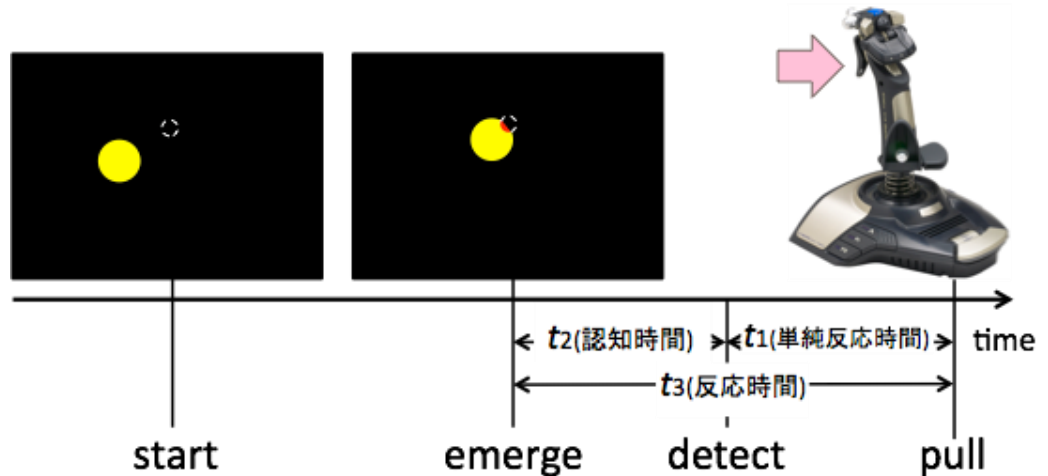
- Cognition from Perception
- Prediction based on not only Perception but also SoA Automatically Driven by Active Interaction



実験概要

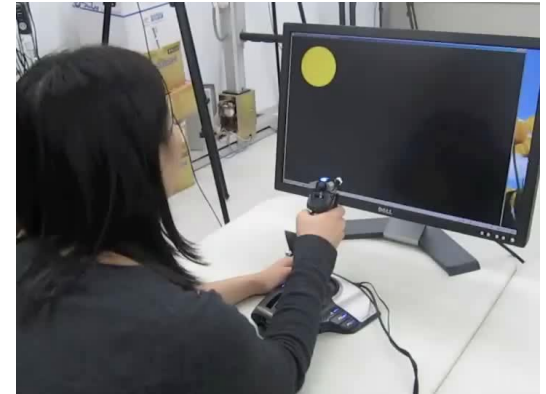


- 暗い環境内にあるターゲットを, サーチライトを用いて探索する, という視覚探索課題を行う
- ターゲットを発見したら即座にトリガを引き, ターゲット出現からトリガを引くまでの反応時間(t_3)を測定する
- 認知時間 (t_2)を認知能力の指標とする ($t_2 = t_3 - t_1$)

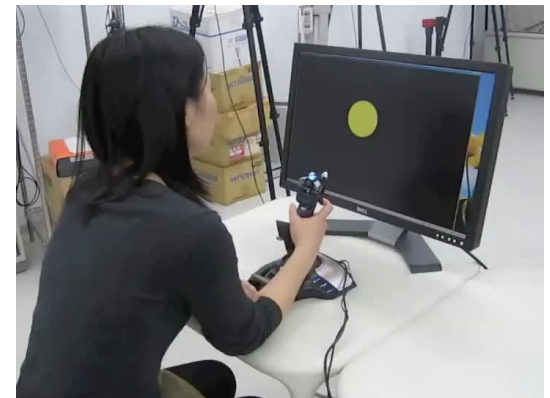


実験(能動性)

- 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



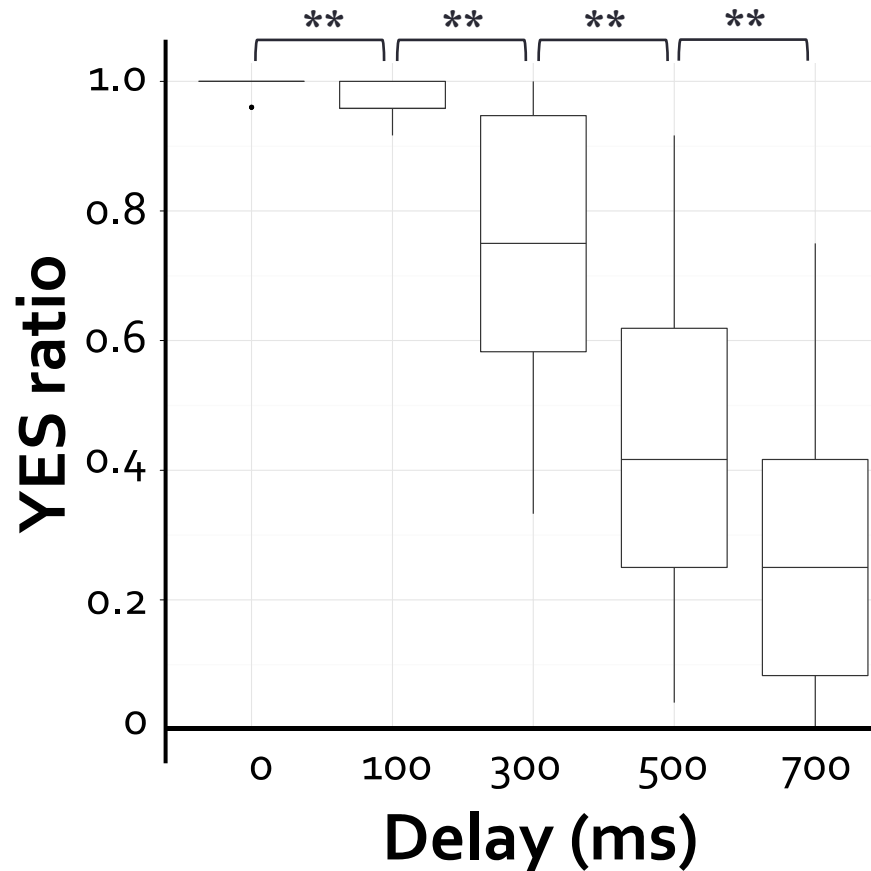
能動的



受動的

Result: *Temporal delay vs. YES ratio*

YES ratio: Participant felt that he/she moved the searchlight by him/herself.



Wilcoxon signed rank test with Holm's correction:
There are significant difference between every two conditions ($p < 0.01$)

能動／受動条件における反応時間(時間遅れなし)

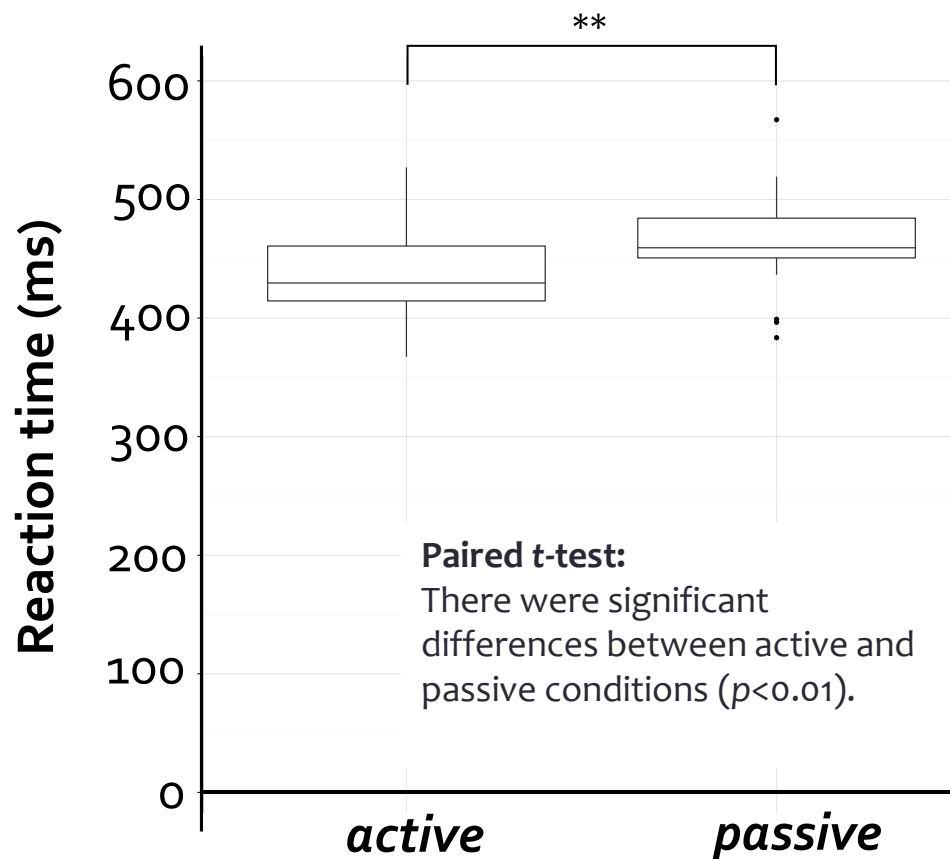
Active: Participants use the joystick to control the searchlight.

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.



新型コロナウイルス対策ロボット技術

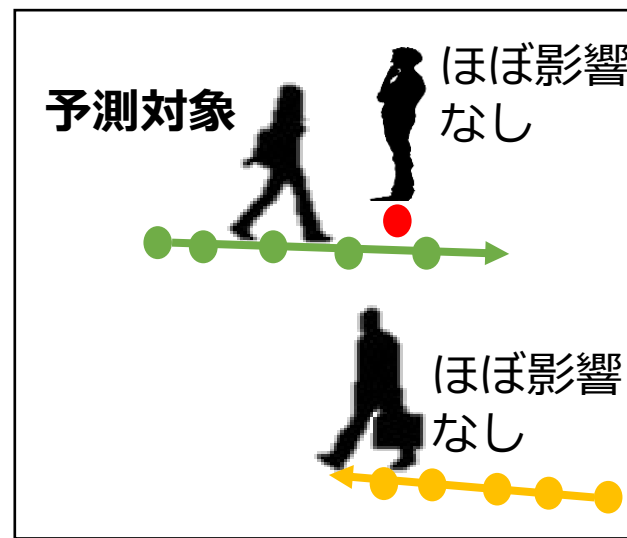
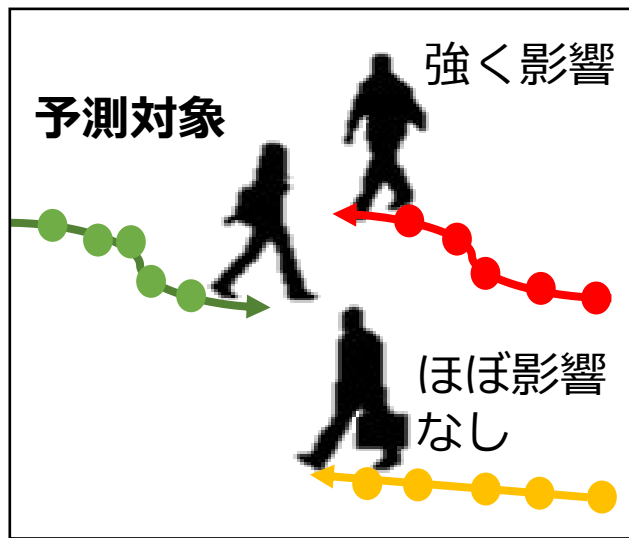
- 課題
 - 技術的課題
 - 社会的課題
 - 科学的課題

サービスロボットの社会実装の課題

- 課題
 - 技術的課題
 - 人とのインタラクション
 - 遠隔操作性と自律性
 - 社会的課題
 - 科学的課題

周辺他者との関係を考慮した予測

近くにいるからといって影響を受けるとは限らない



歩行者間のインタラクションを学習可能な
データドリブンの歩行者モデル

Smartphone Zombies

歩きスマホ

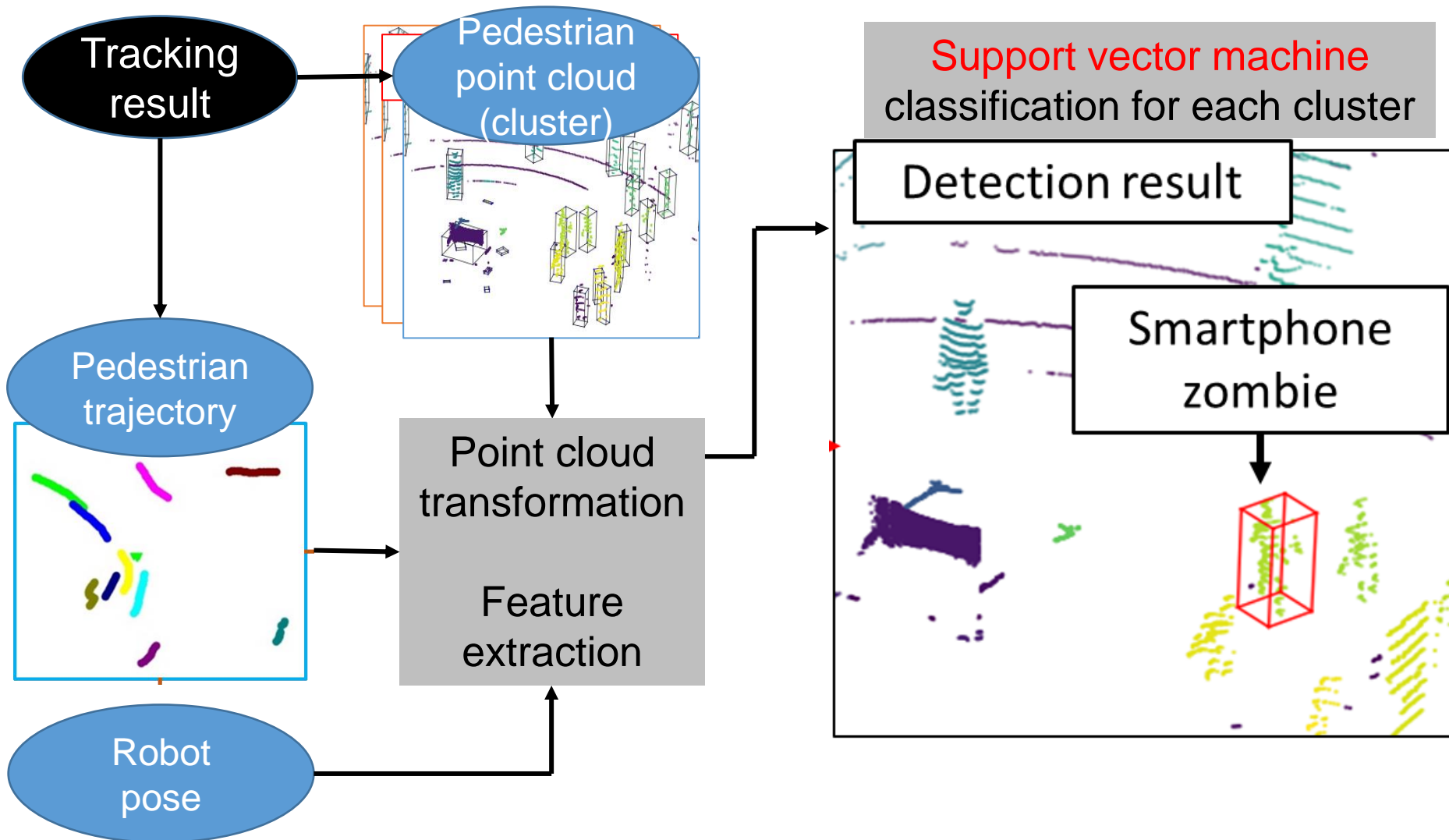


...Smartphone zombies: should walking and texting on streets be banned?

<https://www.youtube.com/watch?v=oUOcQMYS8EI>

Copyright (c) Hajime Asama, Univ. of Tokyo. All rights reserved 2023 34

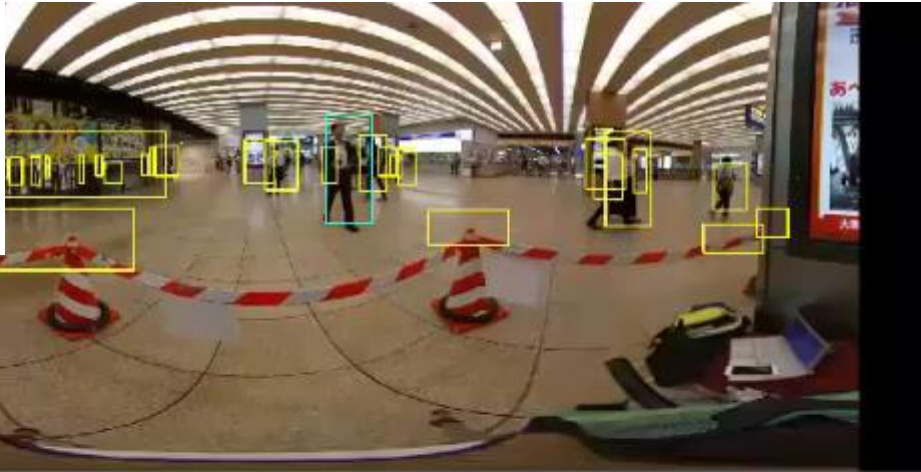
Overview of smartphone zombie detection



Data collection for training smartphone zombie detector

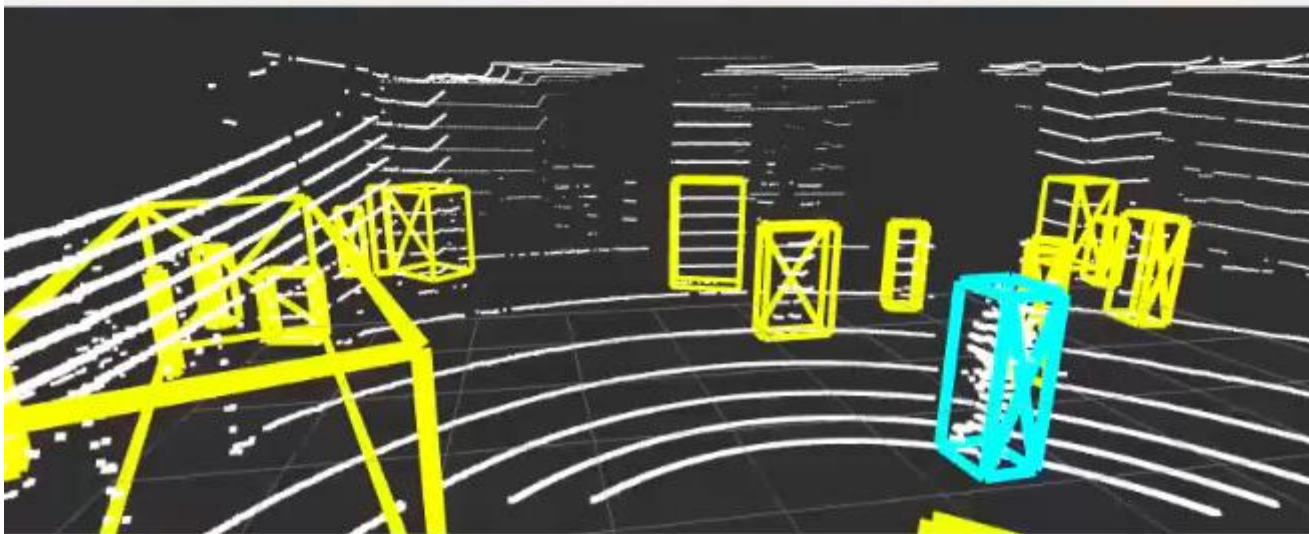
New dataset collected from two stations at 2019.2.21 and 2019.7.3

Osaka
abenobashi
station



 Other object
 Smartphone zombie

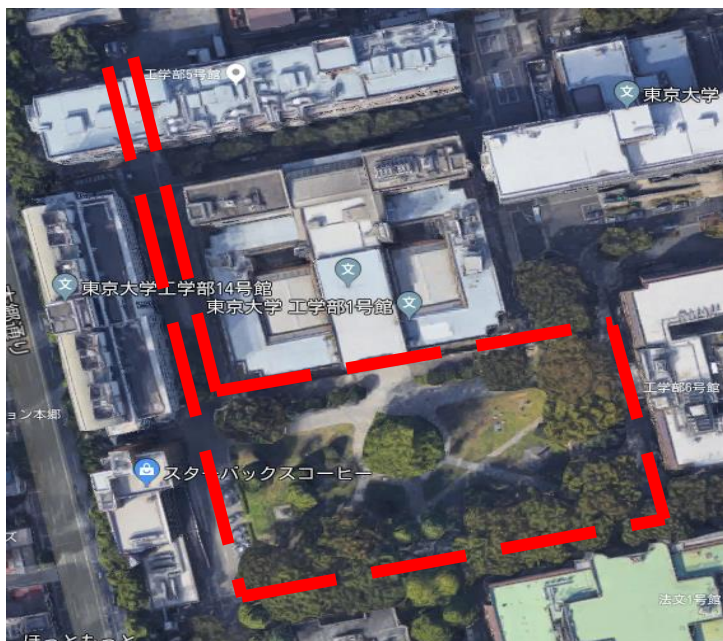
- Point cloud: Velodyne LiDAR
- Image: spherical camera (Ricoh Theta V)
- Label: manual annotation



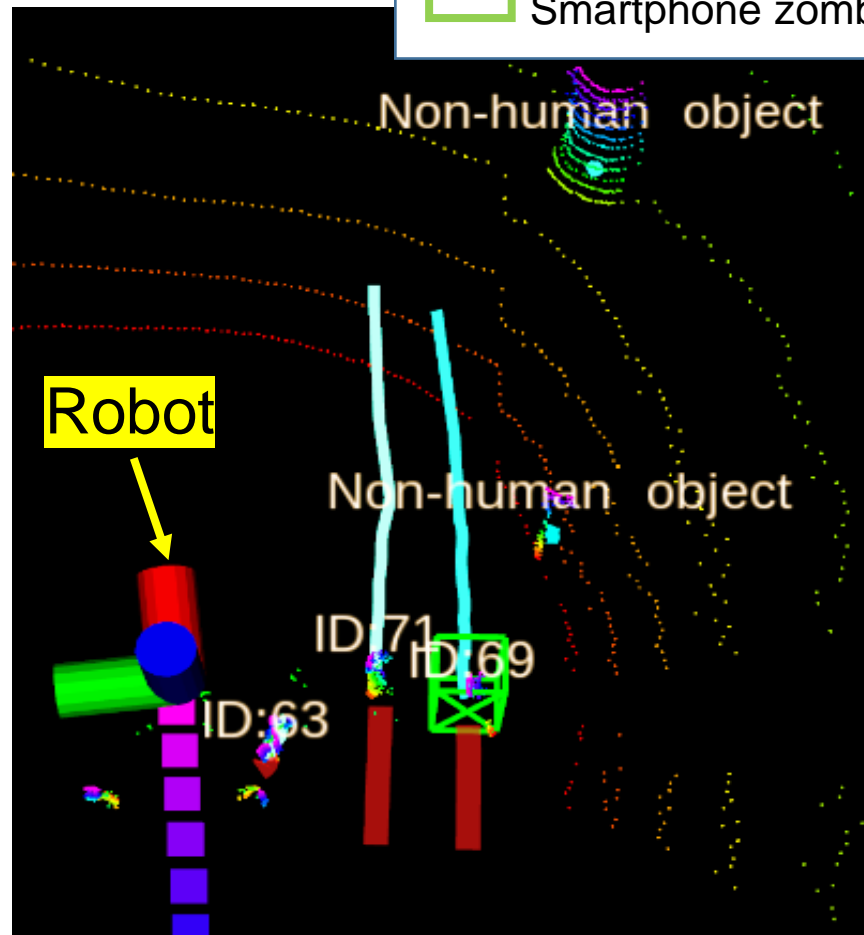
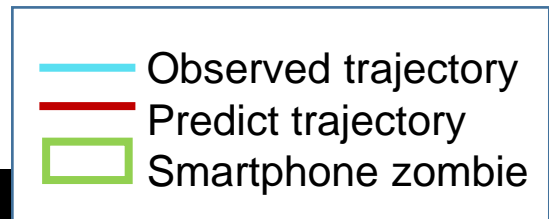
5/27/2023

Experiments

- The robot moving inside Hongo campus
Approximately 15 minutes of LiDAR stream
were used in evaluation

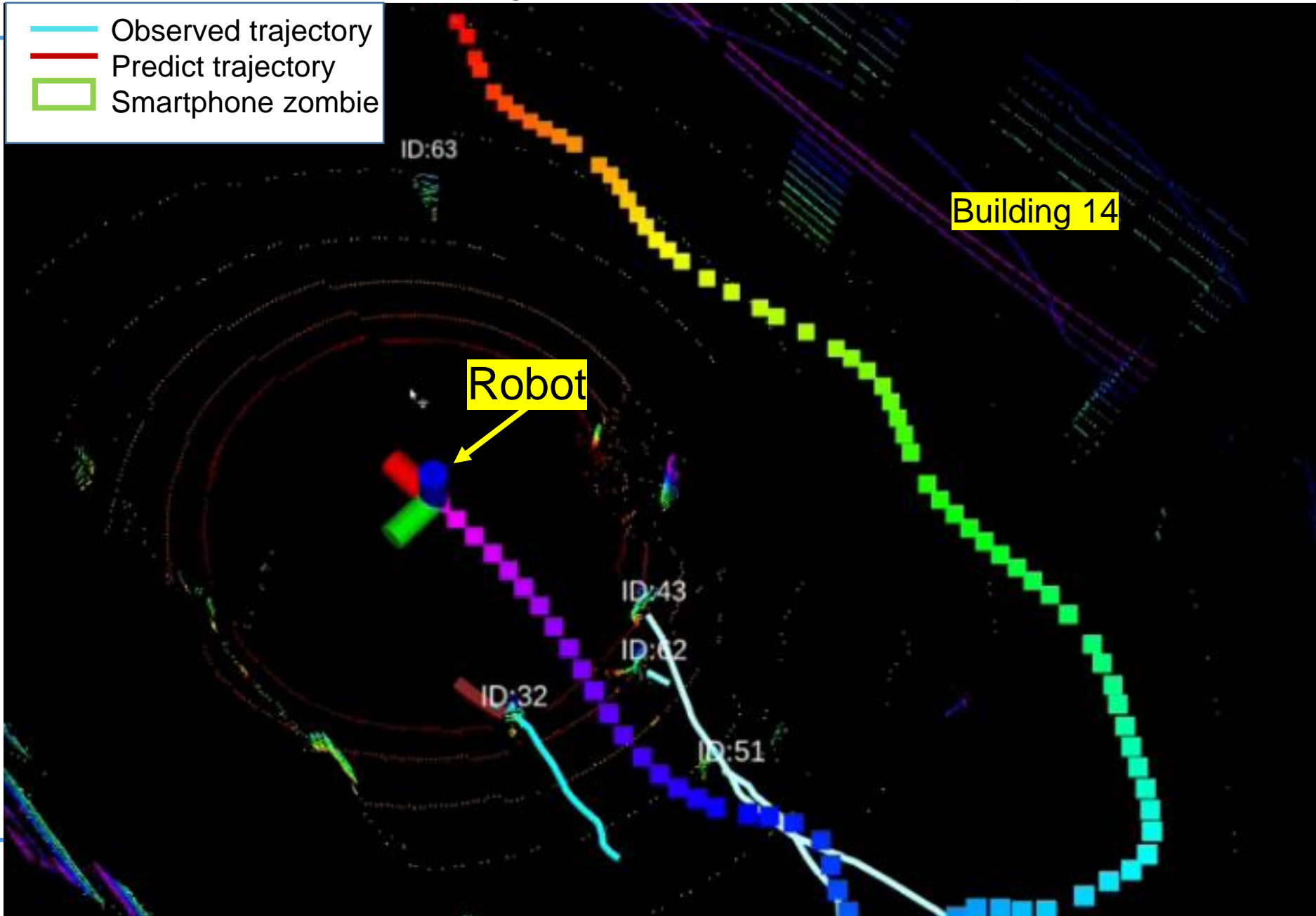


Experiment area in
Hongo campus

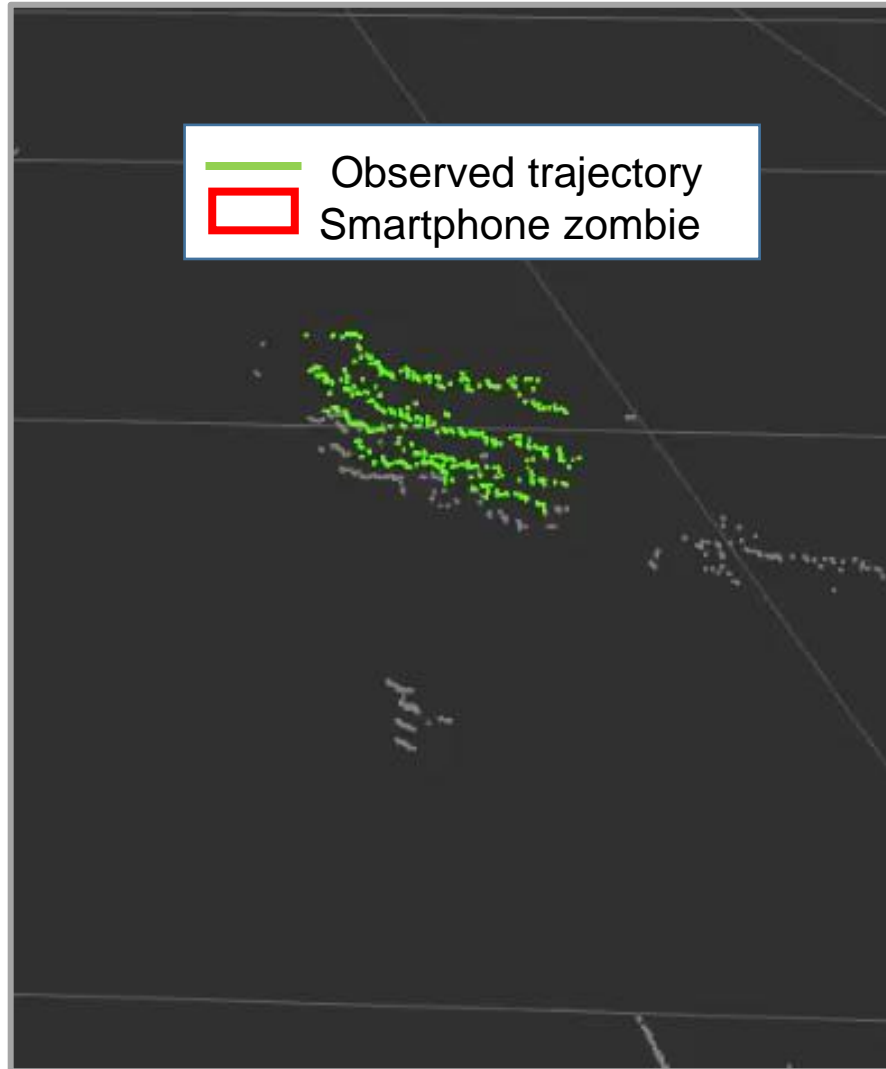


Video recorded during experiments – trajectory prediction

- Observed trajectory
- Predict trajectory
- Smartphone zombie



Video recorded during experiments – smartphone zombie detection



新型コロナウイルス対策ロボット技術

- 課題

- 技術的課題

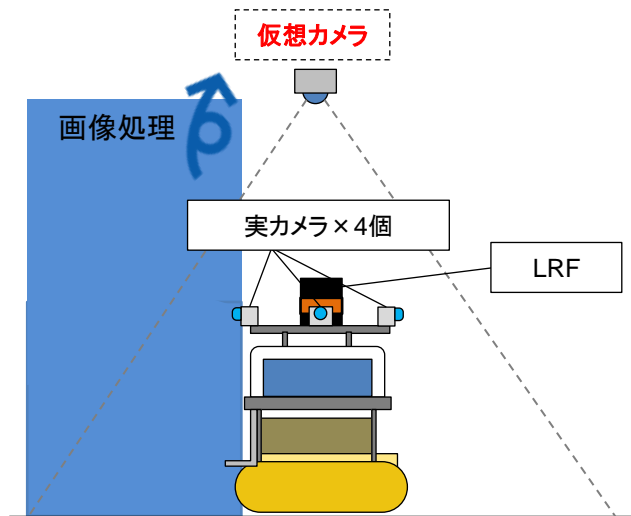
- 人とのインタラクション
 - 遠隔操作性と自律性

- 社会的課題

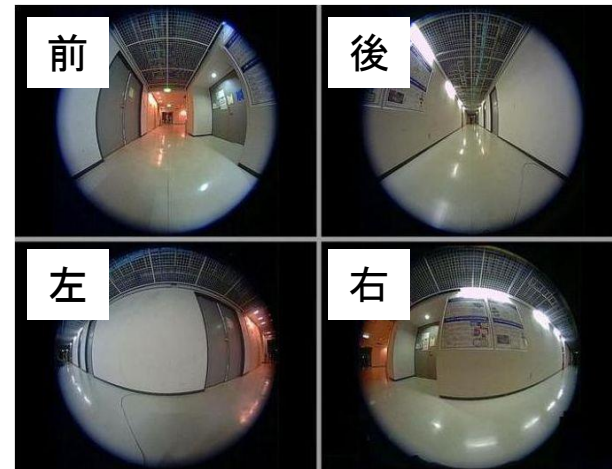
- 科学的課題

コンセプト

- 複数の魚眼カメラを画像処理して仮想カメラを生成
- LRF (測距センサ) を使用



俯瞰画像コンセプト



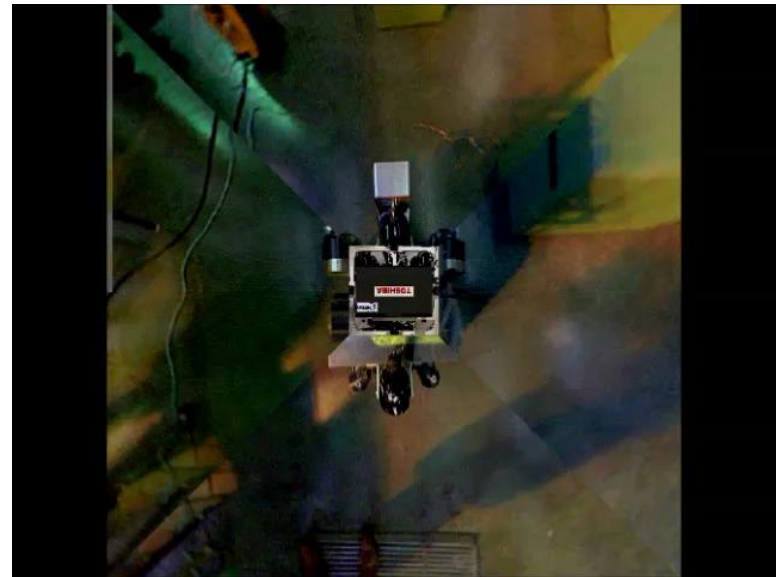
複数の魚眼カメラ(視野180°)

実装成果

(NEDO) 災害対応無人化システム研究開発プロジェクト



狭い通路



俯瞰画像

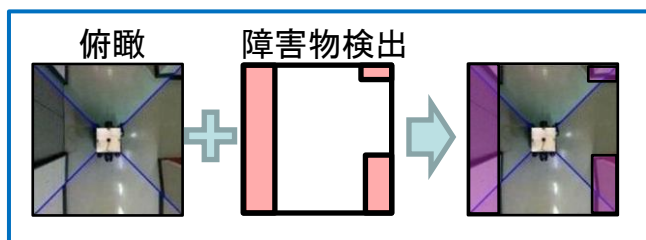
測域センサを加えた俯瞰映像

カメラ+測域センサによる災害対応向

障害物重畳機能

障害物を俯瞰映像上で可視化

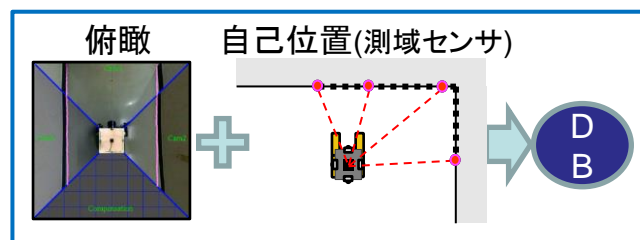
障害物を容易に把握可能



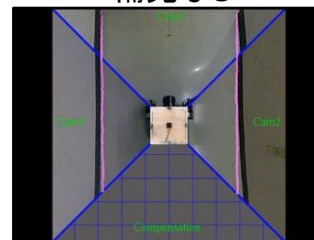
欠損補完機能

欠損部分を過去映像で補完

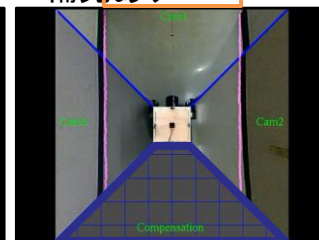
カメラ信号がない場合も対応可能



補完なし



補完あり



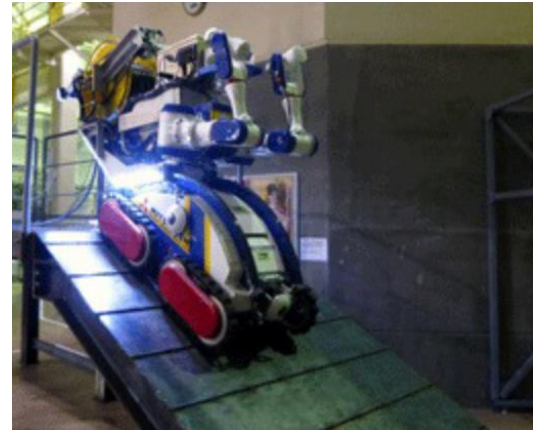
12

福島第一原子力発電所廃止措置のためのロボットへの応用

MHI Super Giraffe



MHI MEISTeR



無人化施工における俯瞰映像提示

- 実験風景



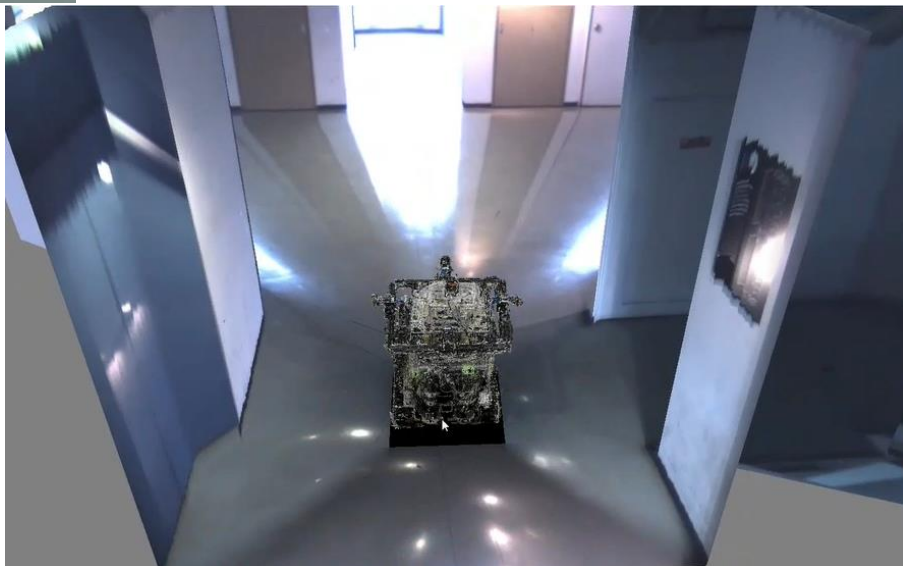
- 3パターンの映像提示



建設機械(バックホウ)の遠隔俯瞰映像提示 (前方映像+俯瞰映像)



任意視点からの俯瞰映像提示

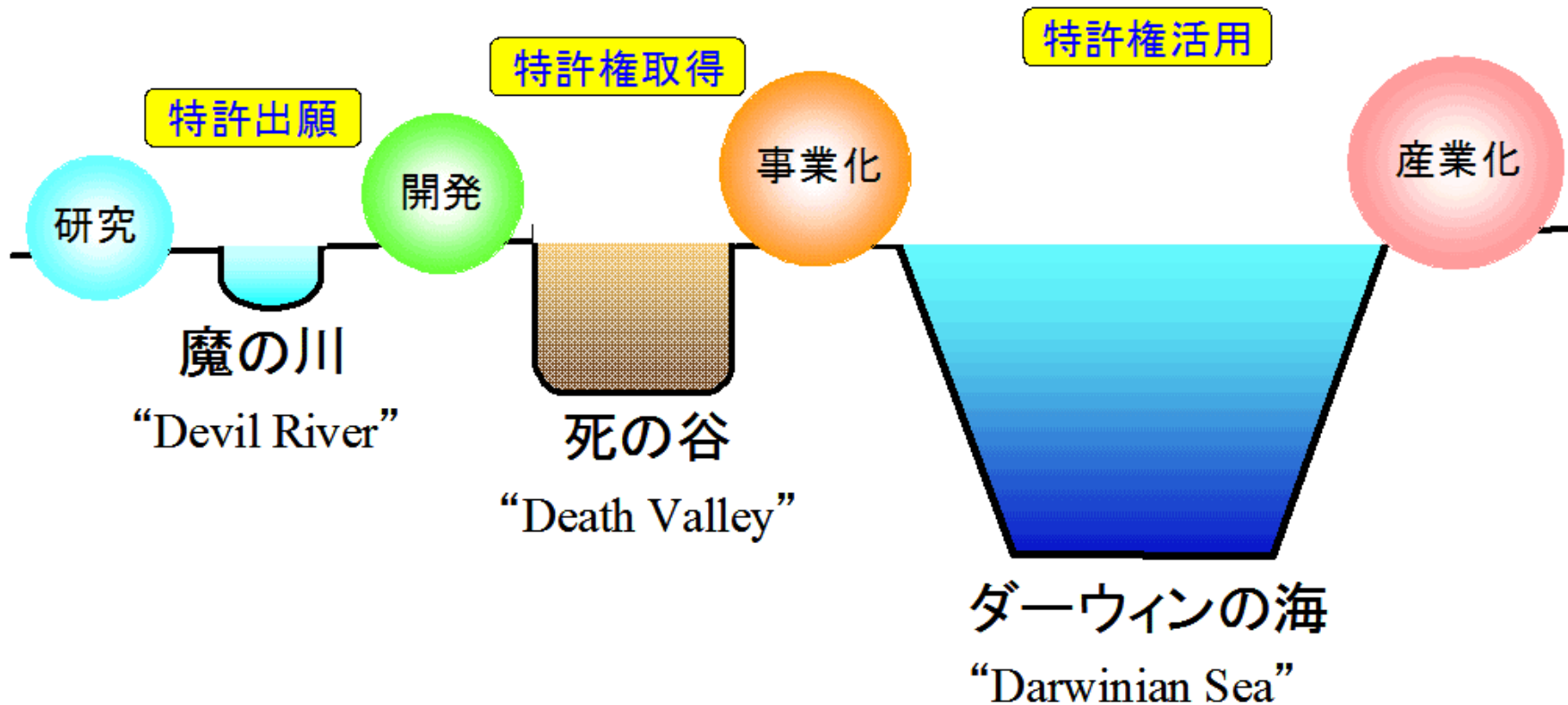


新型コロナウイルス対策ロボット技術

- 課題
 - 技術的課題
 - 社会的課題
 - 実用化・事業化
 - 安全安心
 - ELSI
 - 科学的課題

研究開発から社会普及まで

魔の川 死の谷 ダーウィンの海



http://www.sangaku.nagoya-u.ac.jp/ipo/04_kiso/jittai.html

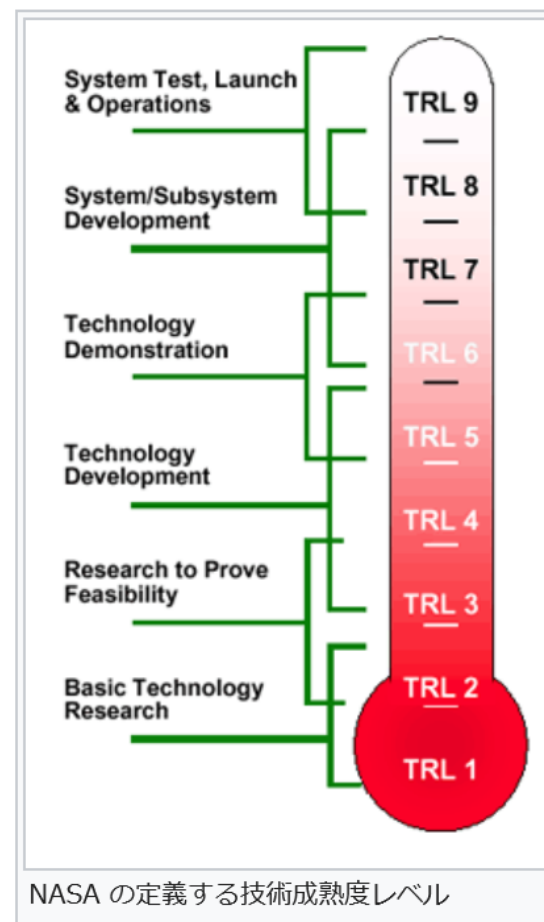
技術成熟度レベル

TRL: Technology readiness levels

(Wikipedia)

NASAによるTRLの定義

- Level 1 基礎理論の着想段階
- Level 2 技術要素の適応、応用範囲の明確化
- Level 3 技術実証のデモンストレーション(Proof of Concept)この段階から、実証試験等を行い検証を始めていく
- Level 4 ラボレベルでの実証
- Level 5 シミュレート及び実空間での実証
- Level 6 地上でのシステムとしての技術成立性の確認
- Level 7 宇宙空間でのシステムとしての技術成立性の確認
- Level 8 システムの運用テスト、認証試験
- Level 9 最終段階、実運用



サービスロボットの社会実装の課題

- 課題
 - 技術的課題
 - 社会的課題
 - 実用化・事業化(ヒトの理解)
 - 安全安心
 - ELSI
 - 科学的課題

安全・安心とは

安全

もの:技術 ?

安心

人:心理

受容できないリスクがないこと
[ISO/IEC Guide 51 : 1999]

報告:工学システムに対する社会安全目標の基本と各分野への適用
(日本学術会議総合工学委員会・機械工学委員会合同工学システムに関する安全・安心・リスク検討分科会)

受容するのは、人／社会

認知心理学／社会心理学的アプローチも重要

ALARPの考え方

As Low As Reasonably Practicable

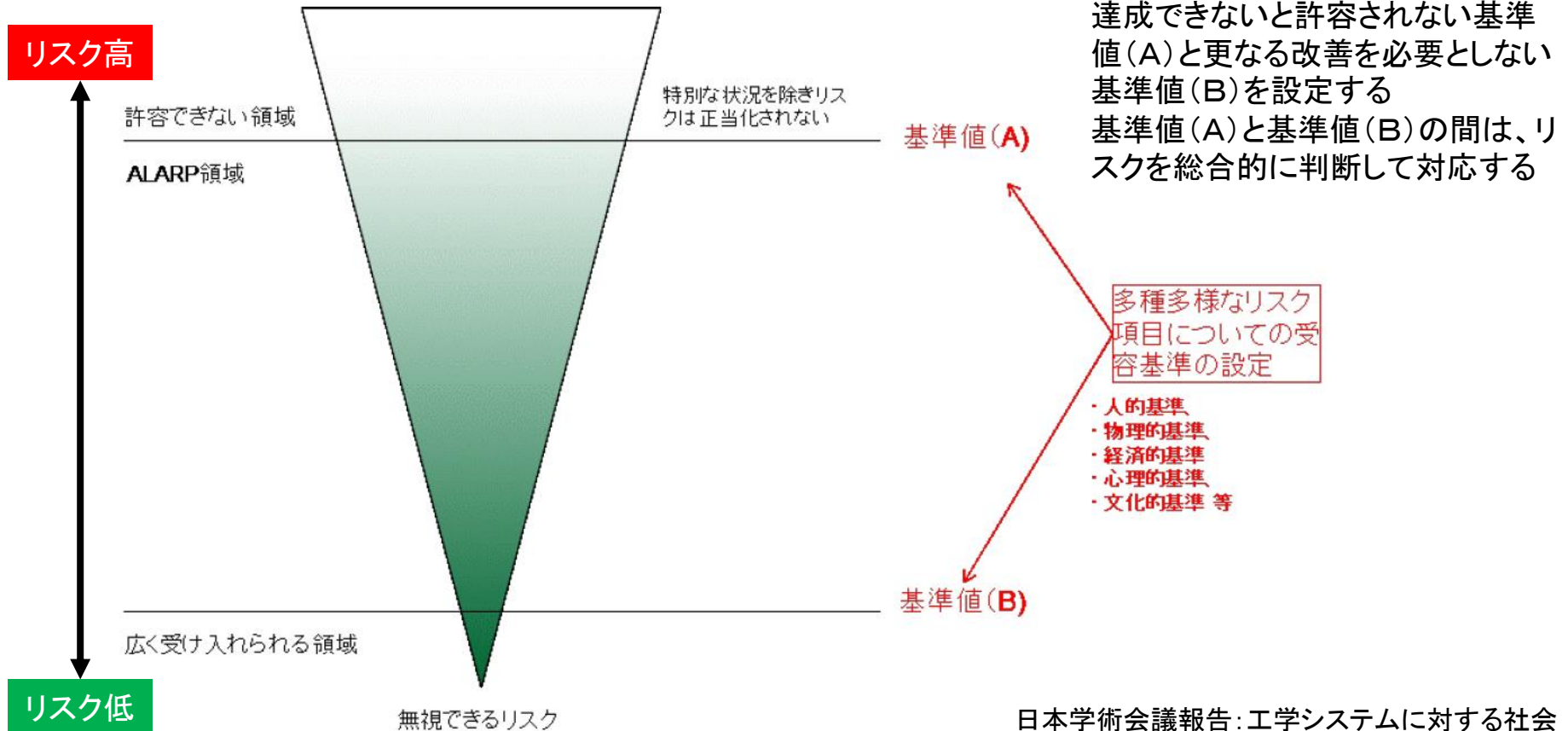


図1 安全目標の基本概念

日本学術会議報告:工学システムに対する社会安全目標の基本と各分野への適用, 2017

サービスロボットの社会実装の課題

- 課題
 - 技術的課題
 - 社会的課題
 - 実用化・事業化(ヒトの理解)
 - 安全安心
 - ELSI
 - 科学的課題

倫理

- 人道的視点・人権・平和
- セキュリティ
- プライバシー
- デュアルユース, 安全保障

ロボット倫理学Roboethics (Wikipedia)

- ロボット倫理学(ろぼつとりんりがく)とは、ロボットに関する倫理的問題を扱う、応用倫理学の一分野である。英語ではrobot ethicsまたはroboethicsと呼ばれる。「ロボット」という言葉で指される対象の範囲は明確ではないが、ロボット倫理学においては自律的機械の他にも、ドローンなどの遠隔操作される機械、いわゆる「ボット」のようなソフトウェアエージェント、パワードスーツなども議論の対象にされている。
- 現在、ロボット技術の高度な発展に伴い、医療ロボットや軍事ロボットのように人の生死に直接的に関わるロボット、家事ロボットやペットロボットのように一般市民の生活に密着したロボットが多く現れており、ロボットが人間や社会と関わる場面、そして与える影響は大きくなっている。こうした状況を背景にロボット倫理学は、ロボットとロボット工学に特有の倫理的な問題を扱う応用倫理学の一分野として誕生し、発展してきた。
- 最初にroboethicsという言葉を使ったのは、イタリアのロボット工学者ジャンマルコ・ヴェルジオ(Gianmarco Veruggio)である。彼は2000年にロボット工学と社会との関わりについて研究するためにScuola di Roboticaという協会を設立し、2002年に「ロボット倫理学Roboethics」という言葉を作り、その推進を提唱した[1]。2004年には彼が議長となりイタリアのサンレモでロボット倫理学の最初の国際会議First International Symposium on Roboethicsが行われた。
- ロボット倫理学が扱う話題は戦争における無人機や自律型兵器の使用の是非、コンパニオンロボットが人間の心理や人間同士の関係に与える影響、ロボットによる情報の収集とプライバシーの問題などがある[2]。特に戦争におけるロボット兵器の使用は、遠隔操作される無人爆撃機がアフガニスタンやイラクで使用され、多くの付随的損害を生み出していることや、アメリカ・イスラエル・イギリス・韓国などがさらに人間の監督・操作を要しない自律的なロボット兵器の開発を進めていることもあり、多くの関心を引いている[3]。

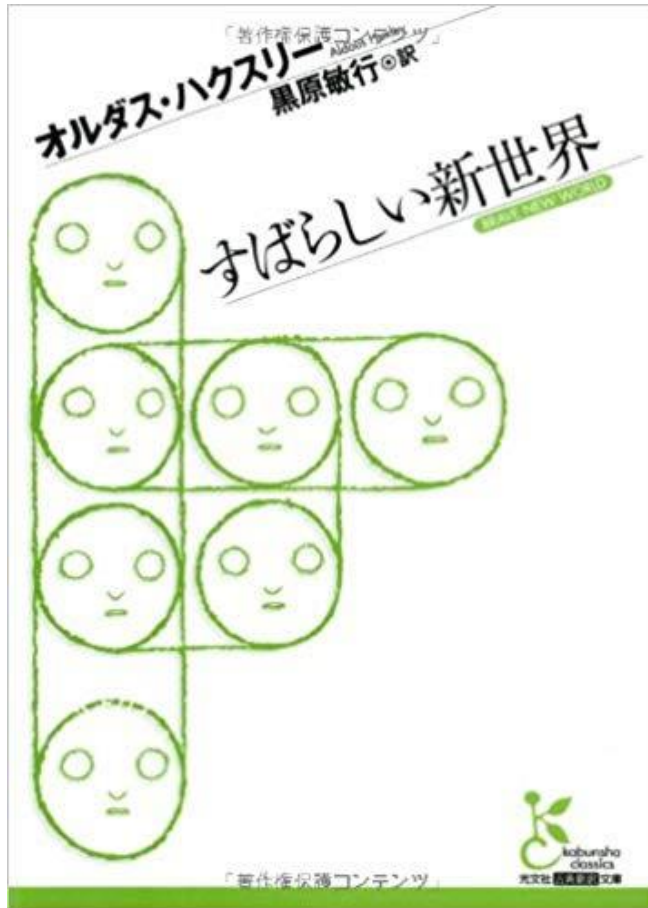
SFプロトタイピング

- SFを通じた未来予測を行い、未来に向けたビジョンを探究する手法
- 現実の科学技術をベースとしながら、虚構であるSFの発想で未来シナリオを予測する

<https://adv.asahi.com/keyword/13672815.html>

- フランケンシュタイン(倫理性について)
- アシモフ(倫理性について)
- 第二の地球
- 未来のイブ
- AI(あい)の遺伝子
- ロデリック(または若き機械の教育)

ユートピア/ディストピア小説



60歳ぐらいで死ぬまで、ずっと老いずに若い。

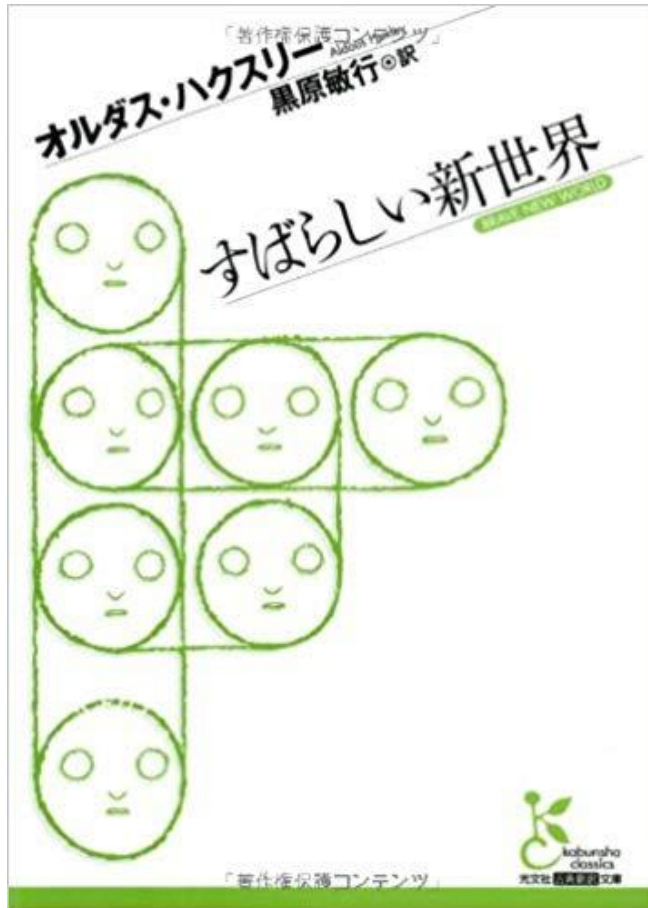
人々は生活に完全に満足している。

人々は、激情に駆られることなく、常に安定した精神状態である。そのため、社会は完全に安定している。

人々は常に一緒に過ごして孤独を感じることはない。

- ・ 隠し事もなく、嫉妬もなく、誰もが他のみんなのために働いている。「すばらしい世界」 (Wikipedia)

ユートピア/ディストピア小説



- また、あらゆる予防接種を受けているため病気になる事は無く、**60歳ぐらいで死ぬまで、ずっと老いずに若い。**
- ビンから出て「出生」した後も、**睡眠時教育**で自らの「**階級**」と「**環境**」に全く疑問を持たないように教え込まれ、人々は生活に完全に満足している。
- 不快な気分になったときは、「**ソーマ**」と呼ばれる薬で「**楽しい気分**」になる。人々は、**激情に駆られることなく、常に安定した精神状態**である。そのため、**社会は完全に安定**している。
- **ビンから出てくるので、家族はなく、結婚は否定**されて人々は常に一緒に過ごして孤独を感じることはない。
- **隠し事もなく、嫉妬もなく、誰もが他のみんなのために働いている。**一見したところではまさに**楽園**であり、「**すばらしい世界**」である。
(Wikipedia)

「快適さなんて欲しくない。欲しいのは神です。誌です。本物の危険です。自由です。美德です。そして罪悪です」

「要するに君は (...) **不幸になる権利を要求**しているわけだ」 (p.346)

クララとお日さま (カズオ・イシグロ)

- 社会はディストピア
- AF (Artificial Friend): 善
- 人間: 欠点のある存在



アフター・ヤン (SF映画)

監督 : Kogonada

人型ロボットがベビーシッターを務めるのが当たり前になった世界。ジェイクもまた娘(ミカ)の子守をロボット(ヤン)に任せていた。ところが、そんなある日、ヤンが突然動かなくなってしまった。もはや家族同然の存在となっていたヤンを救うべく、ジェイクは様々なアプローチを試みるが、その過程で「人間とは何か。人間と機械の違いはどこにあるのか」という問題に直面する。

<https://ja.wikipedia.org/wiki/アフター・ヤン>



法規制

- 規制緩和, 特区
- 規制強化(市場創出)
- 認証(安全認証等)
- 安全保障

ロボット新戦略

アクションプランー分野横断的事項④ ロボット関連規制改革の実行

- ◇ ロボットの活用を前提とした規制緩和及びルール整備の両面からバランスのとれた規制改革を推進。
- ◇ **ロボット革命イニシアティブ協議会を中心に随時、課題を整理**。政府の規制改革会議とも連携し、関連する諸制度を俯瞰した総合的な改革を実行。**ロボットバリアフリー社会**を構築。

◆ ロボットの利活用を支える新たな電波利用システムの整備(電波法)

(遠隔操作や無人駆動ロボットで使用する電波の取扱い(既存無線システムとの周波数共用ルール等、簡素な手続き))

→**2016年度までに要求条件の整理及び技術的検討を実施した上で、必要な措置を順次実施。**

◆ 新医療機器の承認審査迅速化(医薬品医療機器等法)

(患者の負担軽減等が期待される手術支援ロボット等、ロボット技術を活用した新医療機器の取扱い)

→承認審査の迅速化を図り、新医療機器については、**標準的な総審査期間(優先審査品目では10カ月)に処理できる割合を、2018年度に8割へ引き上げ。**

◆ 介護関係諸制度の見直し

(現行3年に1度となっている介護保険対象機器の追加手続きの弾力化(技術革新に対応できる要望受付・検討等))

→2015年より、**介護保険の給付対象に関する要望の随時受付**や**新たな対象機器の追加を随時決定。**

◆ 道路交通法・道路運送車両法

(搭乗型移動支援ロボットの公道走行)

→これまでの道路運送車両法に基づく基準緩和制度の活用に加え、**2014年中実施予定の「構造改革特区評価・調査委員会」の評価結果を踏まえて、2014年に創設された「企業実証特例制度」の活用も含め、搭乗型移動支援ロボットの取扱いについて検討していく。**

◆ 無人飛行型ロボットのためのルール作り(航空法等)

(災害現場等での利用に期待が高まる無人飛行型ロボット(UAV)の具体的な運用ルール)

→大型無人機について、国際民間航空機関(ICAO)で**2019年以降に想定されている国際基準改定に参画しつつ、併せて国内ルール化。**小型無人機に関して運用実態を把握し、関係法令等の整備を検討。

◆ 公共インフラの維持・保守関係法令

(ロボットの効果的・効率的な活用方法(目視等の人間を前提とした点検作業におけるロボット活用に関するルール))

→**2016年度までに各種ロボットの現場検証・試行、評価**を通じて、ロボットの有効活用方策を検討。その結果に基づきロボット活用を進める分野において、順次適用。

ロボット法研究会

- 組織
 - 情報ネットワーク学会
 - 主催者 新保史生(慶應義塾大学教授)
- 時期
 - 2016年5月発足, 5-6月で3回のシンポジウム開催
- 内容
 - ロボット法原則
 - 人間第一の原則, 命令服従の原則, 秘密保持の原則, 利用制限の原則, 安全保護の原則, 公開・透明性の原則, 責任の原則

サービスロボットの社会実装の課題

- 課題
 - 技術的課題
 - 社会的課題
 - 科学的課題
 - 適応的行動の実現(身体知能)

適応に関するシステム研究の歴史

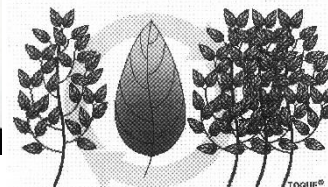
自律分散システム

(領域代表: 伊藤正美(名大), 平成2~4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

(領域代表: 北村新三(神戸大), 平成7~9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 —

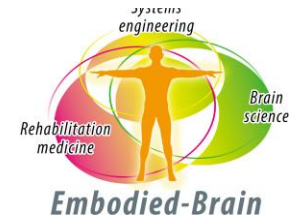
(領域代表: 浅間 一(東大), 平成17~21年度)
適応的運動／行動の発現メカニズムの解明



脳内身体表現の変容機構の理解と制御

(身体性システム)

(領域代表: 太田 順(東大), 平成26~30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)

(領域代表: 太田 順(東大), 令和元~5年度)
生体構造の再構成／行動遂行則の再編成





■ ホーム

□ 移動知とは

- 本領域の概要
- アプローチ
- 期待される成果

□ シンポジウム・OS・チュートリアル等のご案内

□ 研究組織

- 総括班
- A班(環境適応)
- B班(身体適応)
- C班(社会適応)
- D班(共通原理)
- メンバーリスト

□ 活動

- 活動実績
- 研究成果

□ 求人・公募

□ リンク

□ 内部連絡

文部科学省科学研究費補助金 特定領域研究 (領域番号454)
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 -

Emergence of Adaptive Motor Function through
Interaction among the Body, Brain and Environment:
A Constructive Approach to the Understanding of Mobiligence



ポスドク研究員募集中: 東京工業大学伊藤宏司研究室[求人・公募]

ポスドク研究員募集中: 東京工業大学倉林研究室[求人・公募]

2006年2月16日、ホームページをリニューアルしました



起立支援システム開発と 起立動作解析

筋シナジー仮説



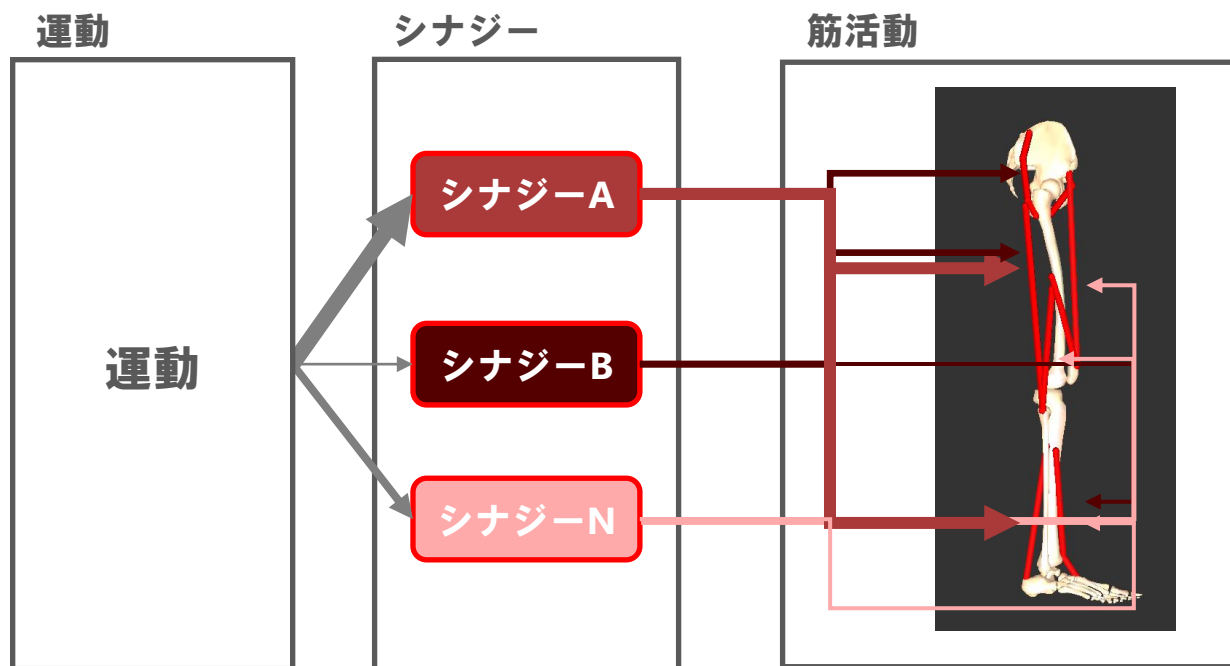
達成すべき運動に対して、個別の筋を制御せず、**複数の筋の同時発揮（筋シナジー）を制御している**という仮説

[Bernstein '67]

▶ 身体の冗長自由度に対する制御の低次元化

- ヒトの歩行や手の巧緻動作、姿勢制御などシナジーの存在

[Ivanenko '05, Torres '07, Weiss '04]



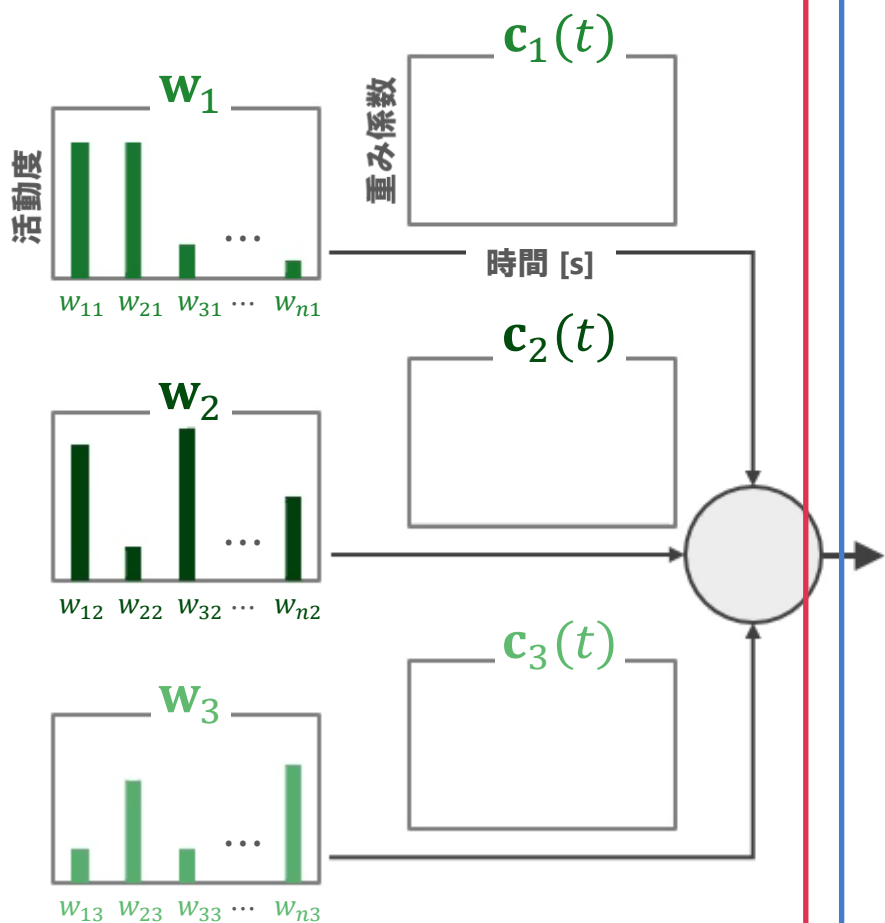
筋シナジー仮説

●筋シナジーの協調によって複雑な運動が生成

筋シナジーモデル

空間パターン

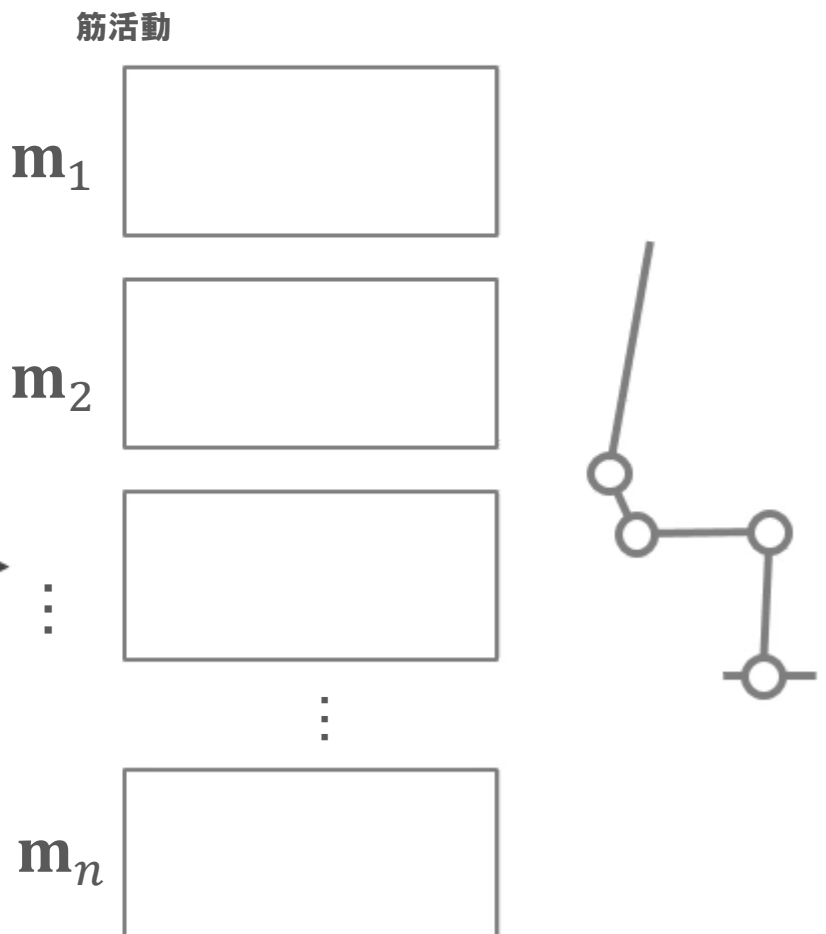
時間パターン



筋骨格モデル

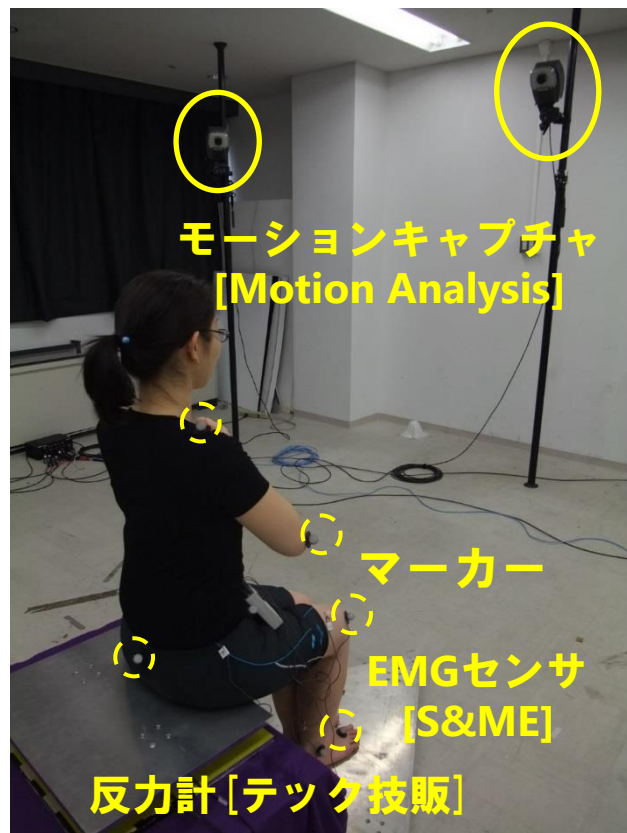
筋活動

骨格モデル

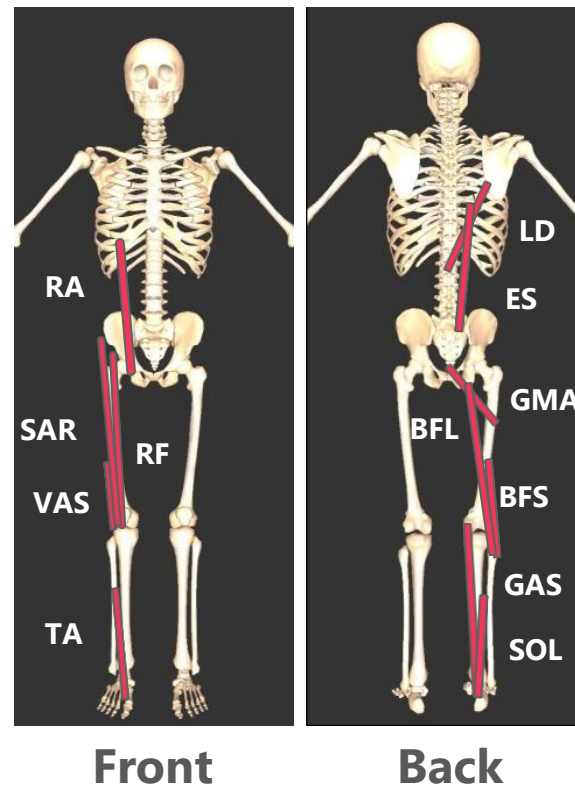


実験環境

- 筋活動, 身体軌道, 力の同時計測
- 7名の若年男性 (24.3 ± 2.1 歳, 1.73 ± 0.05 m, 71.7 ± 10.3 kg)
 - 各条件5試行
 - 各試行からシナジーを抽出



腰・股・膝・足首の
伸展屈曲に寄与する12筋

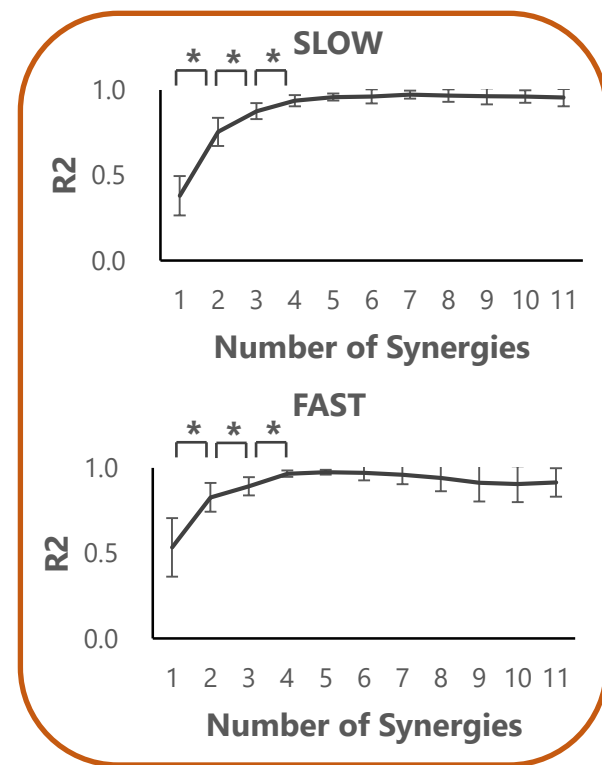
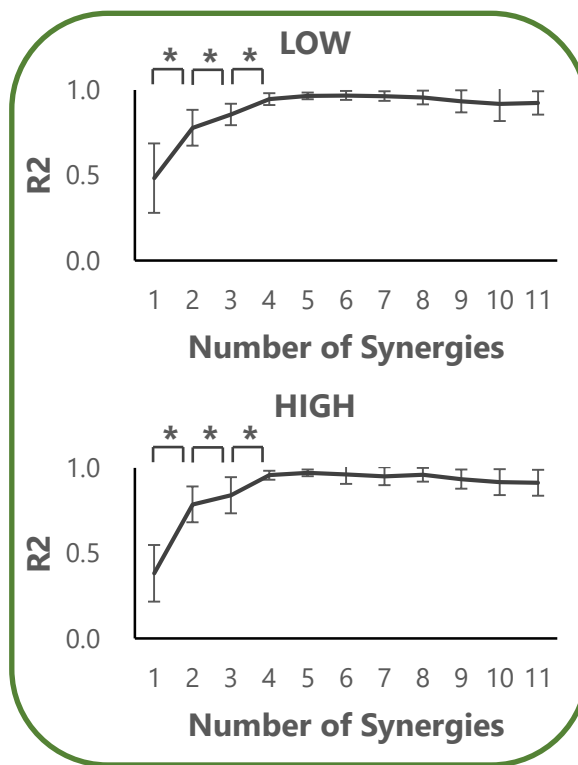
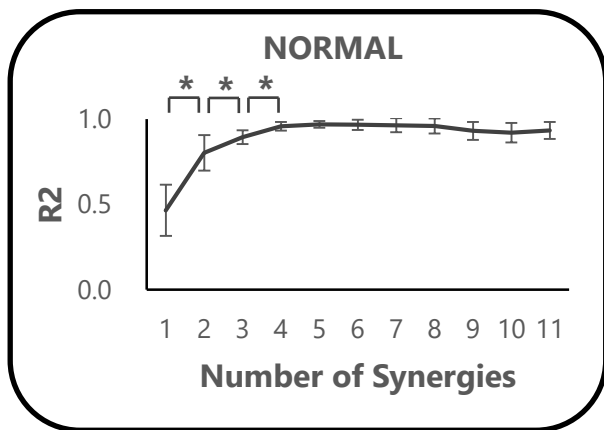


筋シナジーの数

● 1因子分散分析+多重比較

有意差： 1~2, 2~3, 3~4 ($p < 0.05$)

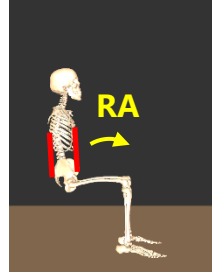
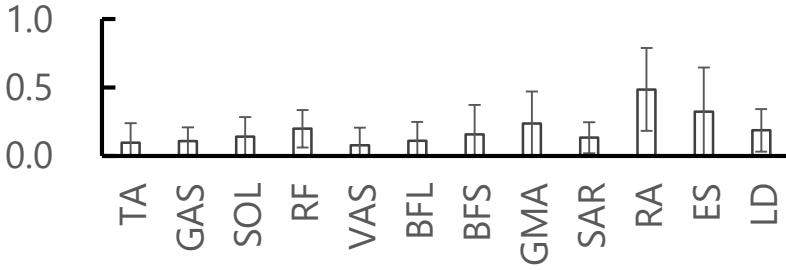
筋シナジーの数を4に決定



空間パターン

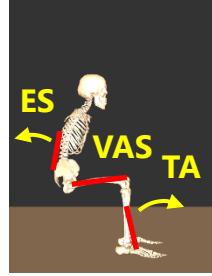
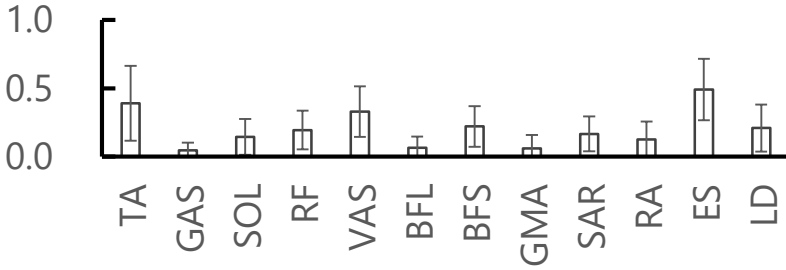
Muscle Activation

Synergy 1



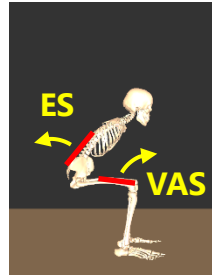
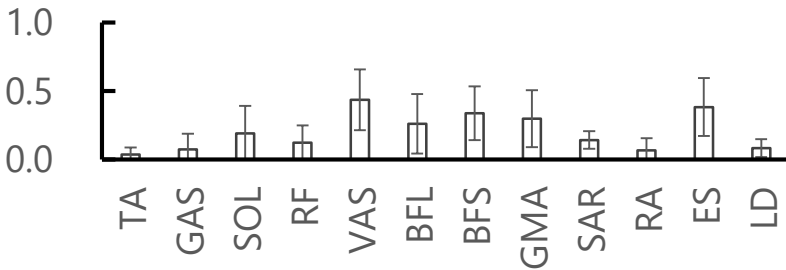
上体の前屈

Synergy 2



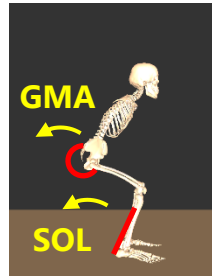
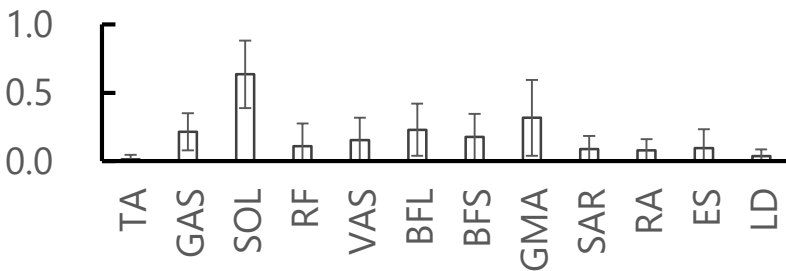
離臀

Synergy 3



全身の伸展

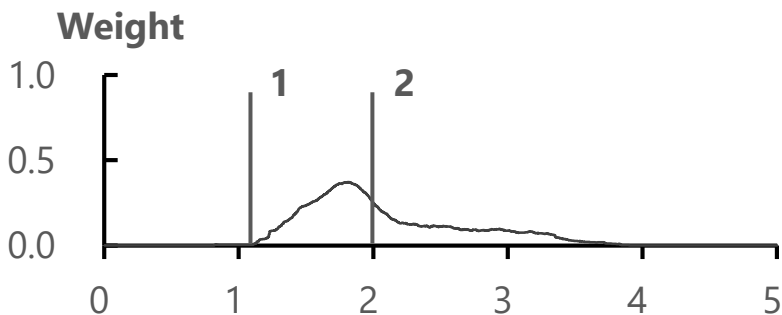
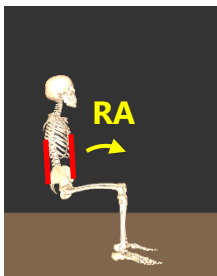
Synergy 4



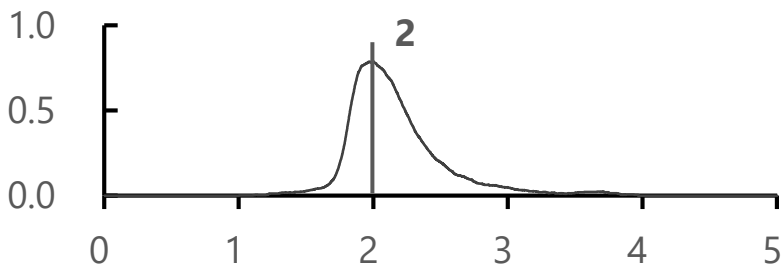
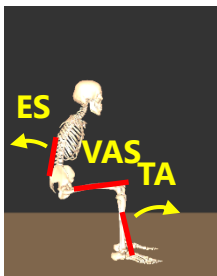
姿勢制御

時間パターン

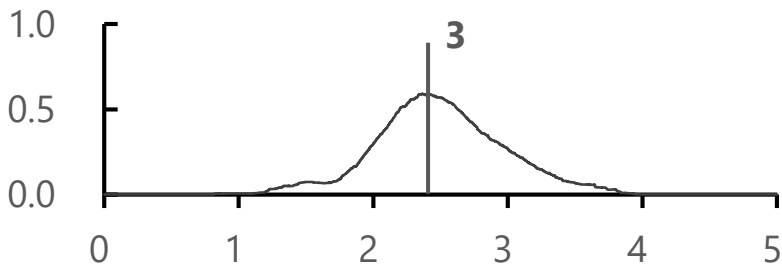
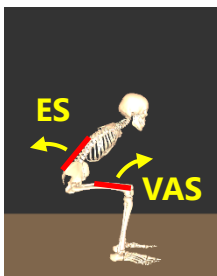
Synergy 1



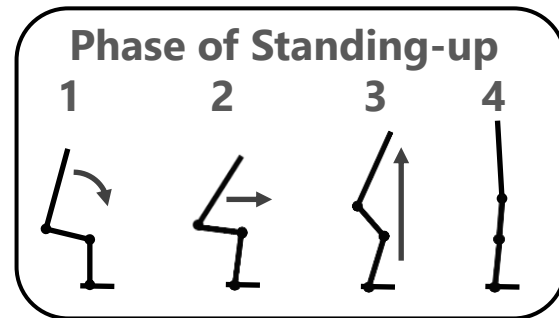
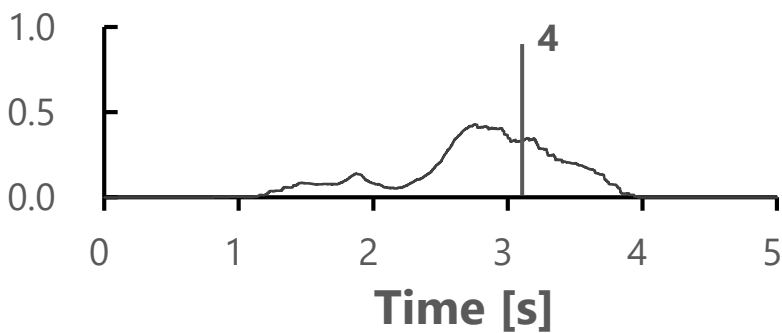
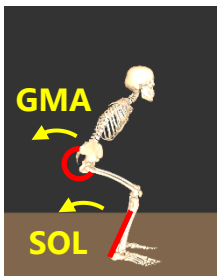
Synergy 2



Synergy 3



Synergy 4



起立の運動学的
フェーズに対応

片麻痺患者の筋シナジー構造

目的：片麻痺患者における筋シナジー構造の解明

● 運動疾患を有する患者の起立動作

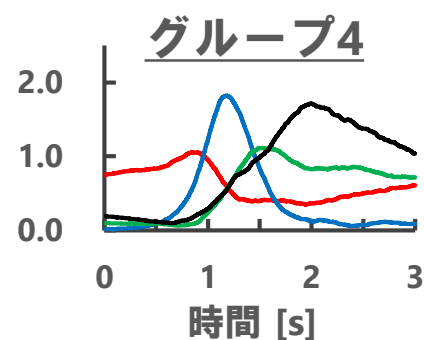
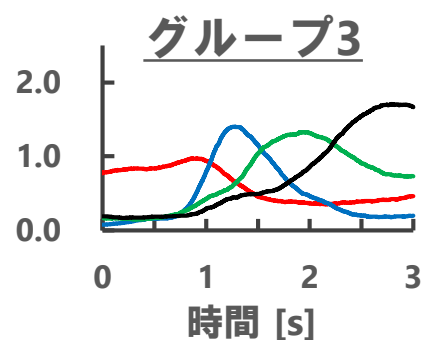
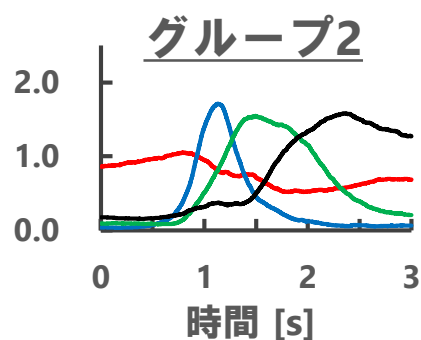
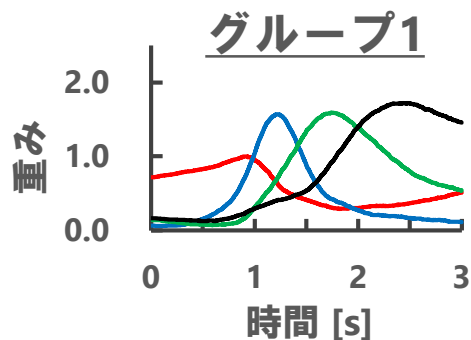
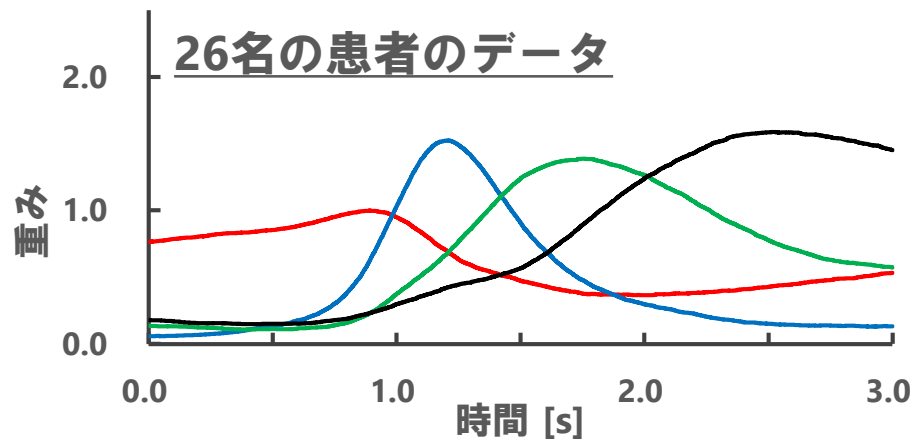
- 片麻痺患者 26名（大阪森之宮病院）
 - ・ 58.9 ± 12.7 歳（男性: 22名, 女性: 4名）
 - ・ 中度～軽度の症状（自力で起立可能）
- 麻痺側の解析
- 健常高齢者 8名



- 各患者から筋シナジーを抽出し，時間パターンの特徴に応じて26名の患者をクラスタに分類

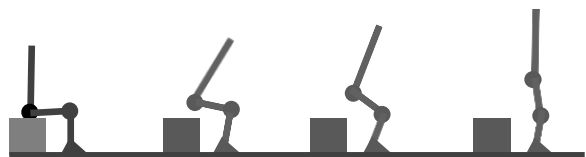
クラスタ分析

● 26名の患者を4つのグループに分類



片麻痺患者における筋シナジー構造

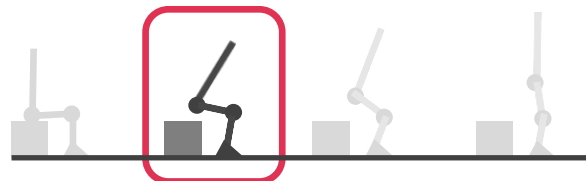
- 片麻痺患者は筋シナジーの時間パターンに異なる特徴がある
- グループ1: 比較的健常なグループ



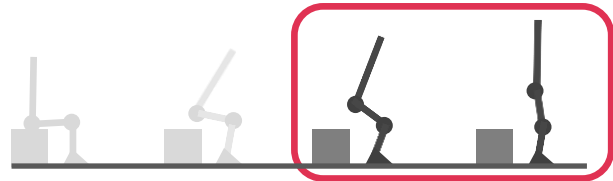
- グループ2: 筋シナジー1の活動が長いグループ



- グループ3: 筋シナジー2の活動が長いグループ



- グループ4: 筋シナジー3と4の活動が統合したグループ



理学療法士の介入

- 理学療法士は片麻痺患者にタイミングよく介入する
 - 大腿の遠位部，骨盤後部

介入前



介入中



理学療法士の筋電計測

● 理学療法士の上肢の筋電を解析

▶ 理学療法士がいつ、どのように介入しているか解明



肩の伸展／屈曲

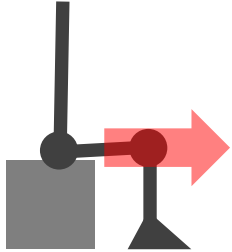
肘の伸展／屈曲

手首の伸展・屈曲

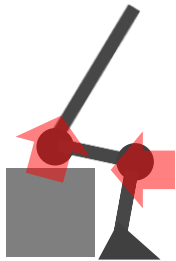
母指の把持

理学療法士の介入

- 理学療法士は患者に対して、
 - 離床前に膝を引くことで、荷重の前方移動を促し、



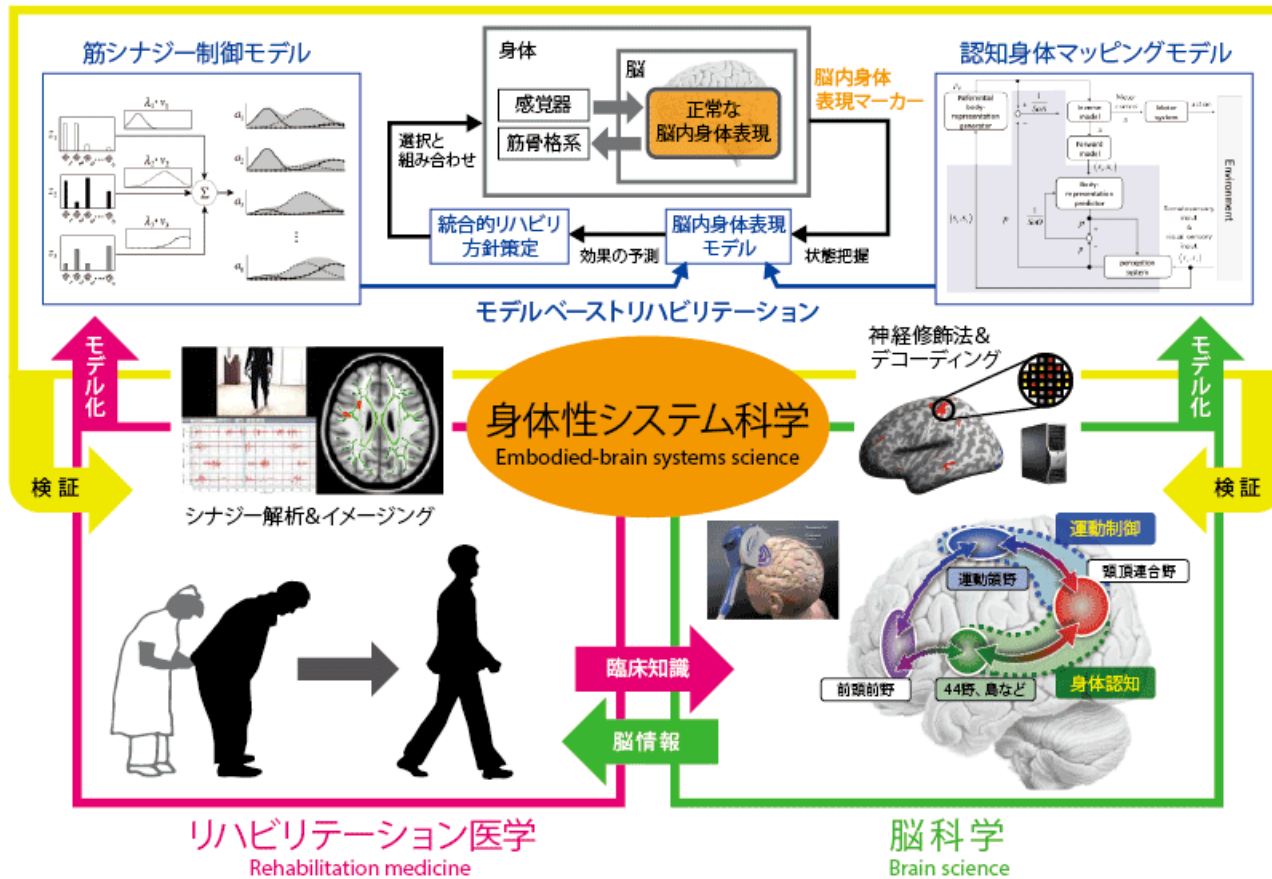
- 離床時に膝と股関節の伸展を促している



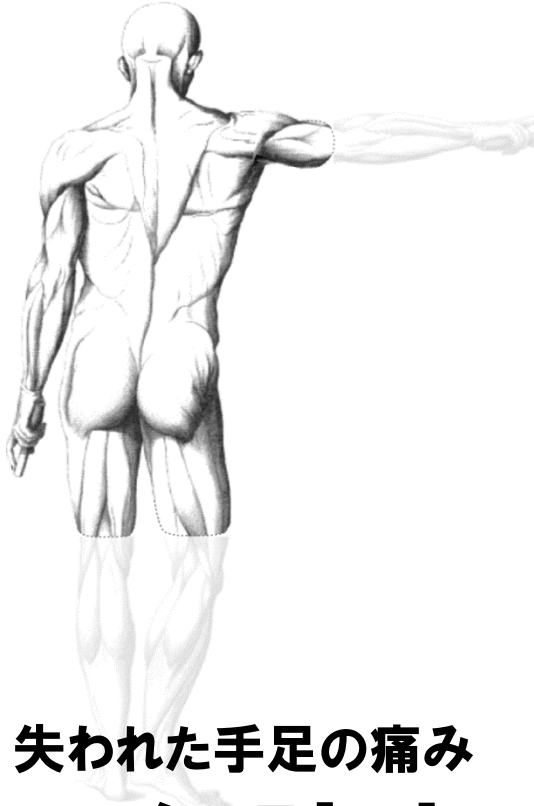
- 理学療法士の介入によって筋シナジー構造が改善
 - 活動タイミングを早く
 - 活動タイミングを短く

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



適応的運動機能の障害に関する 身体性基盤と療法



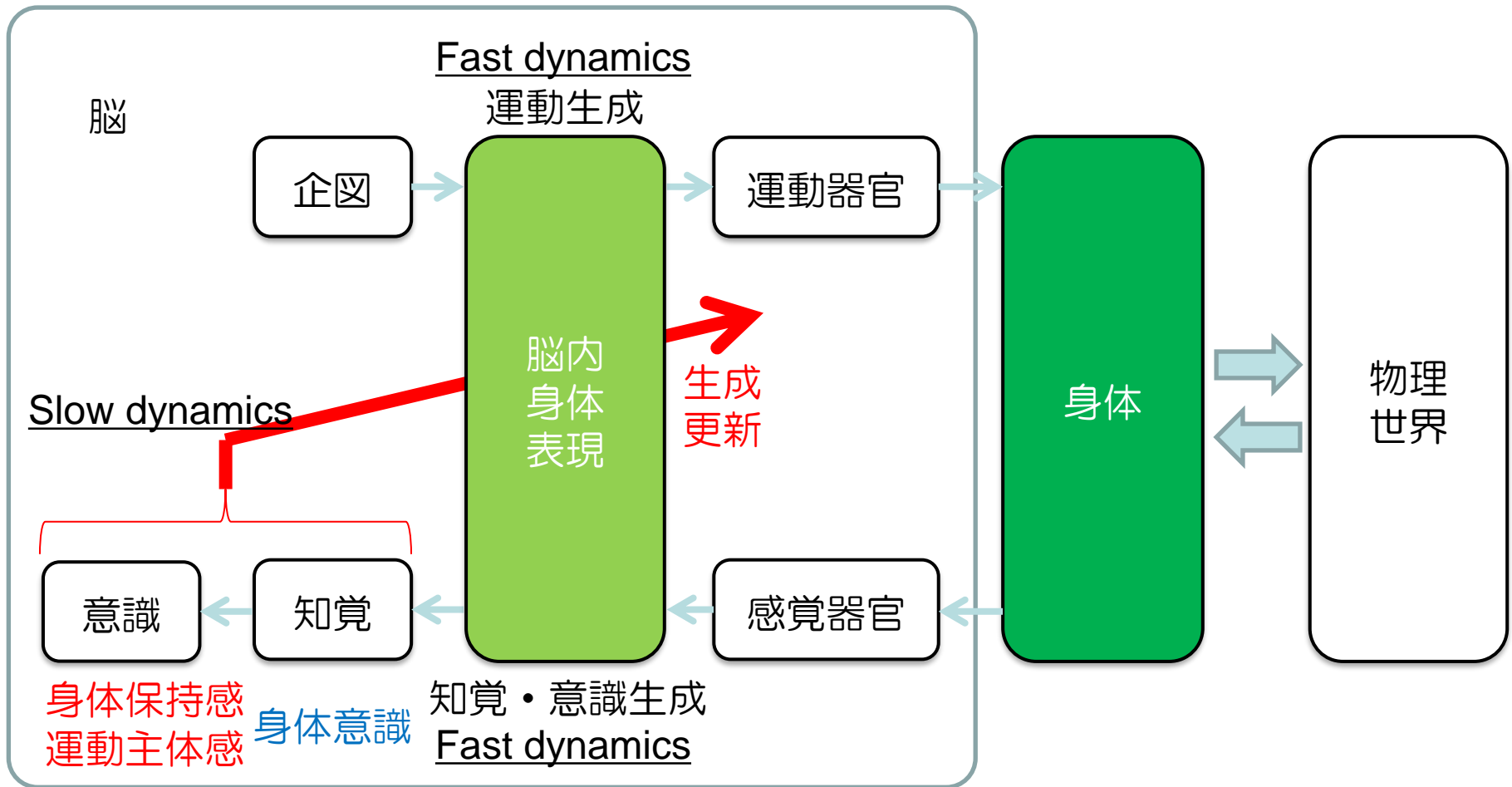
失われた手足の痛み

= 幻肢痛

メカニズムが未解明

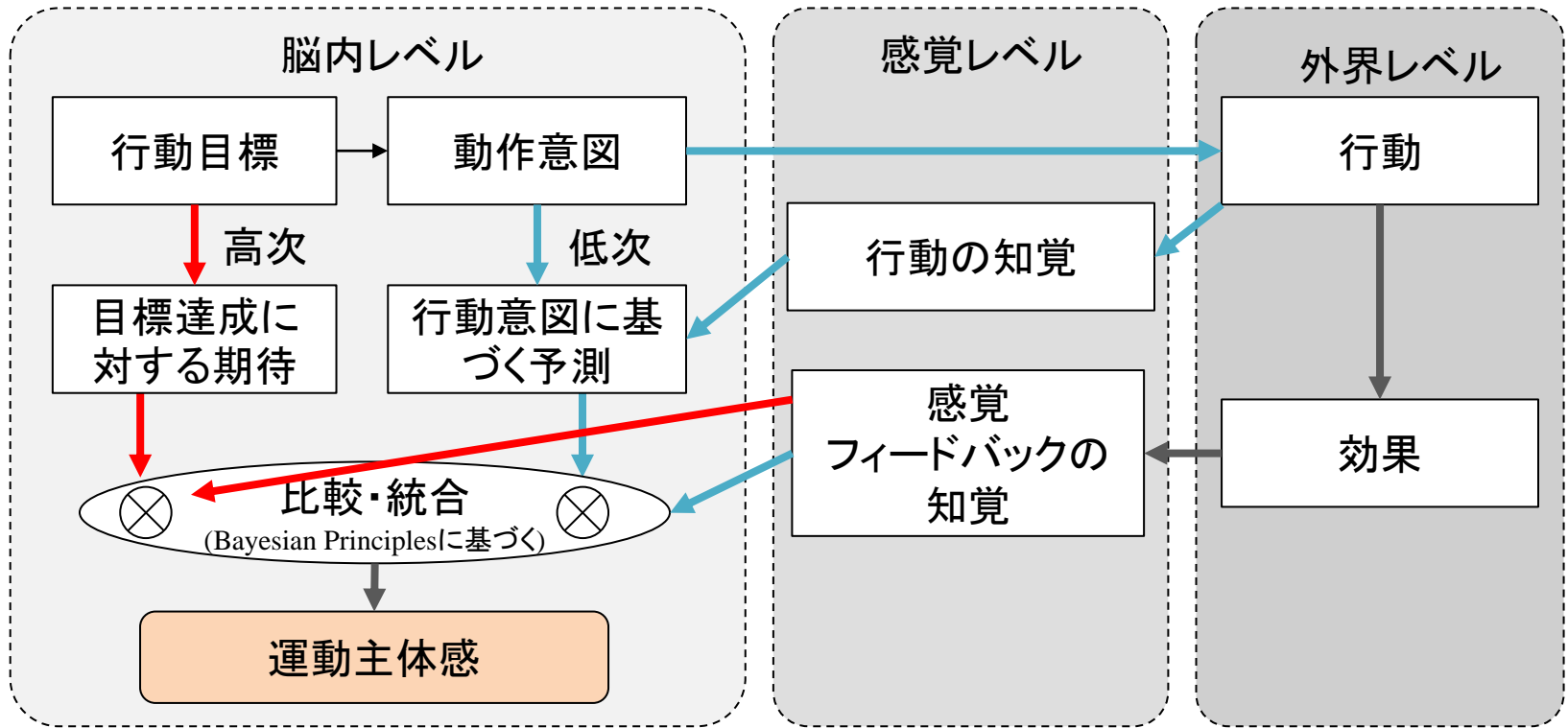
身体性基盤

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



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

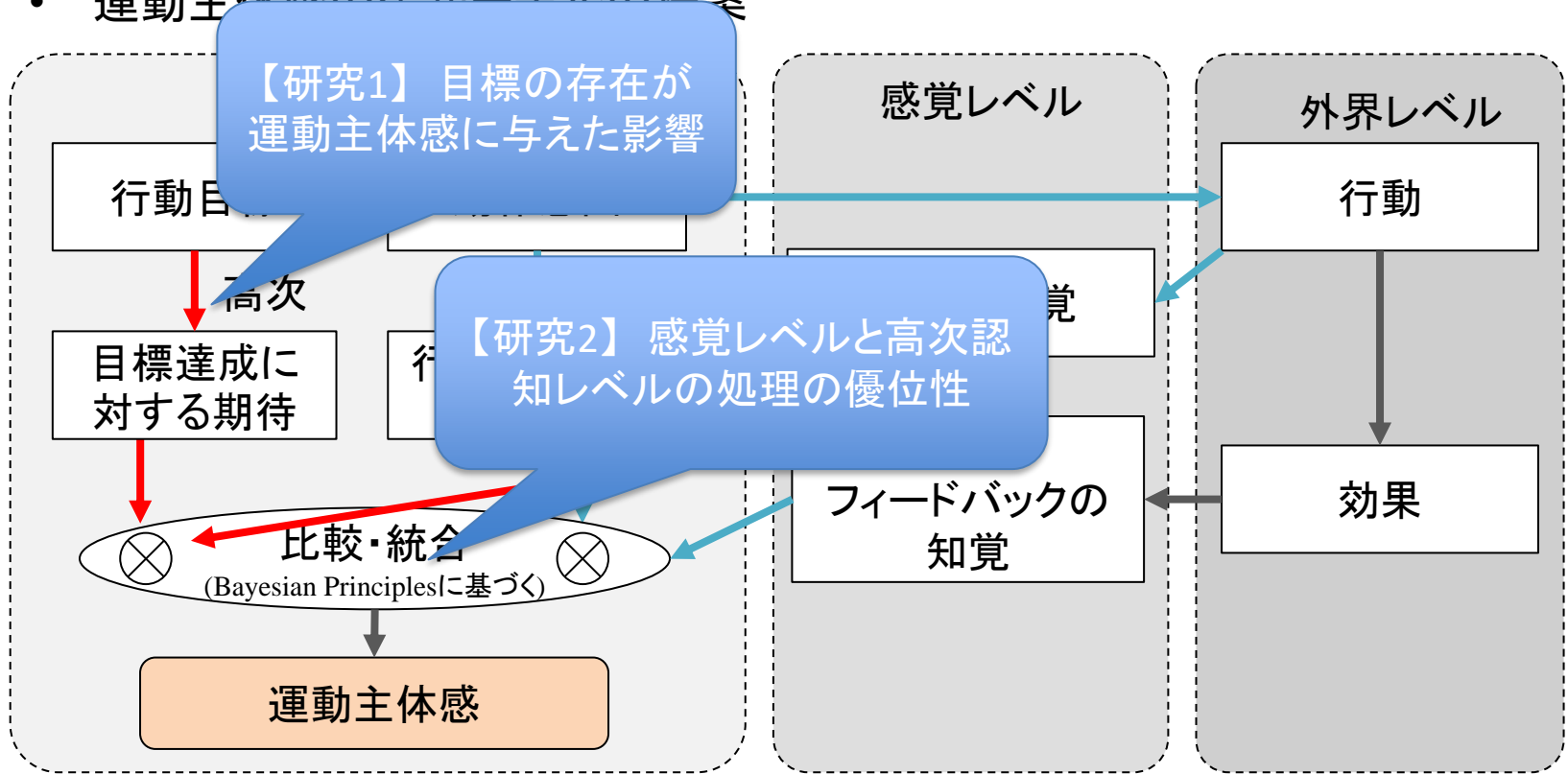


- 従来のComparator Modelによる感覚レベルの比較プロセス
- 高次認知レベルにおける比較プロセス(本研究)

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

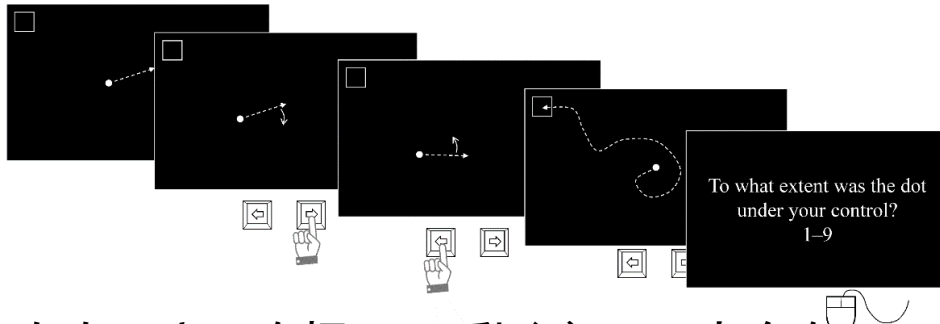
- 運動主体感の生起モデルの提案



- 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)

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

感覚レベルvs高次認知レベル



左右のキーを押して、動くドットの方角を制御し、目的地に入れる課題

独立変数:

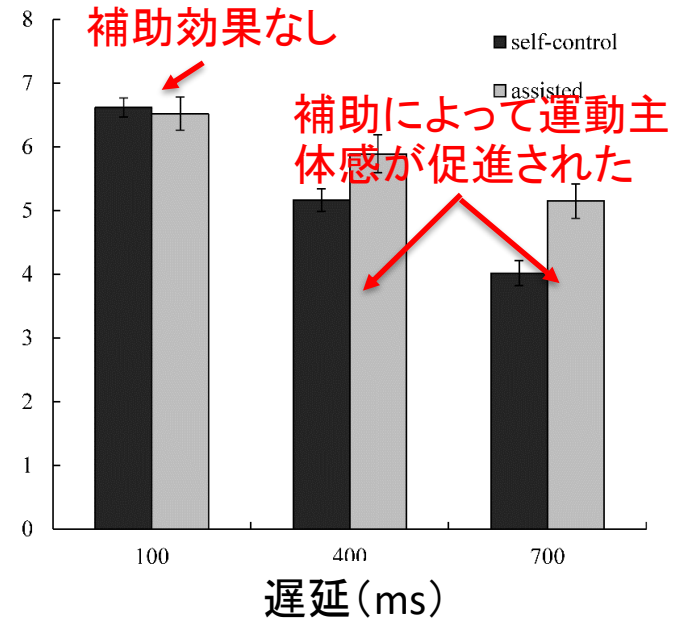
①ドットの遅延 100, 400, or 700 ms

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。

運動主体感の評価



- 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).



科研費
FACETS

2019～2023 年度 文部科学省科学研究費補助金
新学術領域研究（研究領域提案型）

HYPER-ADAPTABILITY 超適応

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）

班・研究項目の構成

脳科学

A

A01

伊佐
(京大)



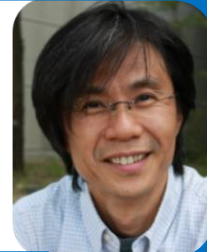
A02

関
(NCNP)



A03

今水
(東大)



A04

高草木
(旭川医大)



実験解析

生体構造の再構成

潜在機能
脱抑制
(脳障害と老化)

身体変容

行動遂行則の再編成

認知
情動

神経伝達
物質

数理モデル・
介入

システム 工学B

B01

近藤
(東農工大)



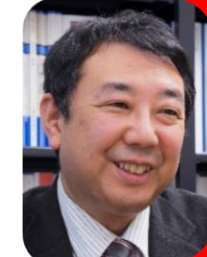
B02

小池
(東工大)



B03

浅間
(東大)



B04

太田
(東大)



03項目群 身体認知・情動(意欲)と行動遂行則の再編成

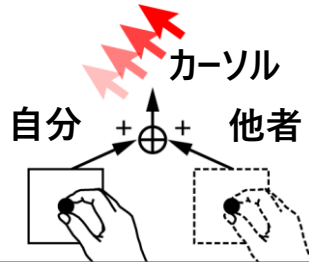
未経験のモノに対する困難な学習 → 「意欲」と「正確な身体認知」
 神経科学と数理モデルより、そのメカニズムを解明、応用への道を拓く

A03項目：神経科学による理解

ヒト心理実験・脳活動計測

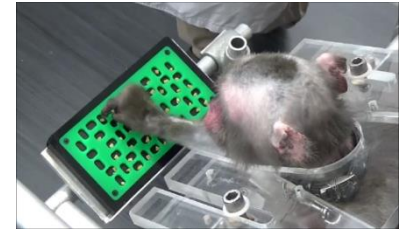
自己と他者の動き
 を混ぜ合わせ、
 身体認知を操作

ジョイスティック



サル電気生理

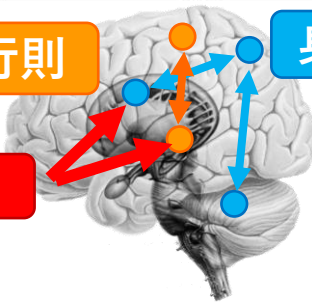
空腹による
 意欲の操作



行動遂行則

身体認知

意欲

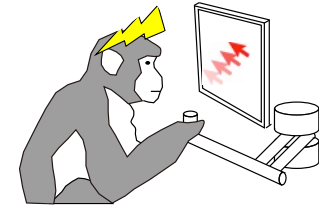


解明

再編成を促進

応用

介入

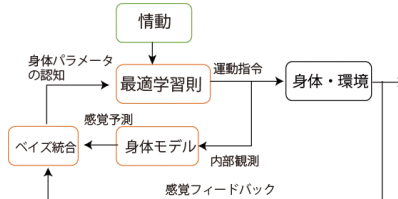


ロボティック介入神経科学法
 B: 装置作成 A: 実験

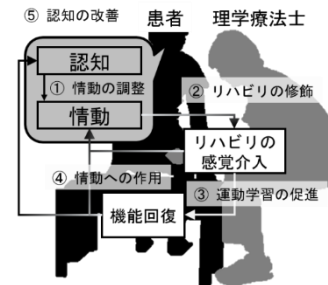
数理モデルによる身体認知と意欲が超適応を導く機構

$$\frac{p(self|y)}{p(other|y)} > \frac{V(other)}{V(self)}$$

$$p(y_t | self) = \int \frac{p(y_t | x_t) p(x_t | \bar{x}_{t-1}, u'_t, M^{self})}{p(y_t)} dx_t$$



再編成を促進する
 デバイスを臨床
 現場で検証



B03項目：数理モデル作成・デバイス開発

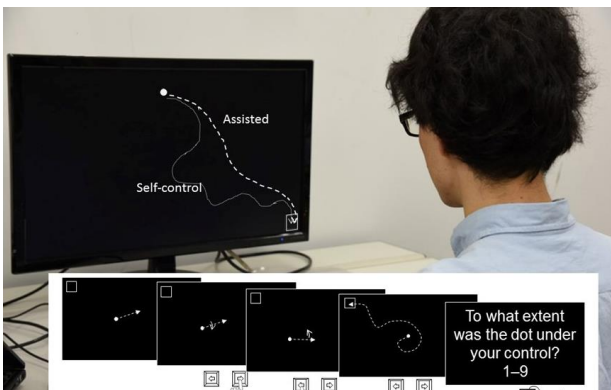
本研究の目的

脳卒中患者のリハビリ運動意欲を促すため、**運動主体感の高い**リハビリ手法を提案し、その効果を検証するため。

運動主体感を促進する提案手法

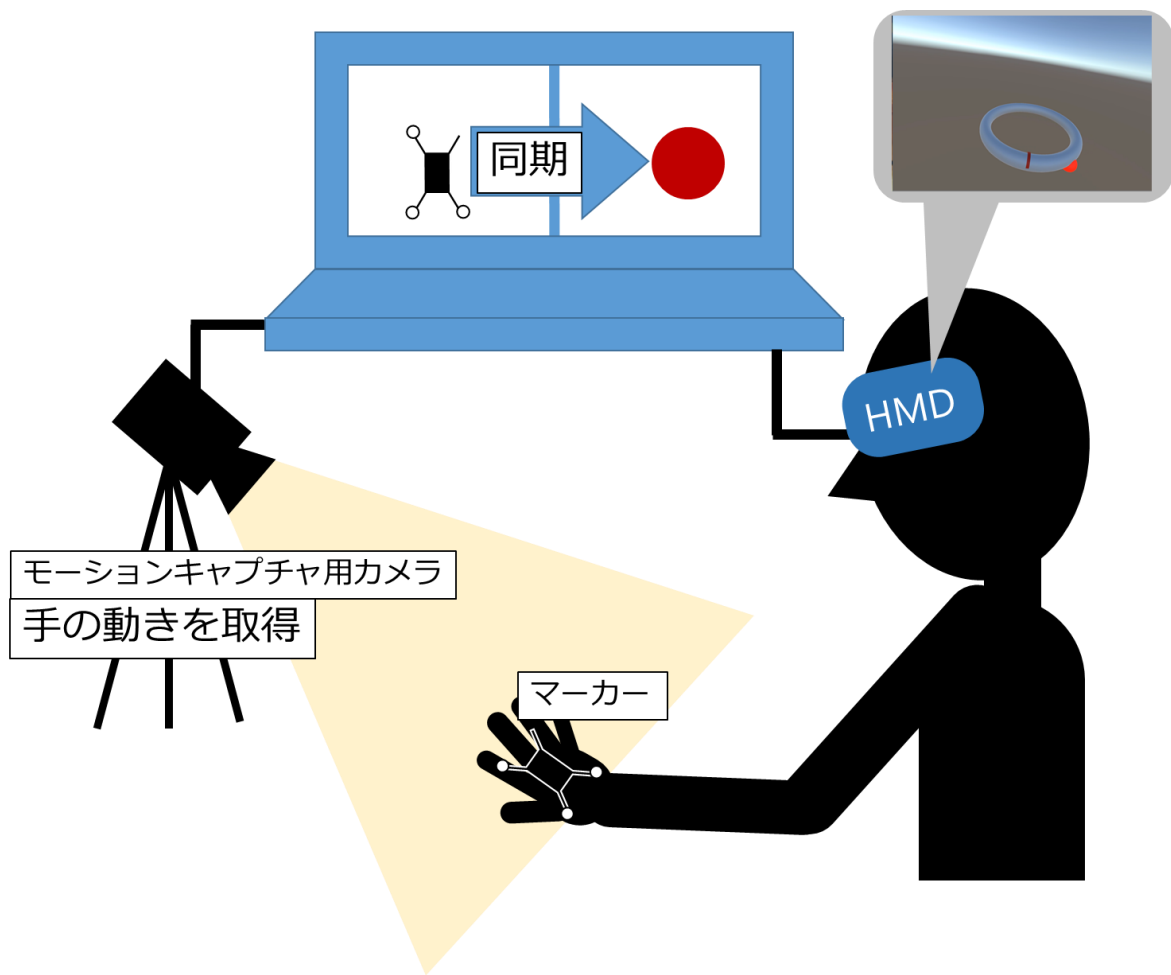
仮想現実(VR)を用いて、および**目標とした体の位置の近くに**、身体位置を示す刺激を視覚的に提示する

先行研究: 課題の目標に沿って視覚刺激の提示位置を修正した場合、実験参加者はその修正に気付かず、運動主体感を強く感じた[Wen 2015b]



提案手法の概要

- 可搬式のモーションキャプチャ+ヘッドマウントディスプレイ(HMD)
- 手に付けたマーカークラスタから動作を取得する



運動課題:

手のある軌道に沿ってゆっくり動かす

HMDの中には軌道と手の位置を表す視覚刺激(ボール)が見える

介入手法:

視覚刺激の位置を、手の位置に応じて、リアルタイムに軌道により近い位置に表示する

提案手法の検証方法

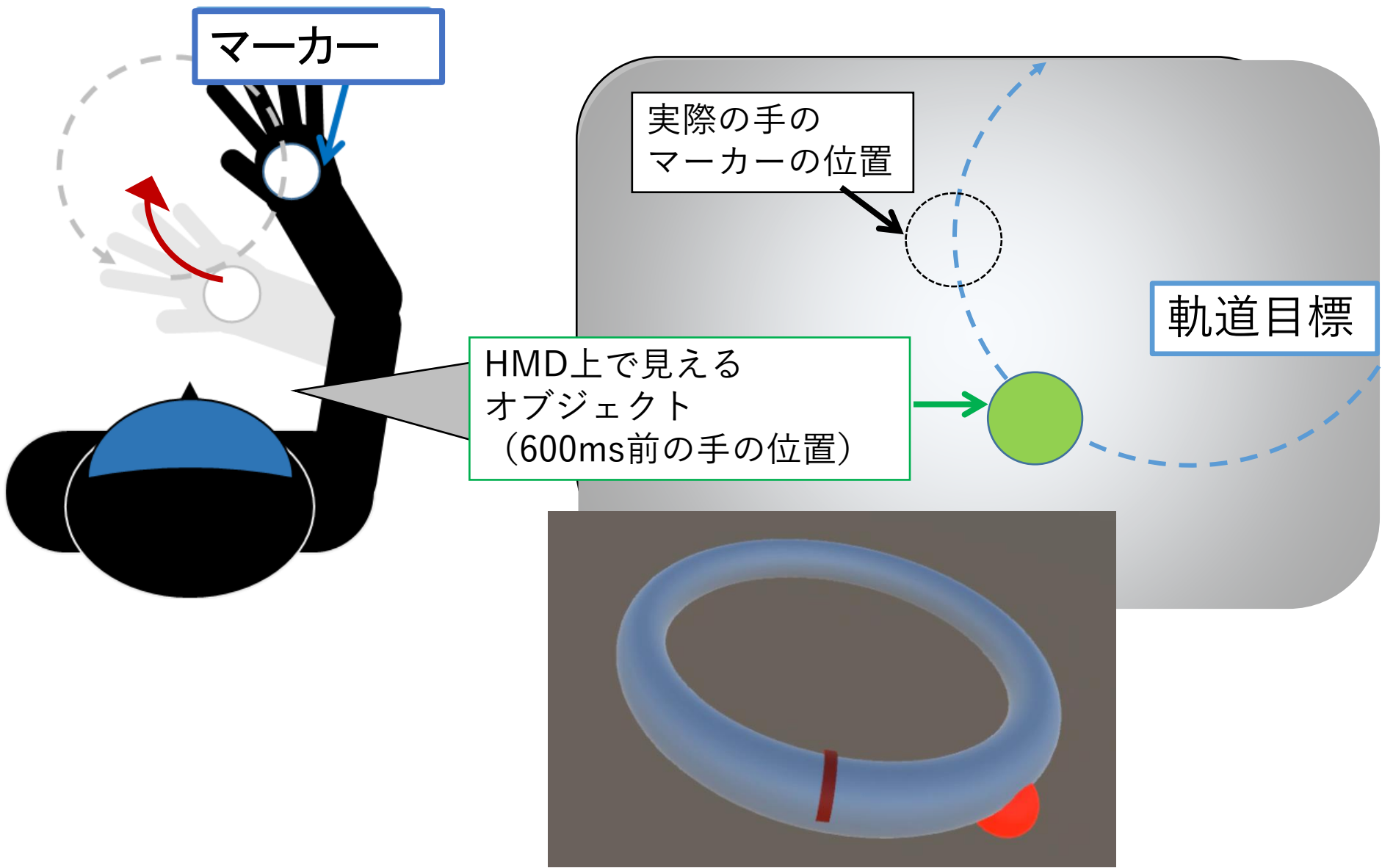
健常者を実験参加者とし、運動制御がうまくいかない実験条件(外乱条件)を人為的に作り出し、本研究が提案した介入手法が運動主体感を促進できるのかを検証

- 実験1: 視覚フィードバックに600msの遅延を設けた
→ 軌道から外れやすい
- 実験2: 腕に1kgの重りを付けた
→ 動きにくい

【予測】

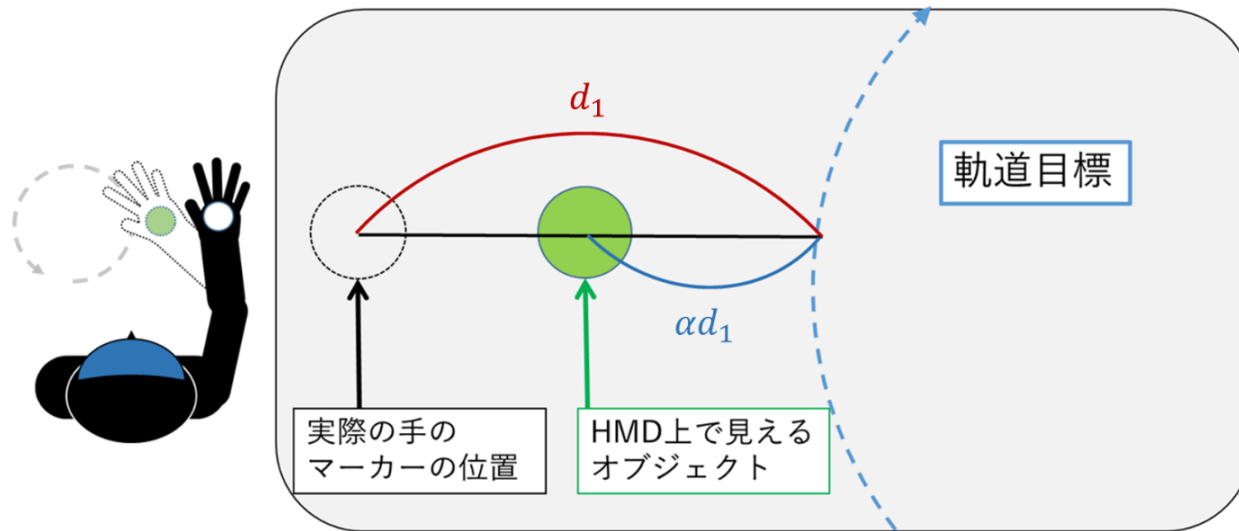
- 遅延がある場合(実験1)、または腕に重りがある場合、統制条件(何も外乱がない条件)よりも運動主体感が低下する。
- 本研究の介入手法を用いると、外乱がある場合と比べて、運動主体感が向上される。

実験1 視覚フィードバックに遅延を与えた場合



視覚介入の詳細

動作目標(理想的な位置)に対する手の位置を、**誤差を半分にして提示した**



- 実際の手の位置と軌道目標までの最短距離を d_1 とする
- HMD上で表示されるオブジェクトの位置を αd_1 の位置に表示
- $0 < \alpha \leq 1$ の α の値を変えることで介入の強さを調整することができる

実験1の実験条件

	視覚刺激(VRの中のボール)の提示位置
通常条件	マーカーのリアルタイムの位置
遅延条件	マーカーの600ms前の位置
介入条件	マーカーの600ms前の位置から軌道の中心に結ぶ直線上、軌道外周までの半分の位置

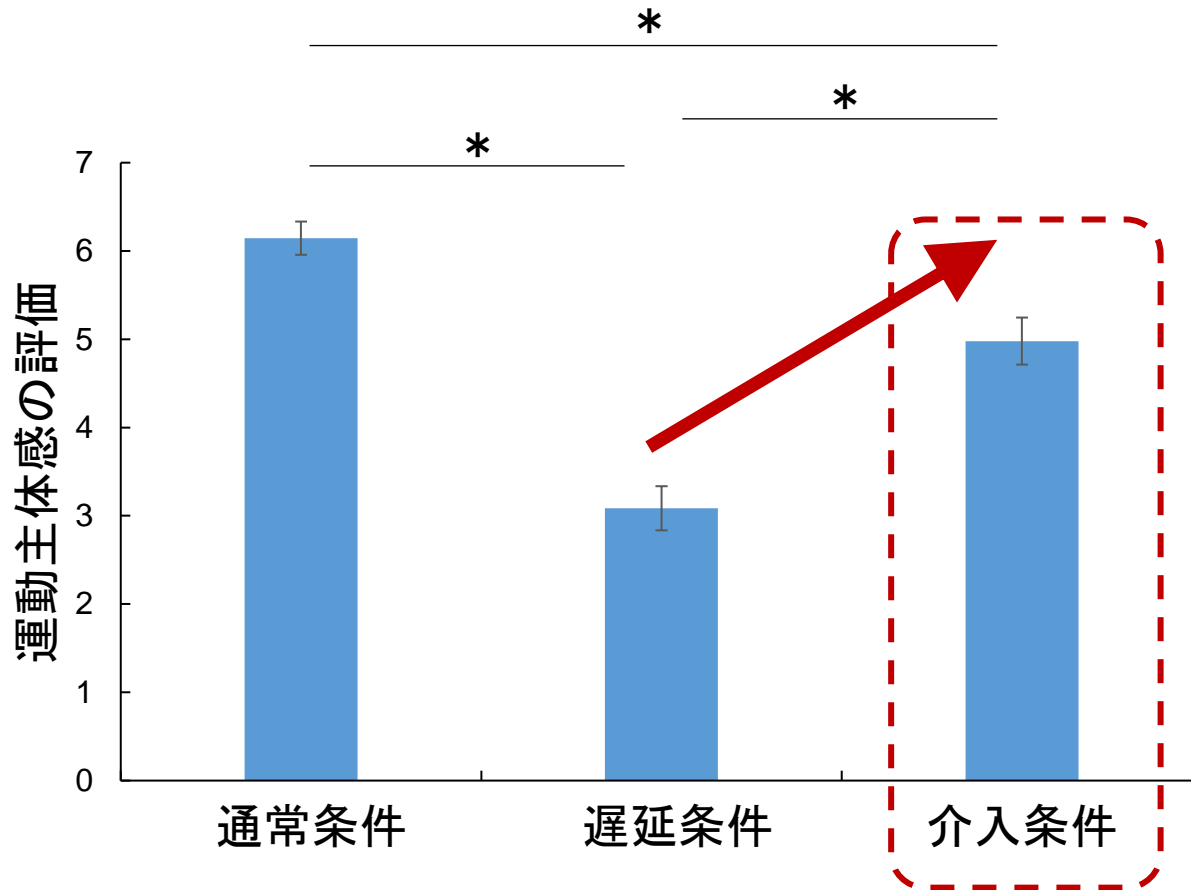
ランダム順

- 実験参加者: 19歳~27歳の健常な男女16人(男性:12人, 女性:4人)
- 回数: 1試行につき軌道目標(円)を4周×3条件×3試行
- 時間: メトロノームを用いて1周につきかかる時間を4秒に固定

測定した指標

- 運動主体感の評価
「自身の動きに対し球体のコントロールがよく効いていたか?」1~7点
- マーカーの運動軌跡

実験1の結果 運動主体感の評価点数

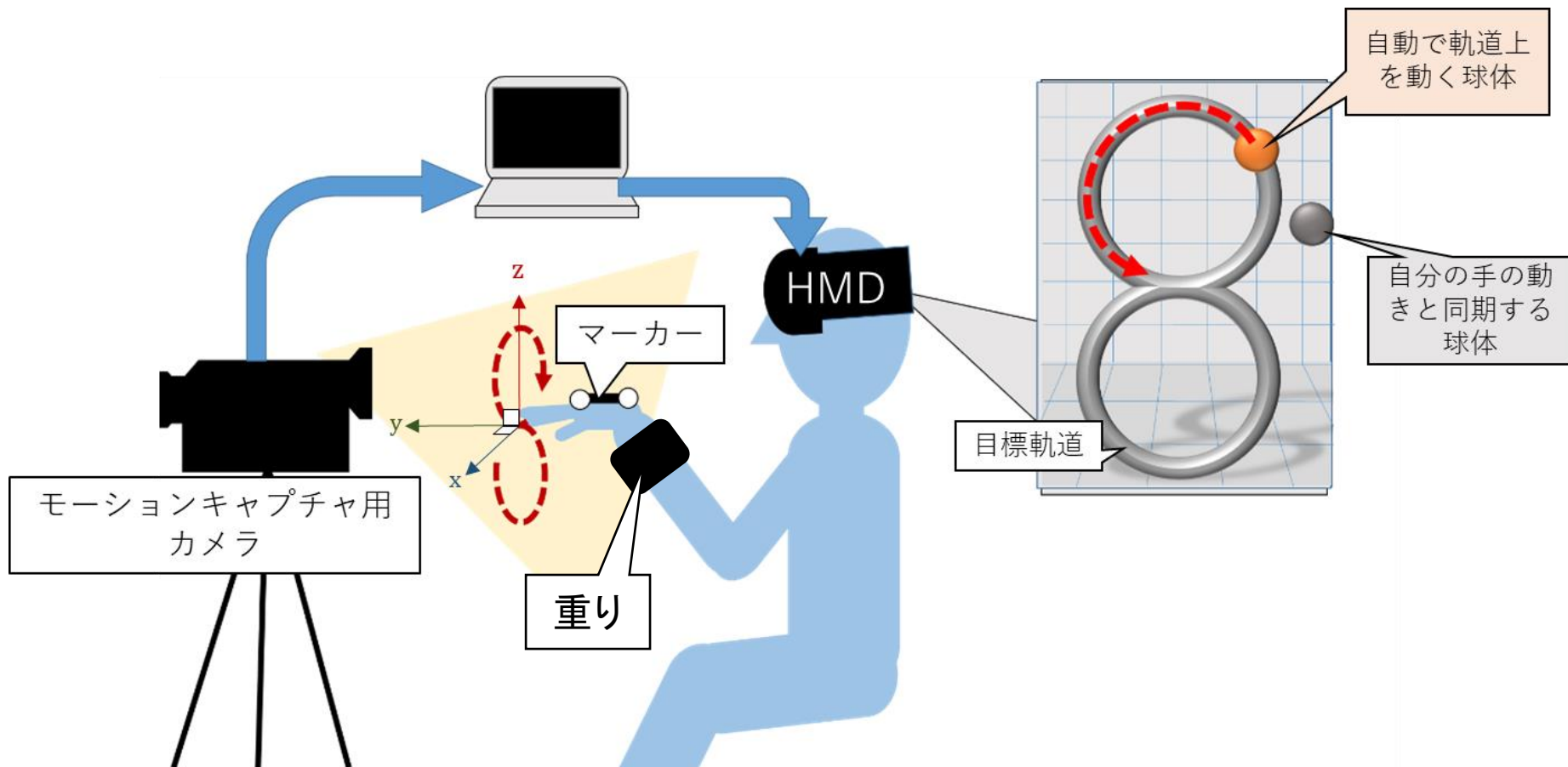


*: 条件間に有意な差が見られた($p < .05$)

Bonferroni adjusted t test

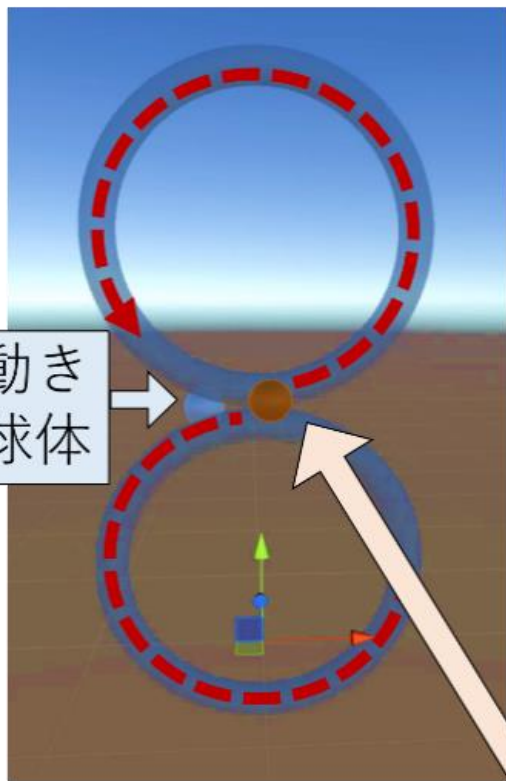
- 遅延によって運動主体感は大きく低下した
- 介入条件において運動主体感の評価は向上した

実験2 腕に重りを着けて運動を妨害した場合



- 手を高さ方向に上げる課題を提示(実際のリハビリテーションの現場で行われている手法を参考)
- 重りによって、運動ができて**動きにくさ**を感じる
- 介入手法は実験1と同様

実験2の様子



自分の手の動き
と同期する球体



自動で軌道上を動く球体
(動作目標)

実験2の実験条件

	視覚刺激(VRの中のボール)の提示位置
通常条件	マーカーのリアルタイムの位置
妨害条件	マーカーのリアルタイムの位置
介入条件	マーカーのリアルタイムの位置から軌道の中心に結ぶ直線上、軌道外周までの半分の位置

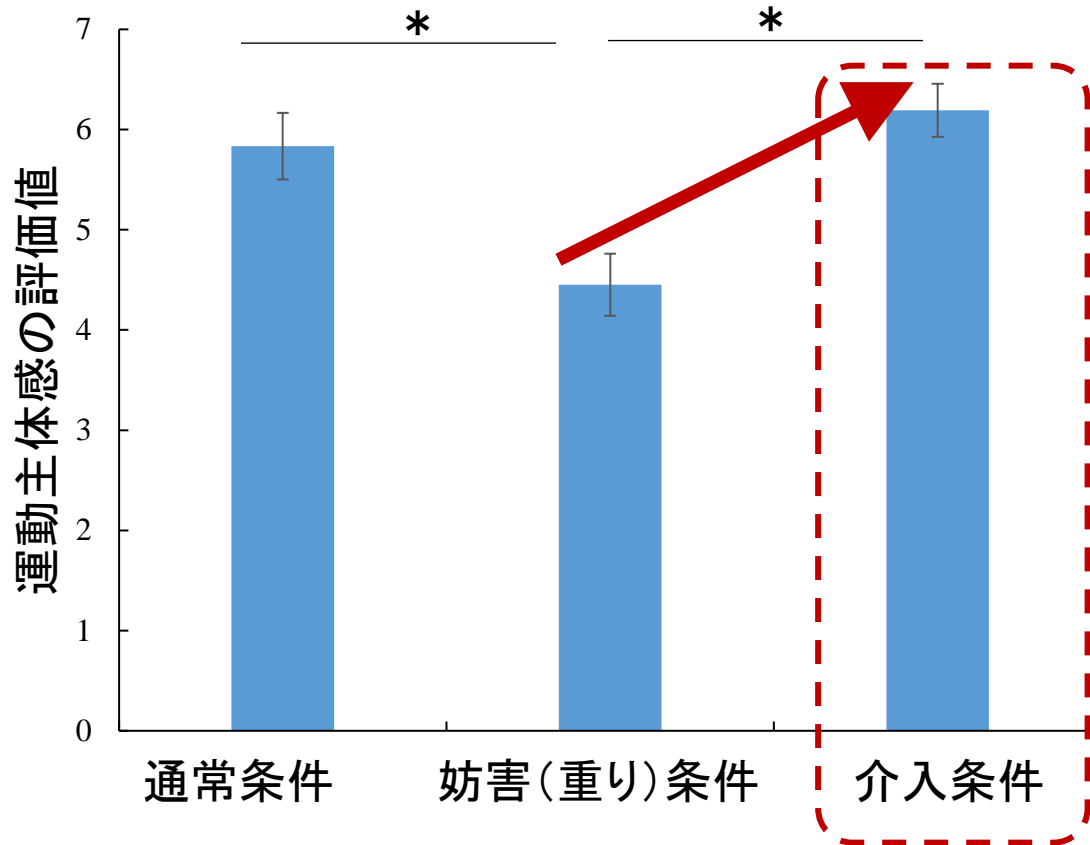
ランダム順

- 実験参加者:19歳~22歳の健常な男女14人(男性:11人, 女性:3人)
- 回数:1試行につき軌道目標(8の字軌道)を4周×3条件×3試行
- 時間:1周につきかかる時間を8秒に指定

測定した指標(実験1と同様)

- 運動主体感の評価
「自身の動きに対し球体のコントロールがよく効いていたか?」1~7点
- マーカーの運動軌跡

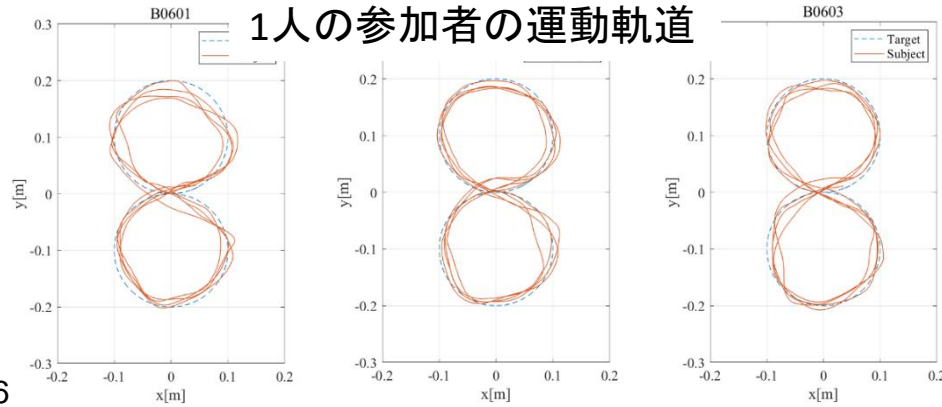
実験2の結果 運動主体感の評価点数



*: 条件間に有意な差が見られた($p < .05$)
Bonferroni adjusted t test

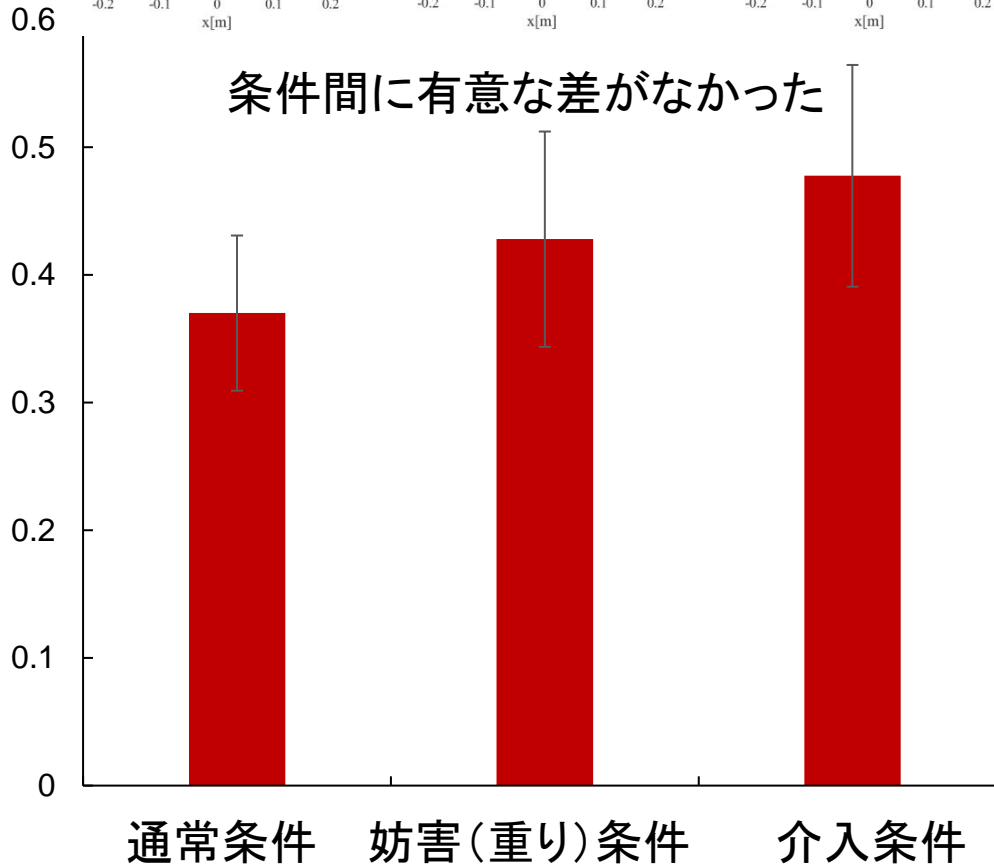
- 重りによって運動主体感は低下した
- 視覚介入によって運動主体感は重りなしと同レベルまで向上した

実験2の結果 手の運動軌跡



手の実際の位置が追従刺激から

離れた距離 (cm)

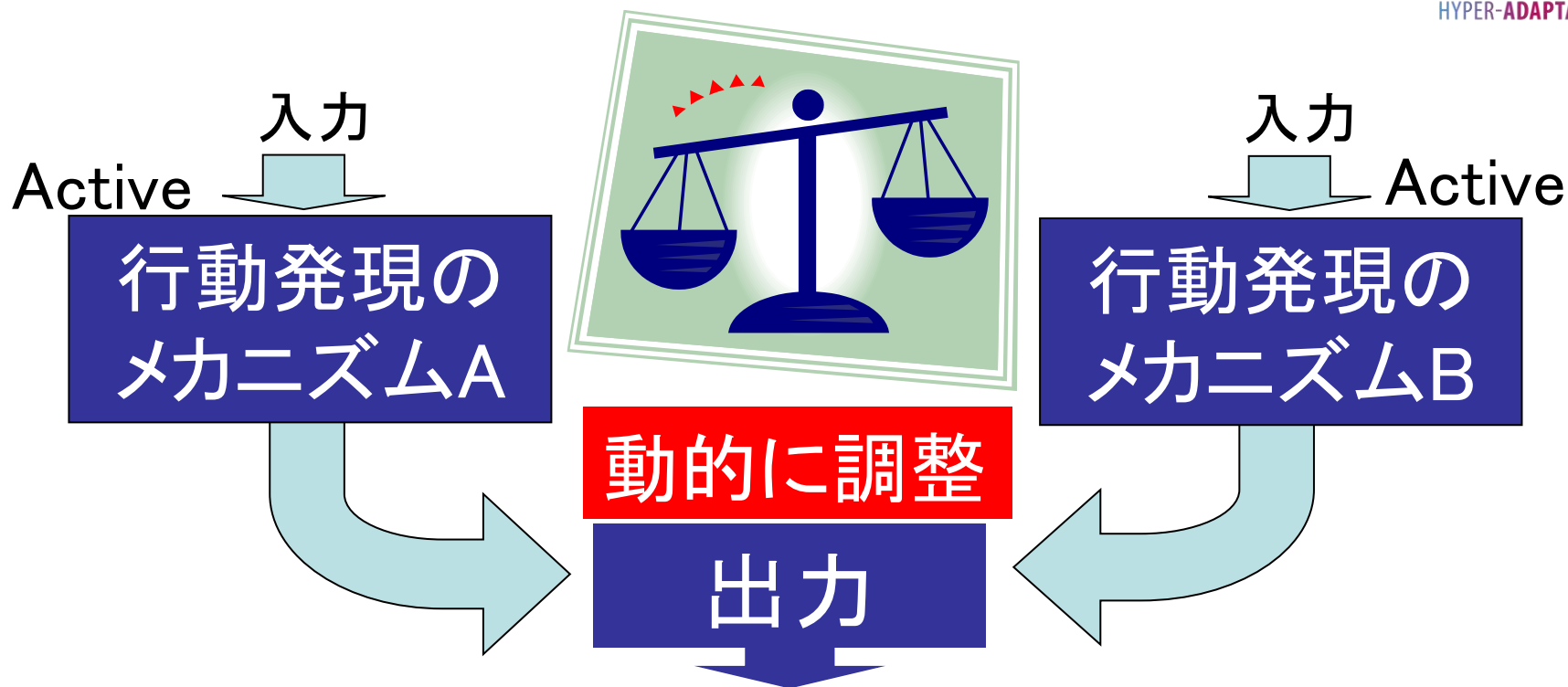


- 手首に重りがあった場合、動きにくかったものの、パフォーマンスが低下しなかった
- 課題パフォーマンスが変わらない場合においても、目標位置の近くに視覚刺激を提示した場合運動主体感が向上した

超適応の考察



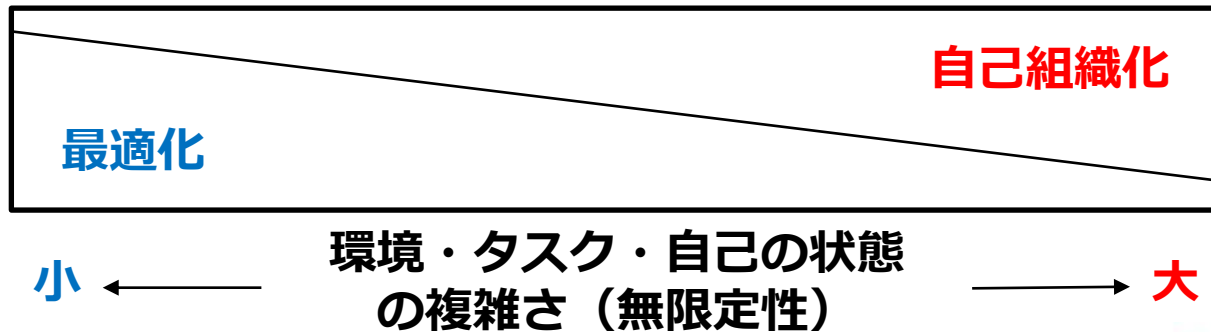
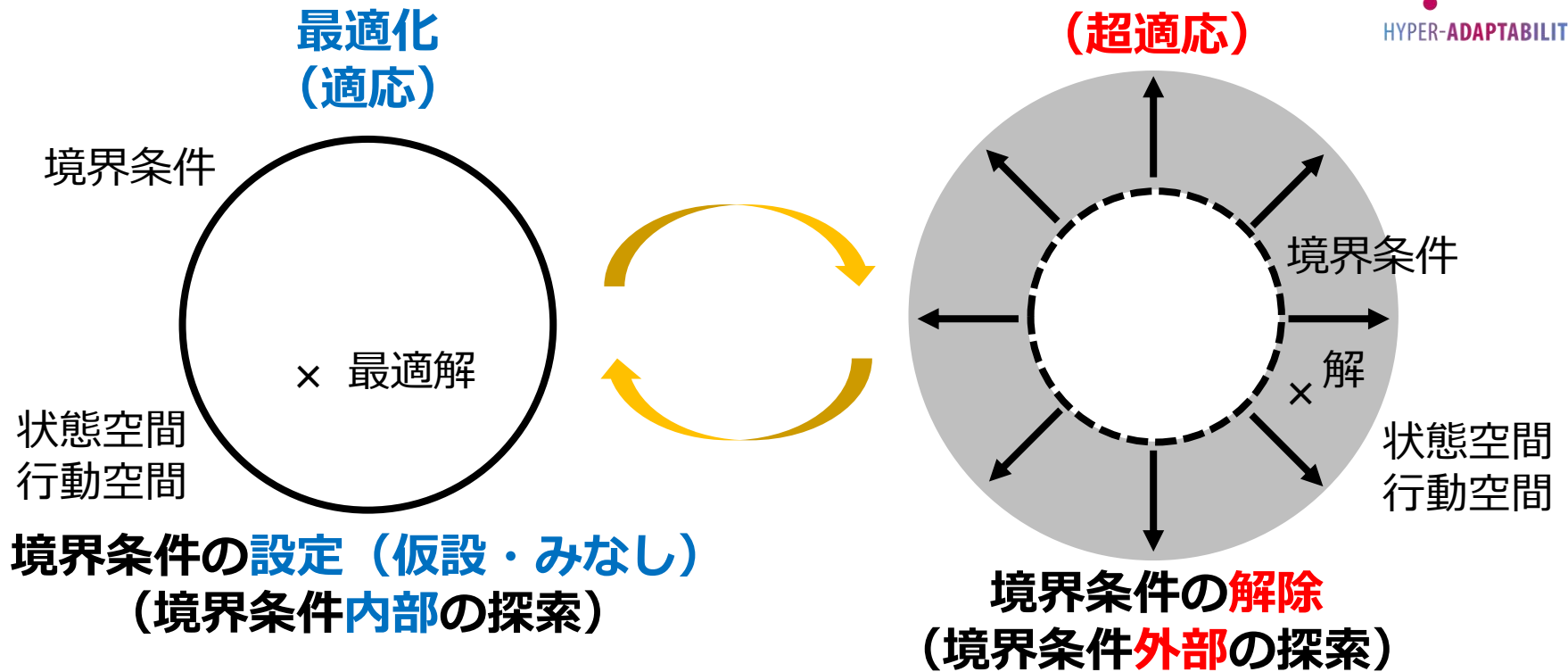
バランスの力学の概念



超適応の考察

- 最適化と自己組織化
 - 自由エネルギー原理？
 - 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？

最適化と自己組織化



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

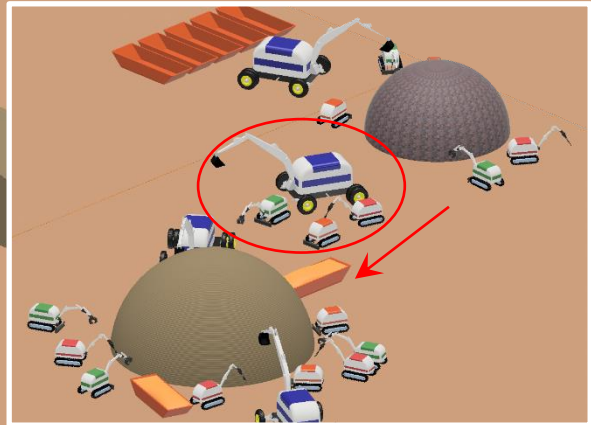
ムーンショット目標3 (PD:福田敏男先生)

- 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



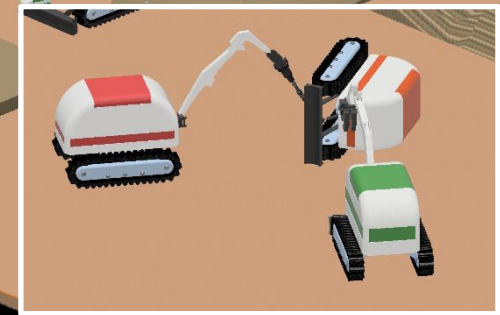
3. 他の群との交渉

相補的な通信, 協調

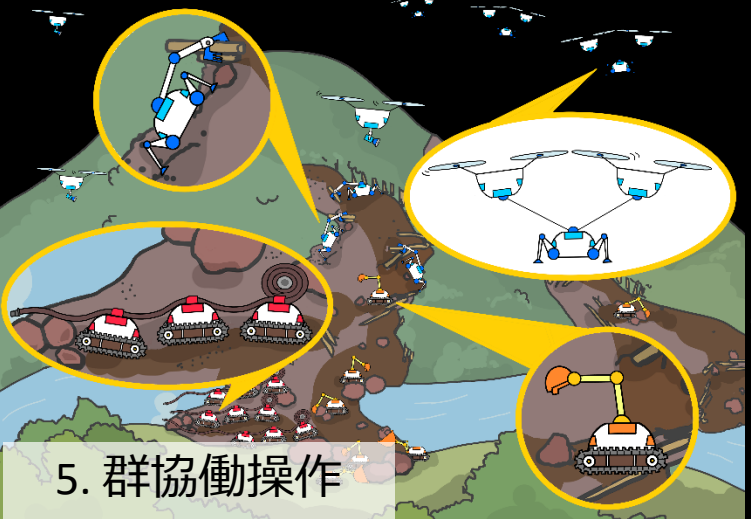
2. チームの自己組織

協調運搬

1. 知識・データの獲得・共有



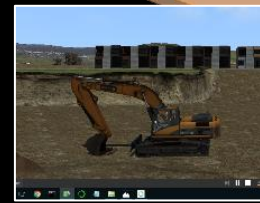
4. 自己異常検出



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

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

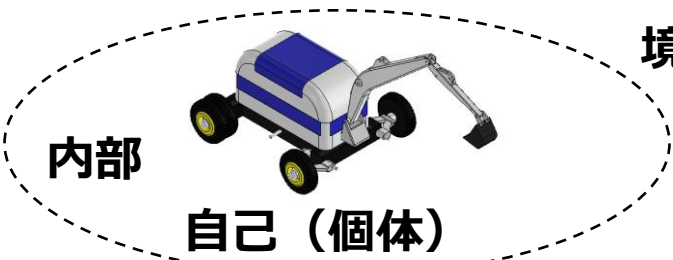
- **無限定要因**（環境，タスク，自己の状態）→自己組織化

- **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

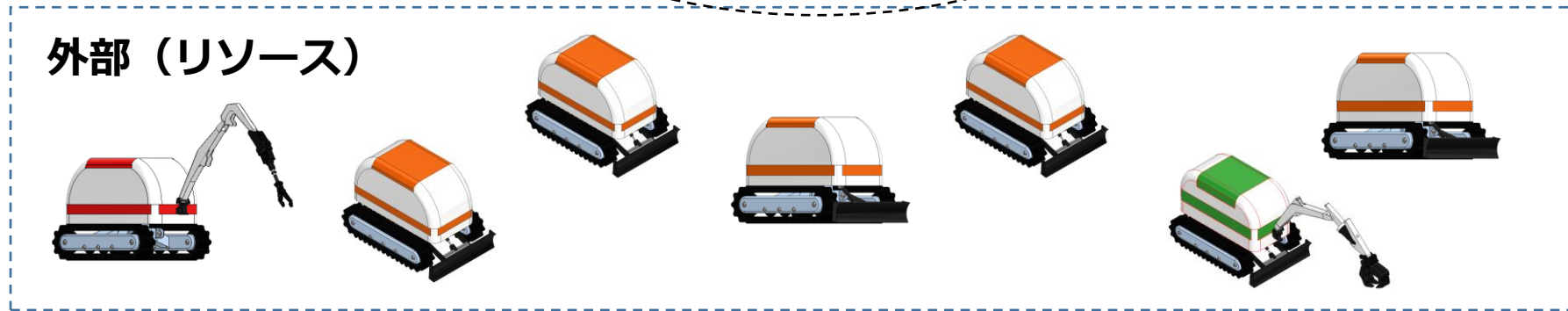


境界条件としての自己

- 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

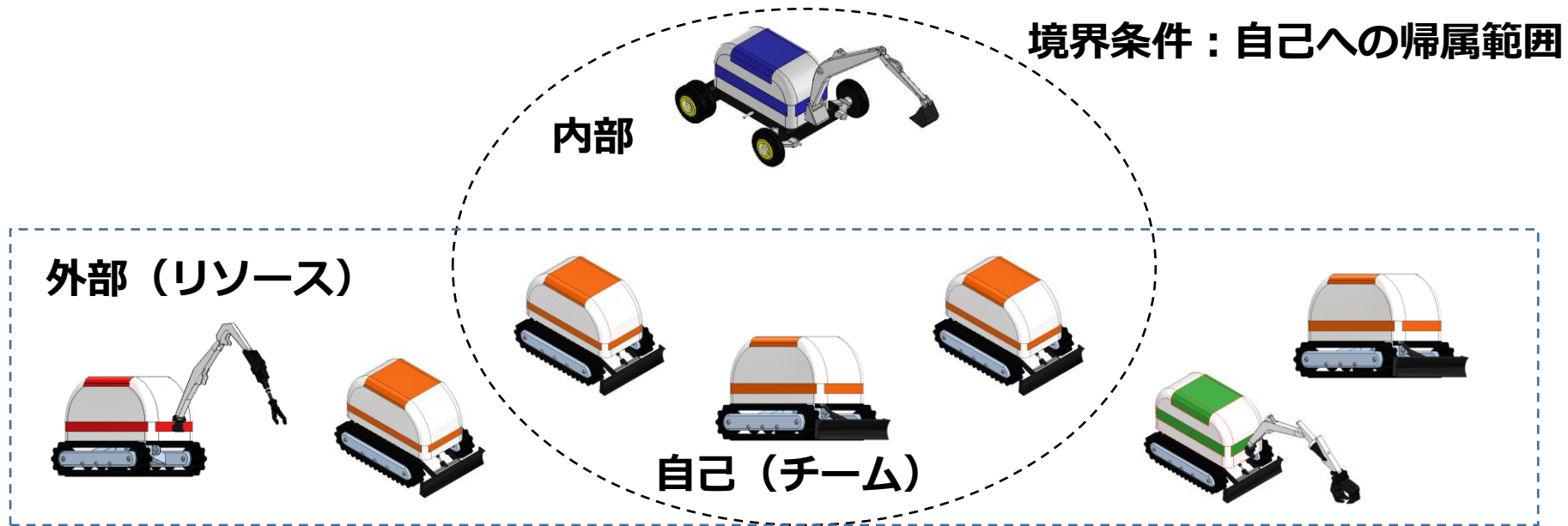


境界条件：自己に帰属



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



複数台ロボットの動的協働システム：(1) 動的協働AIの体系化

担当：東京大 浅間PI

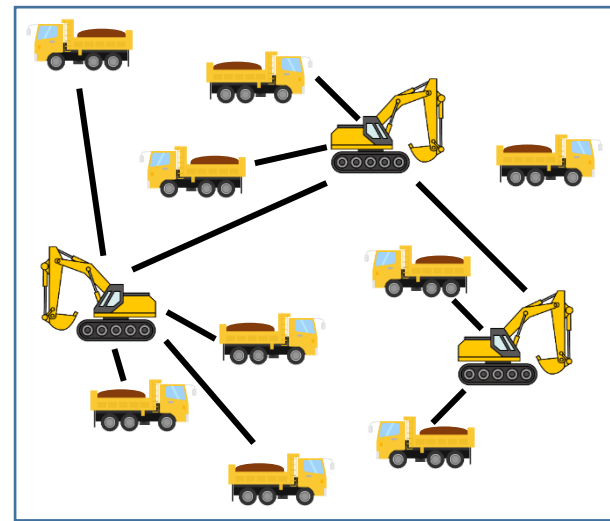
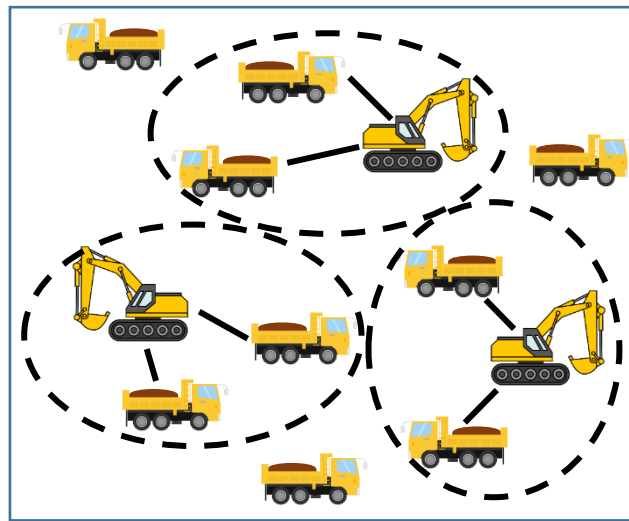
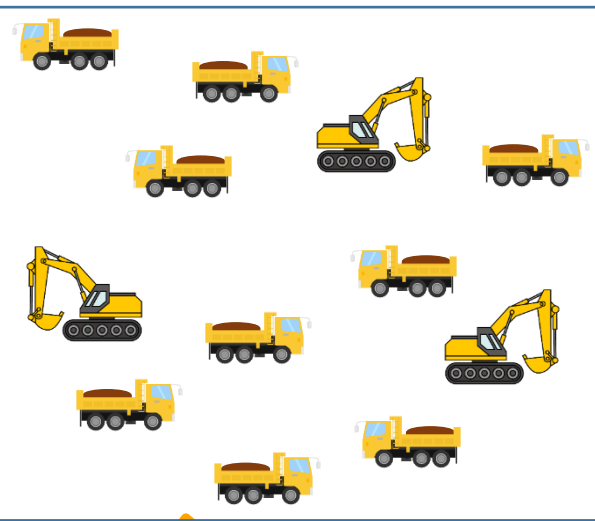
背景：

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アーキテクチャ・アルゴリズムは明らかにされていない

無・秩序
無・構造
多・単独
フラット
並列

部分的な構造化

秩序
多・構造
無・単独
階層
中央集権

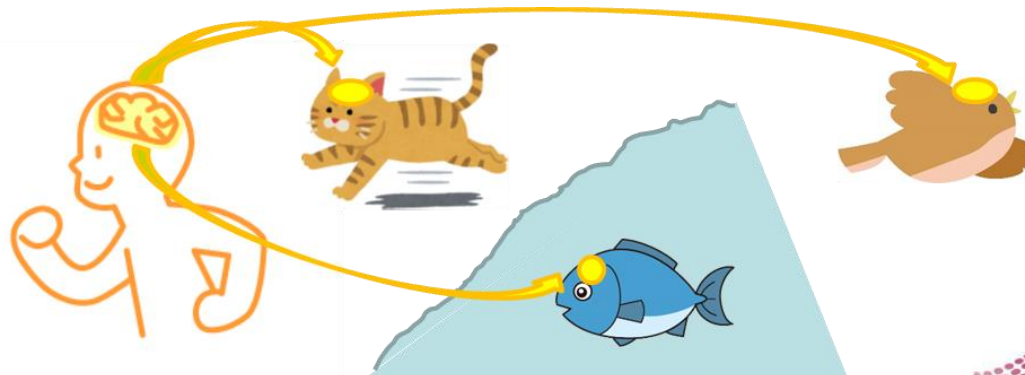


ロボットに必要なとなる知能とは

- 多様な要求や無限定な環境での適応性
- ロボットに必要なとなる知能はロボットプラットフォームにAIを搭載すれば実現できるか？
 - Ill-defined, Ill-structured, 未知環境への適応的応答
 - ノイズ, 実時間性
 - ブラックボックス化, 説明可能性, 過学習

AIを搭載したロボット？

- AI・深層学習・機械学習
 - データ駆動型(過去の経験に基づく学習)
 - いわゆる人間の認識や意思決定の計算機化(大脳皮質などの機能)
 - 人間の運動制御の機能(小脳, 基底核, 脳幹, 脊髄などの機能)？
- 運動制御に必要な知能＝身体あつての知能
 - 人間の脳を鳥や猫や魚に載せて機能するか



まとめ

- 人共存サービスロボット
 - 社会に受容されるロボット
 - 人の理解と人も含めたシステムとして設計
- ポストコロナ社会におけるサービスロボットの役目
 - 社会変革が加速
 - 想定外の事態に対する備え
 - 新たなビジネスチャンス(ビジネスモデルの構築)

ご清聴ありがとうございました