

記号創発ロボティクスから 実世界言語理解知能への展望

Tadahiro Taniguchi

- 1) Professor, College of Information Science & Engineering,
Ritsumeikan University
- 2) Visiting General Chief Scientist, Technology Division,
Panasonic Holdings Corporation

Lecture at

【第60回AIセミナー】

「言語を用いて経験を共有可能なロボットの実現を目指して」

人工知能研究センター、産業技術総合研究所、30th November 2022

Tadahiro Taniguchi (谷口忠大)



Email: taniguchi@ci.ritsumei.ac.jp

Twitter: @tanichu

- 2006: 京都大学大学院工学研究科精密工学専攻 (機械系)
- 2005: 日本学術振興会特別研究員(DC)京都大学
- 2006: 日本学術振興会特別研究員(PD)京都大学
- 2008: 立命館大学情報理工学部助教
- 2010: 立命館大学情報理工学部准教授
- 2015-2016 インペリアル・カレッジ・ロンドン
客員准教授

- 2016-: 一般社団法人ビブリオバトル協会代表理事
- 2017-: 立命館大学情報理工学部教授
- 2017-: パナソニック客員総括主幹技師
(クロスアポイントメント)
- 2022-: 立命館大学RARAフェロー



僕とアリスの夏物語
人工知能の、その先へ
(岩波科学ライブラリ)
2022/1/15



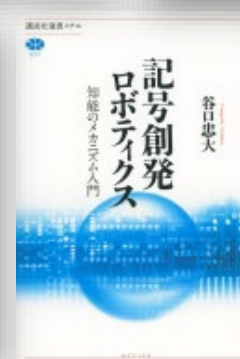
横澤一彦・編「心をとらえるフ
レームワークの展開」
(東京大学出版会) 2022/10/11
6章 記号創発ロボティクス(谷口)



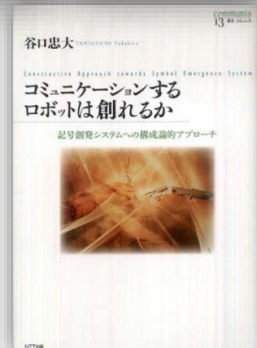
「心を知るための人
工知能」
(共立出版) 2020



「賀茂川コミュニ
ケーション塾」
(世界思想社) 2019



「記号創発ロボティクス」
(講談社メチエ)
2014



「コミュニケーションする
ロボットは創れるか」
(NTT出版) 2010

本講演のモチベーション

AIST佐土原さんのメールより一部抜粋

- 近年、自己教師あり学習や教師なし学習により、人手を介さず自律的に学習するシステムが実現可能になってきました。しかし、学習されたモデルや入出力の過程がブラックボックスであるという問題があり、何らかの言語を介したコミュニケーションによって、学習された有用な知見を共有可能にするための技術について議論したいというのが企画の意図であります。
- ご承知のように、多感覚入力と大規模言語モデルを結びつけ、外界について人間と自然言語で対話しているように見せるシステムは可能になってきました。しかし、合目的な対話が困難であったり、システムの環世界から学習したモデルとの接合が困難であったり、その時、その場で必要になる概念の動的運用が困難であるなどの課題があると考えております。
- 一方で、このような天下りのな知能モデルとは一線を画して、ボトムアップな概念獲得に基づいて言語を操るロボットの実現を目指す、**記号創発ロボティクス**という野心的な分野を先生は開拓されてこられました。最近では、**他者との共創による記号創発**に関して注目すべき成果も挙げていらっしゃいます。そこで、上記セミナーにおいて、**自律的な学習を行い、他者と経験を共有可能にする言語を創発し運用するロボット**に関して、ご講演をお願いさせて頂いた次第です。
- 参加者は、さまざまな分野の研究者の他にも、企業の研究マネージャーや技術者も多いと思われます。できますれば、**言語の社会性、動的な性質から解きほぐして頂き、記号創発ロボティクスの到達点、今後の展望**についてご講演頂ければ幸いです。

A Generalist Agent [DeepMind 2022]

TransformerはVision Transformer(ViT)等への他モダリティの応用を経てマルチモーダル、マルチタスク学習へ。→DeepMind的（全脳ア的）AGIへ？



Figure 1 | A generalist agent. Gato can sense and act with different embodiments across a wide range of environments using a single neural network with the same set of weights. Gato was trained on 604 distinct tasks with varying modalities, observations and action specifications.

Inspired by progress in **large-scale language modeling**, we apply a similar approach towards building a single generalist agent beyond the realm of text outputs. The agent, which we refer to as Gato, works as a multi-modal, multi-task, multi-embodiment generalist policy. The same network with the same weights can play Atari, caption images, chat, stack blocks with a real robot arm and much more, deciding based on its context whether to output text, joint torques, button presses, or other tokens. In this report we describe the model and the data, and document the current capabilities of Gato.

Reed, Scott, et al. "A generalist agent." *arXiv preprint arXiv:2205.06175* (2022).

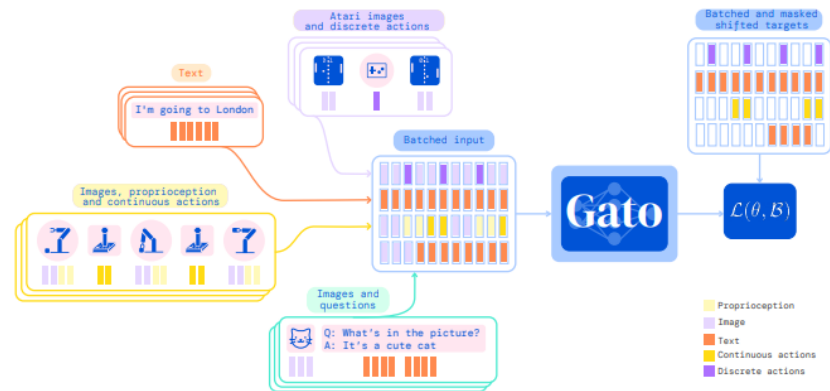


Figure 2 | Training phase of Gato. Data from different tasks and modalities is serialized into a flat sequence of tokens, batched, and processed by a transformer neural network akin to a large language model. Masking is used such that the loss function is applied only to target outputs, i.e. text and various actions.



Image Credit: Yuichiro Chino/Getty

<https://venturebeat.com/2022/06/04/is-deepminds-gato-the-worlds-first-agi/>

Contents

1. はじめに

- ✓ 記号創発ロボティクス

2. 記号創発システム

- ✓ 記号・言語の恣意性・動的特性

3. 集合的予測符号化と共創的学習

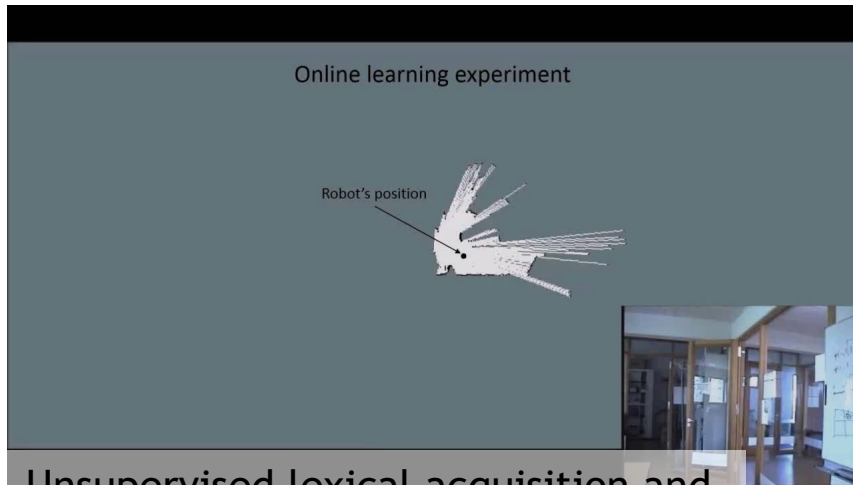
- ✓ メトロポリス・ヘイスティングス名付けゲーム

4. 言語とロボティクス

- ✓ 大規模言語モデルと実世界サービスロボット

5. まとめ

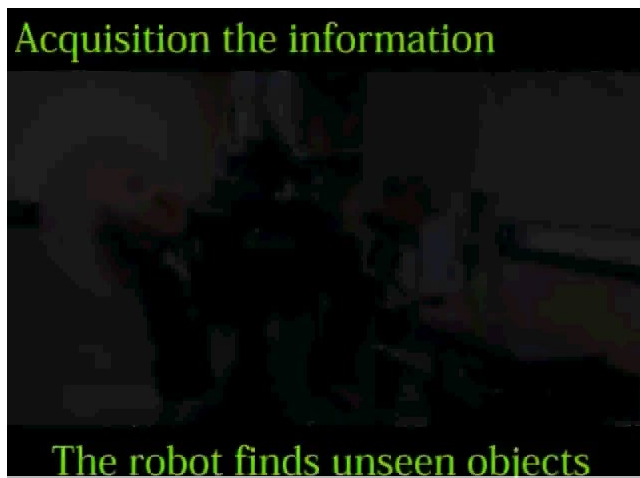
Symbol emergence in robotics using probabilistic generative models



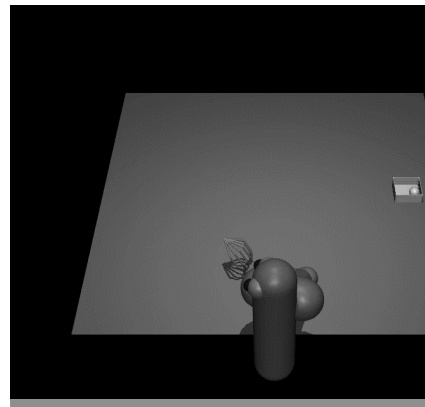
Unsupervised lexical acquisition and spatial concept formation



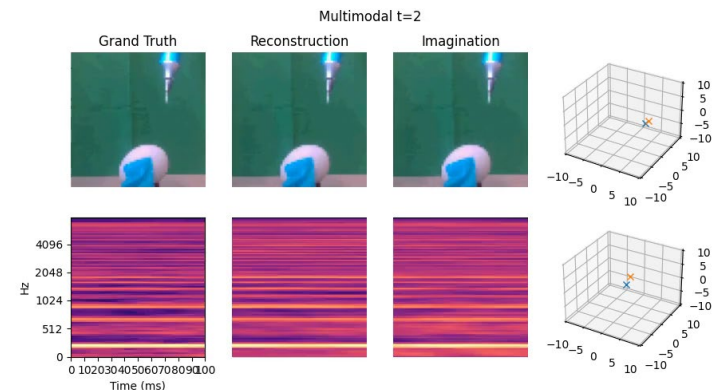
Application to service robotics



Multimodal object categorization



Integration of imitation and reinforcement learning



Multimodal World modeling for manipulation

発達の知能への構成論的アプローチ



谷口忠大「コミュニケーションするロボットは創れるか」(NTT出版) 2010



谷口忠大「記号創発ロボティクス」(講談社メチエ) 2014



谷口忠大「心を知るための人工知能」(共立出版) 2020

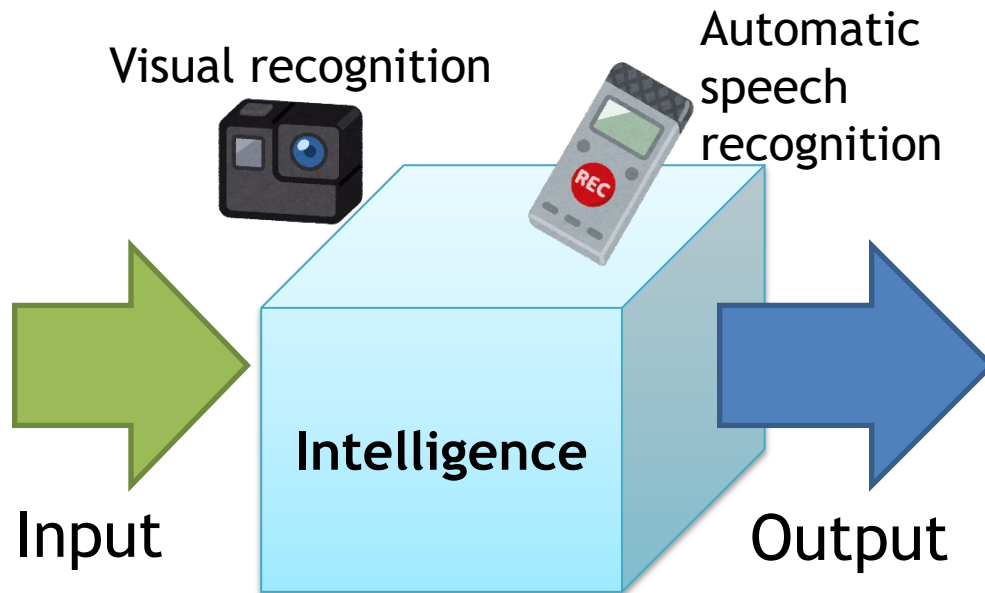


谷口忠大「賀茂川コミュニケーション塾」(世界思想社) 2019

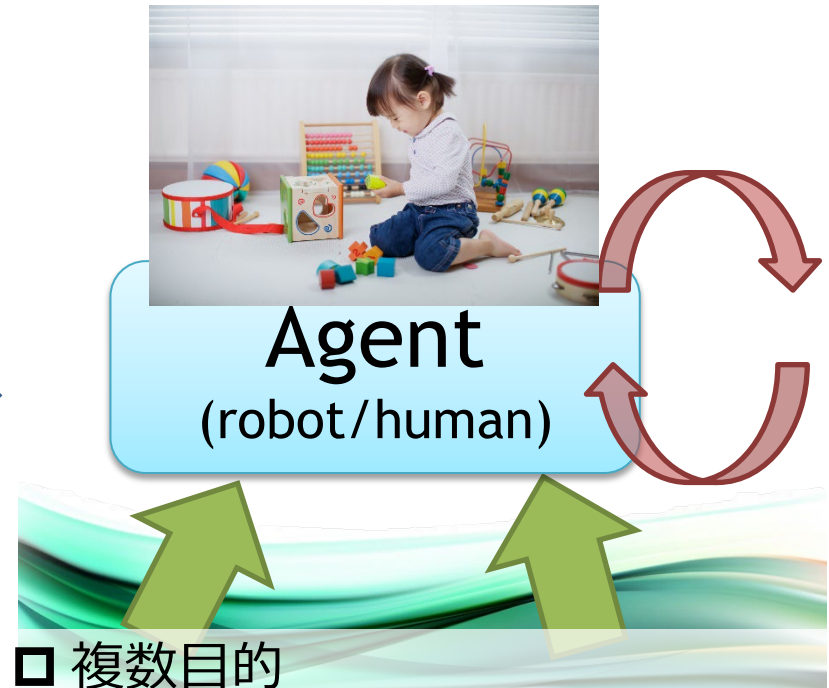
- 人間の子供は**自らの身体的経験**，**感覚運動情報の統合**を通じて機能を獲得し，言語を獲得し，コミュニケーションをも可能にする。
- 実世界経験**に基づく**言語獲得ロボット**（AI）の実現とそれを通じた人間の**認知発達**の理解

記号創発システムへの
構成論的アプローチ

知能は「関数」か「全体」か？



- 単一目的
- タスク指向
- 情報処理としての知性
- 自律性なし

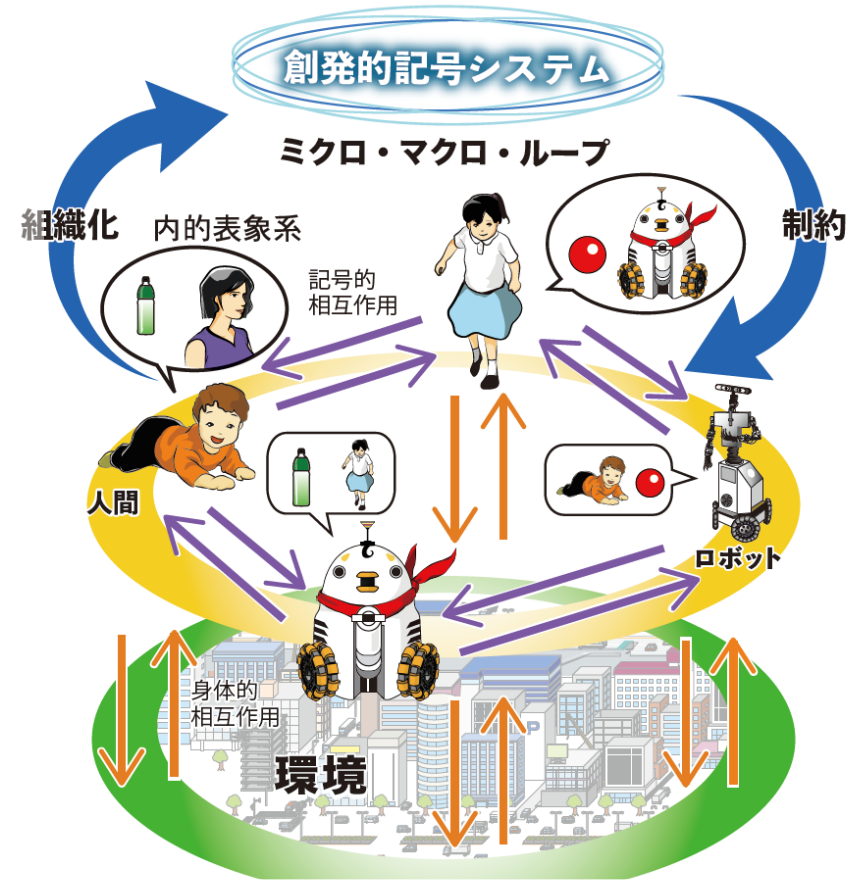


- 複数目的
- 様々なタスクを一つの身体で
- 感覚運動情報の自己組織化
- 自律性あり

- ◆ 実世界で様々なタスクを行う生物（人間）の知能は感覚運動情報の自己組織化によって出現する存在である。
- ◆ 実世界で働くロボットは単一の身体の上で様々な認知機能を統合し、適応し、タスクを行う必要がある。

記号創発ロボティクス [Taniguchi+ 16, 19]

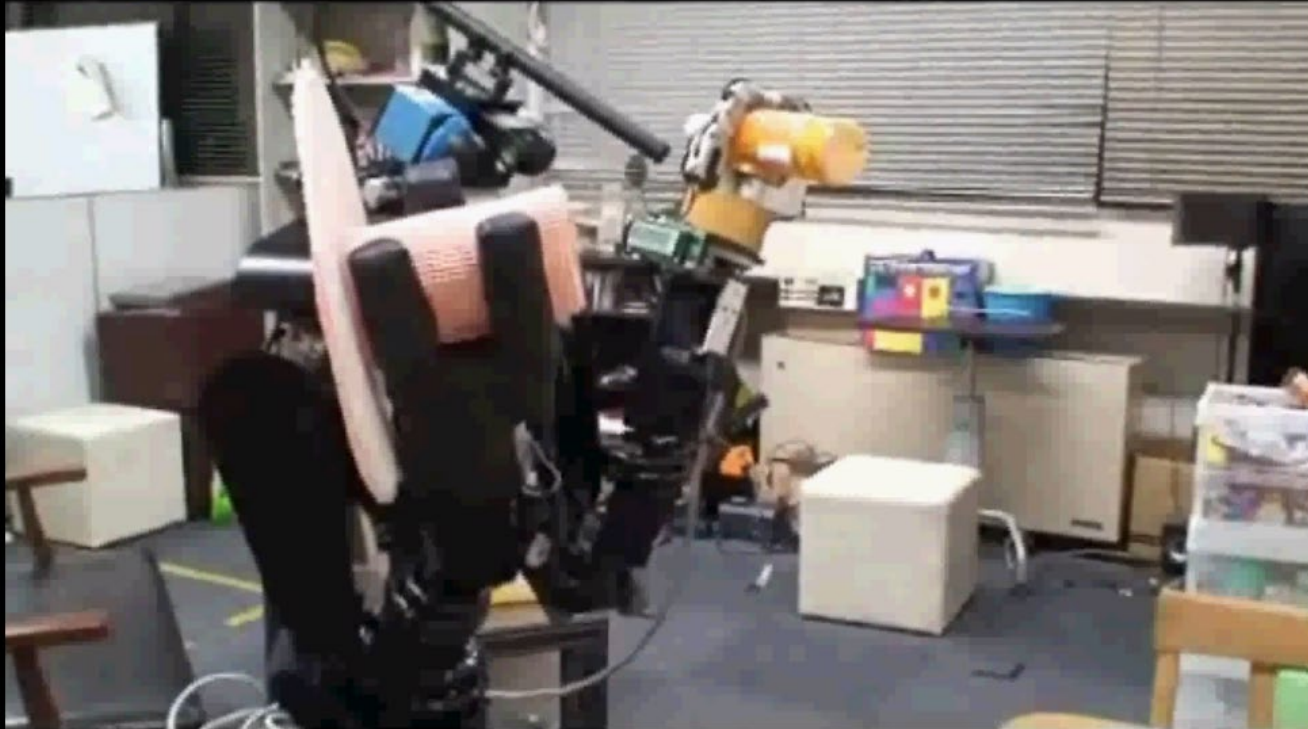
- 私たちの社会において言語などの記号システムはボトムアップ的に形成されている。
- 認知システムにおける内部表現のボトムアップ的形成と社会における記号システムの形成（**記号創発システム**）は、計算論的・構成論的にモデル化されるべきである。
- また、その現象を実世界の環境で再現する（**記号創発ロボティクス**）。



- Tadahiro Taniguchi, Takayuki Nagai, Tomoaki Nakamura, Naoto Iwahashi, Tetsuya Ogata, and Hideki Asoh, Symbol Emergence in Robotics: A Survey, Advanced Robotics, 30(11-12) pp.706-728, 2016. DOI:10.1080/01691864.2016.1164622
- Tadahiro Taniguchi, Emre Ugur, Matej Hoffmann, Lorenzo Jamone, Takayuki Nagai, Benjamin Rosman, Toshihiko Matsuka, Naoto Iwahashi, Erhan Oztop, Justus Piater, Florentin Wörgötter, Symbol Emergence in Cognitive Developmental Systems: A Survey, IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 11(4), pp.494-516, 2019. DOI: 10.1109/TCDS.2018.2867772

Multimodal Categorization and Lexical Acquisition by an Autonomous Robot [Nakamura+ 2009-]

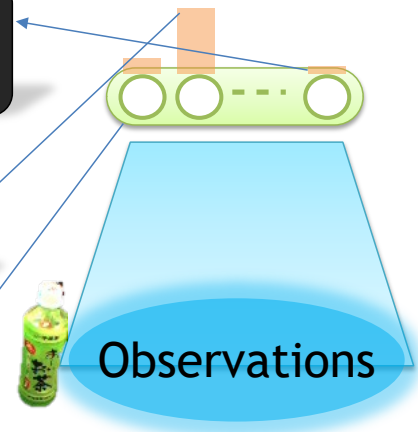
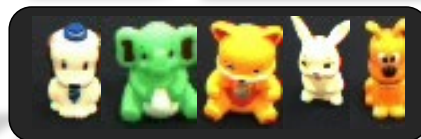
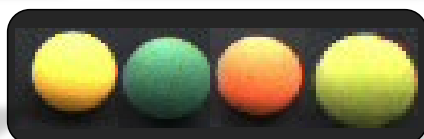
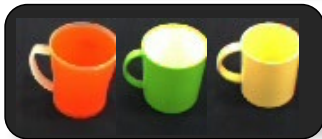
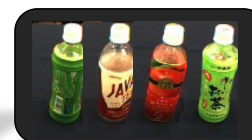
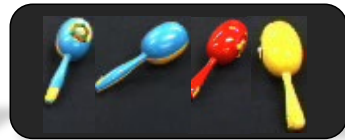
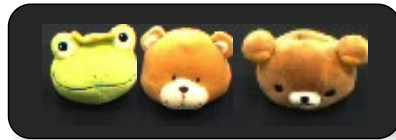
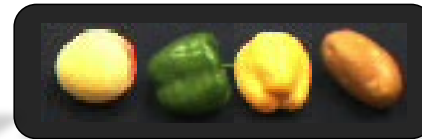
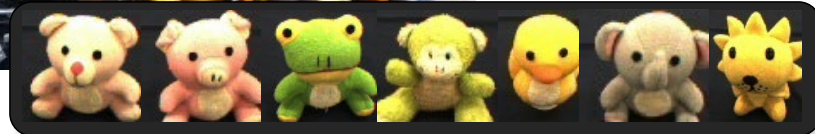
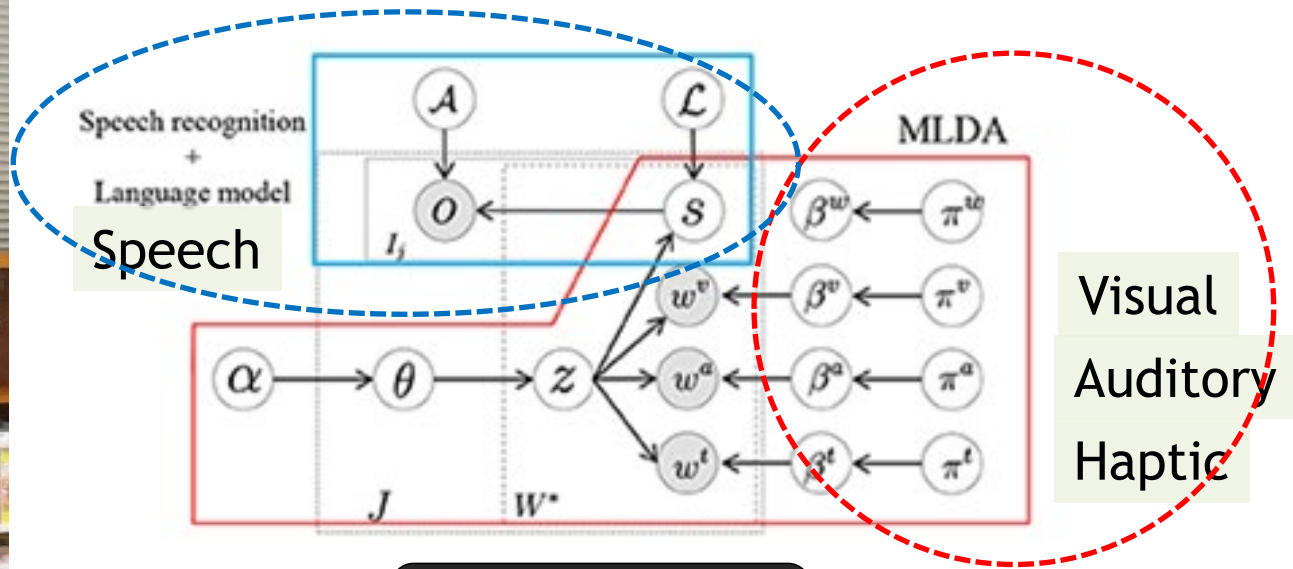
Acquisition the information



1. Haptic information

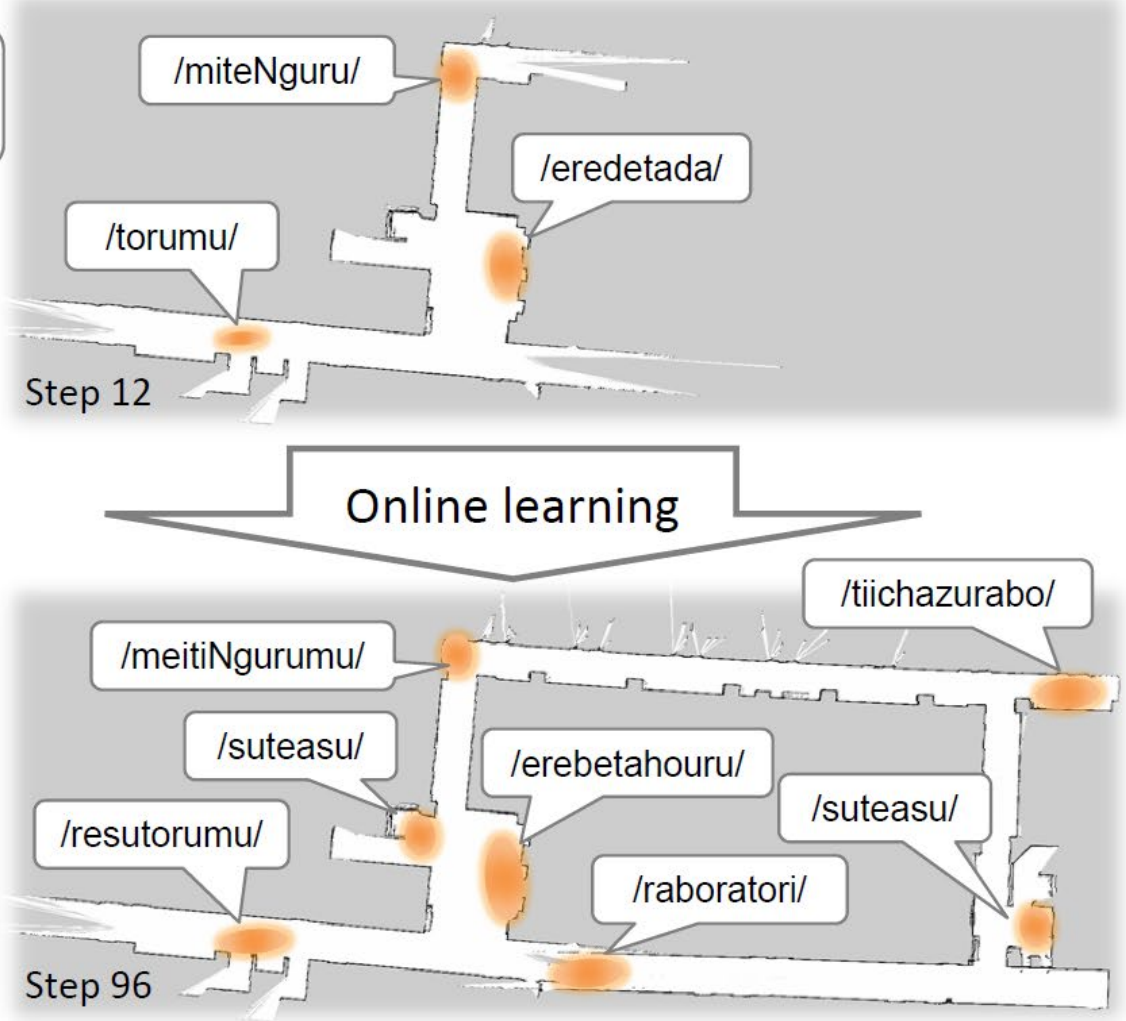
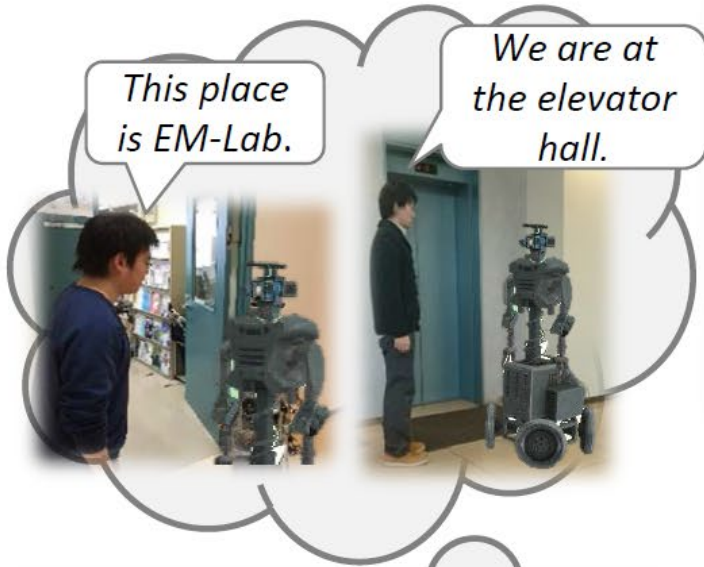
Takaya Araki, Tomoaki Nakamura, Takayuki Nagai, Shogo Nagasaka, Tadahiro Taniguchi, Naoto Iwahashi.
[Online Learning of Concepts and Words Using Multimodal LDA and Hierarchical Pitman-Yor Language Model](#).
IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2012 (IROS 2012), 1623-1630 .(2012)

Simultaneous multimodal object categorization and word discovery by integrating multimodal LDA and nonparametric Bayesian unsupervised word segmentation[Nakamura+ 2014]



By integrating multimodal sensory information and speech signals, a robot could form categories, discover words, i.e., signs, from speech signals, and acquire grounded lexicons.

Online spatial concept formation and lexical acquisition: **SpCoSLAM** [Taniguchi+ 2017]



Akira Taniguchi, Yoshinobu Hagiwara, Tadahiro Taniguchi and Tetsunari Inamura, Online Spatial Concept and Lexical Acquisition with Simultaneous Localization and Mapping, IEEE IROS 2017

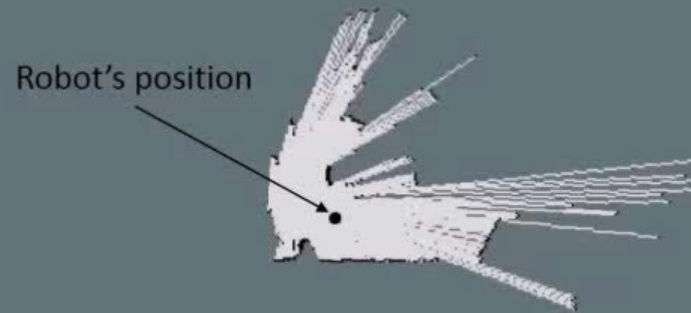
Akira Taniguchi, Yoshinobu Hagiwara, Tadahiro Taniguchi, Tetsunari Inamura, Improved and scalable online learning of spatial concepts and language models with mapping, Autonomous Robots, 2020. DOI: 10.1007/s10514-020-09905-0

Online spatial concept acquisition method

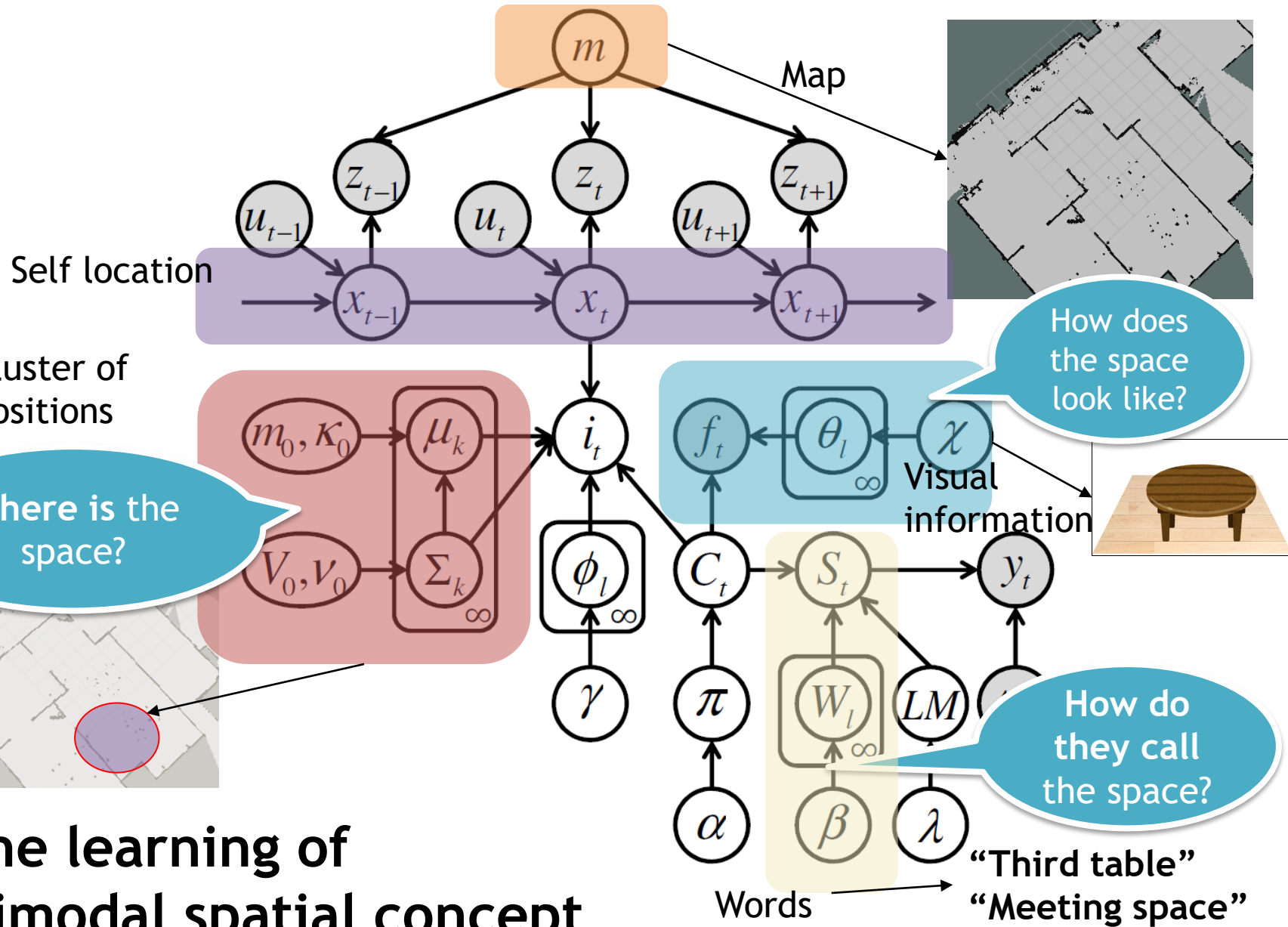
SpCoSLAM [Taniguchi+ 2017]

(including word discovery task)

Online learning experiment



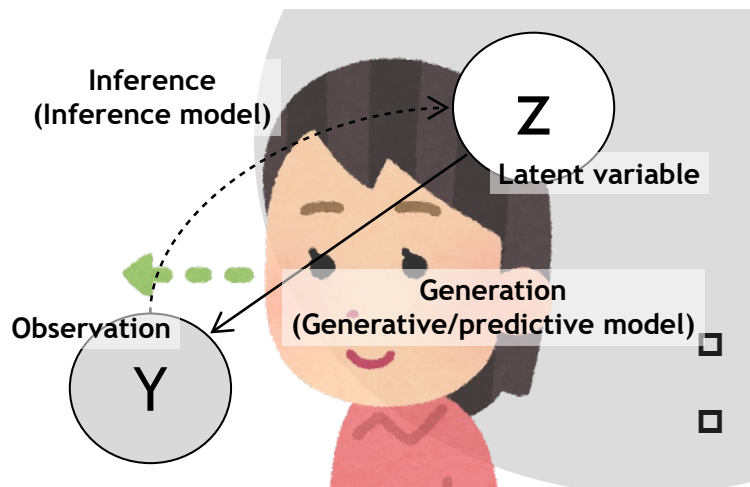
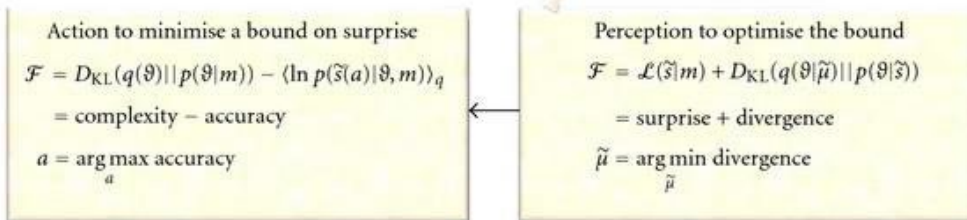
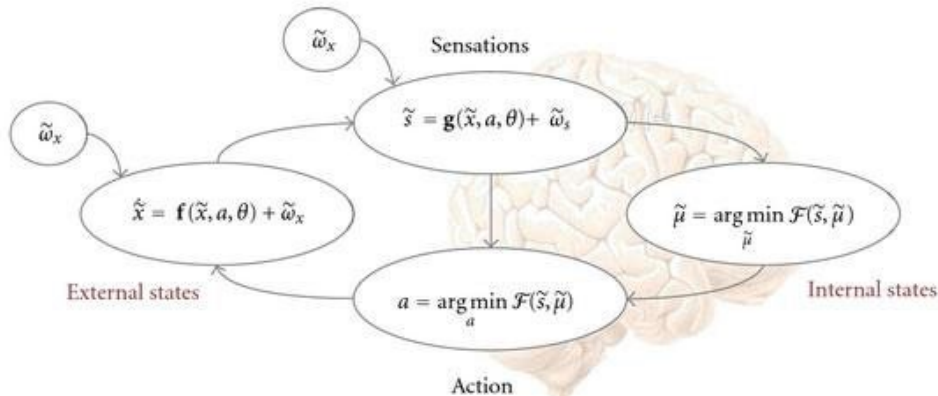
SpCoSLAM: マルチモーダルな 場所概念・語彙獲得の確率的生成モデル



Online learning of
Multimodal spatial concept

Generative view of cognition

Free energy principle/ predictive coding/world models



Neural Networks

Available online 21 September 2021

In Press, Journal Pre-proof



2021 Special Issue

World model learning and inference

Karl Friston^a, Rosalyn J. Moran^b, Yukie Nagai^c, Tadahiro Taniguchi^d, Hiroaki Gomi^{e, f}, Josh Tenenbaum^{e, f}

Show more

+ Add to Mendeley

Share

Cite

<https://doi.org/10.1016/j.neunet.2021.09.011>

Get rights and content

Under a Creative Commons license

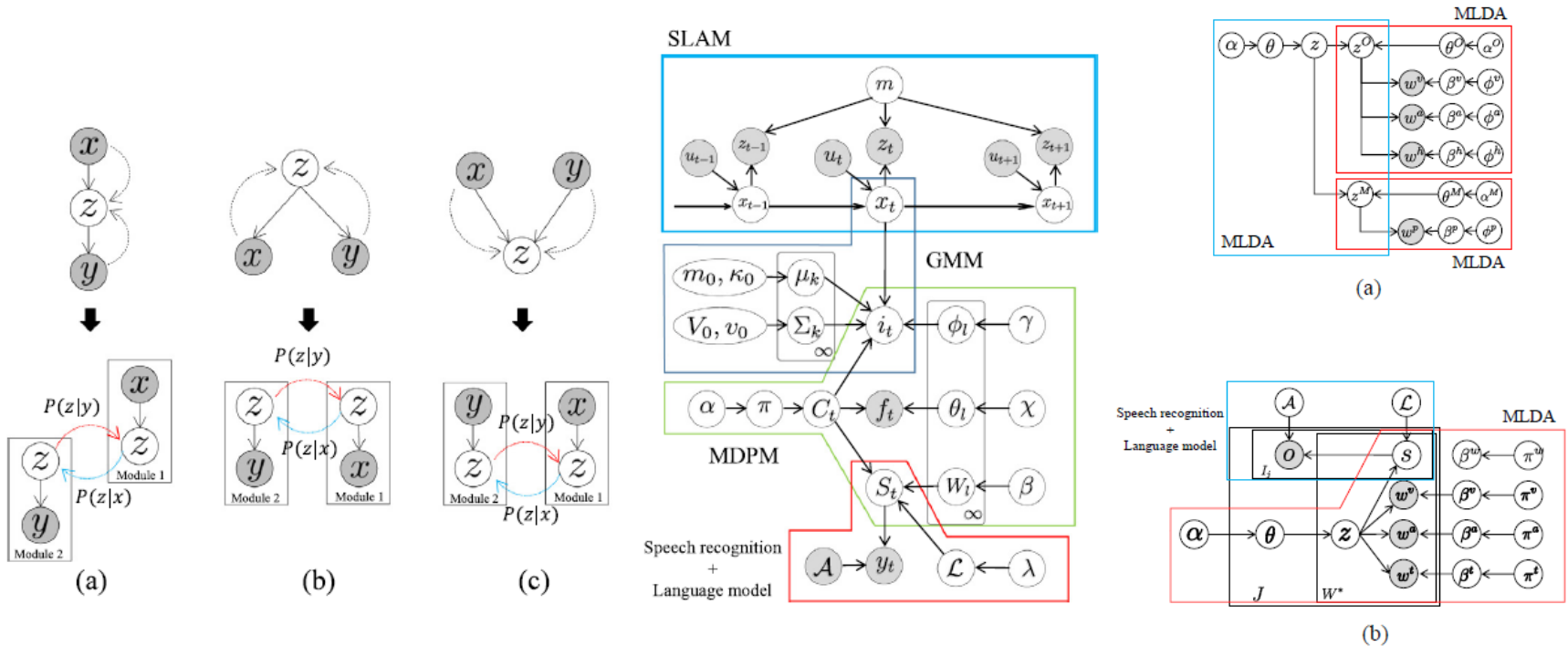
open access

Abstract

Understanding information processing in the brain—and creating general-purpose artificial intelligence—are long-standing aspirations of scientists and engineers worldwide. The distinctive features of human intelligence are high-level cognition and control in various interactions with the world including the self, which are not defined in advance and are vary over time. The challenge of building human-like intelligent machines, as well as progress in brain science and behavioural analyses, robotics, and their associated theoretical formalisations, speaks to the importance of the world-model learning and inference. In this article, after briefly surveying the history and challenges of internal model learning and probabilistic learning, we

- Karl Friston, and Ao Ping. "Free energy, value, and attractors." Computational and mathematical methods in medicine, 2012.
- Karl Friston, Rosalyn J. Moran, Yukie Nagai, Tadahiro Taniguchi, Hiroaki Gomi, Josh Tenenbaum, World model learning and inference, Neural Networks, 2021

SERKET: An Architecture for Connecting Stochastic Models to Realize a Large-Scale Cognitive Model [Nakamura+ 18]



- Connecting cognitive modules developed as probabilistic generative models and letting them work together as a single unsupervised learning system.
- Having inter-module communication of probabilistic information and guaranteeing theoretical consistency to some extent.
- Neuro-SERKET supports deep generative models, i.e., VAE, as well.

Nakamura T, Nagai T and **Taniguchi T**, [SERKET: An Architecture for Connecting Stochastic Models to Realize a Large-Scale Cognitive Model](#). Front. Neurorobot. 12:25. (2018) doi: 10.3389/fnbot.2018.00025

Taniguchi, T., Nakamura, T., Suzuki, M. et al. [Neuro-SERKET: Development of Integrative Cognitive System Through the Composition of Deep Probabilistic Generative Models](#). New Gener. Comput. 38, 23–48 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00354-019-00084-w>

A whole brain probabilistic generative model (WB-PGM): Toward realizing cognitive architectures for developmental robots [Taniguchi+ 2022]



Neural Networks

Available online 9 March 2022

In Press, Journal Pre-proof



2021 Special Issue on AI and Brain Science: AI-powered Brain Science

A whole brain probabilistic generative model: Toward realizing cognitive architectures for developmental robots

Tadahiro Taniguchi^{a,*,} Hiroshi Yamakawa^{b,†}, Takayuki Nagai^{c,} Kenji Doya^{d,} Masamichi Sakagami^{e,} Masahiro Suzuki^{b,} Tomoaki Nakamura^{f,} Akira Taniguchi^a

Show more

+ Ac

https://

Under



rights and content

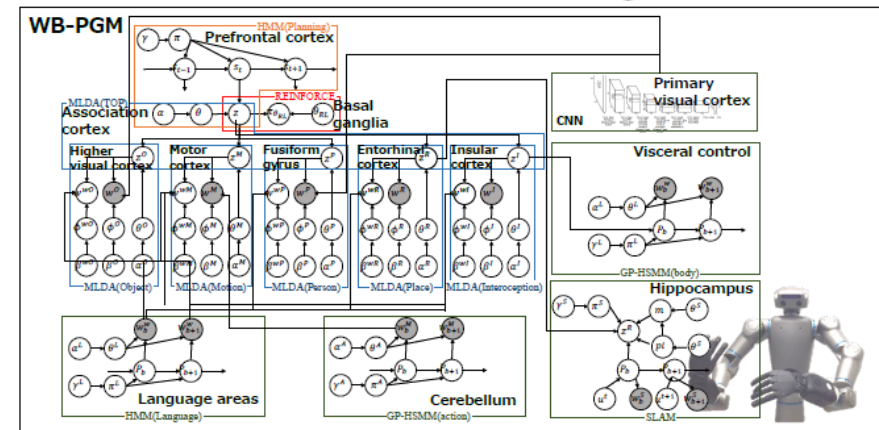
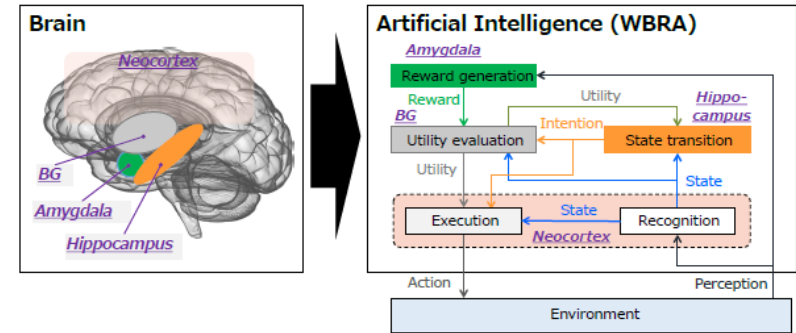
Open access

Abs

Build... k... ar... ive... an artificial... e (AI) field... to achieve... cognitive development will be an excellent reference for brain and cognitive science.

Tadahiro Taniguchi, Hiroshi Yamakawa, Takayuki Nagai, Kenji Doya, Masamichi Sakagami, Masahiro Suzuki, Tomoaki Nakamura, Akira Taniguchi, [A whole brain probabilistic generative model: Toward realizing cognitive architectures for developmental robots](#), Neural Networks, 2022

※新学術領域「人工知能と脳科学の対照と融合」(2016-2021) 領域代表・銅谷賢治の成果



Contents

1. はじめに

- ✓ 記号創発ロボティクス

2. 記号創発システム

- ✓ 記号・言語の恣意性・動的特性

3. 集合的予測符号化と共創的学習

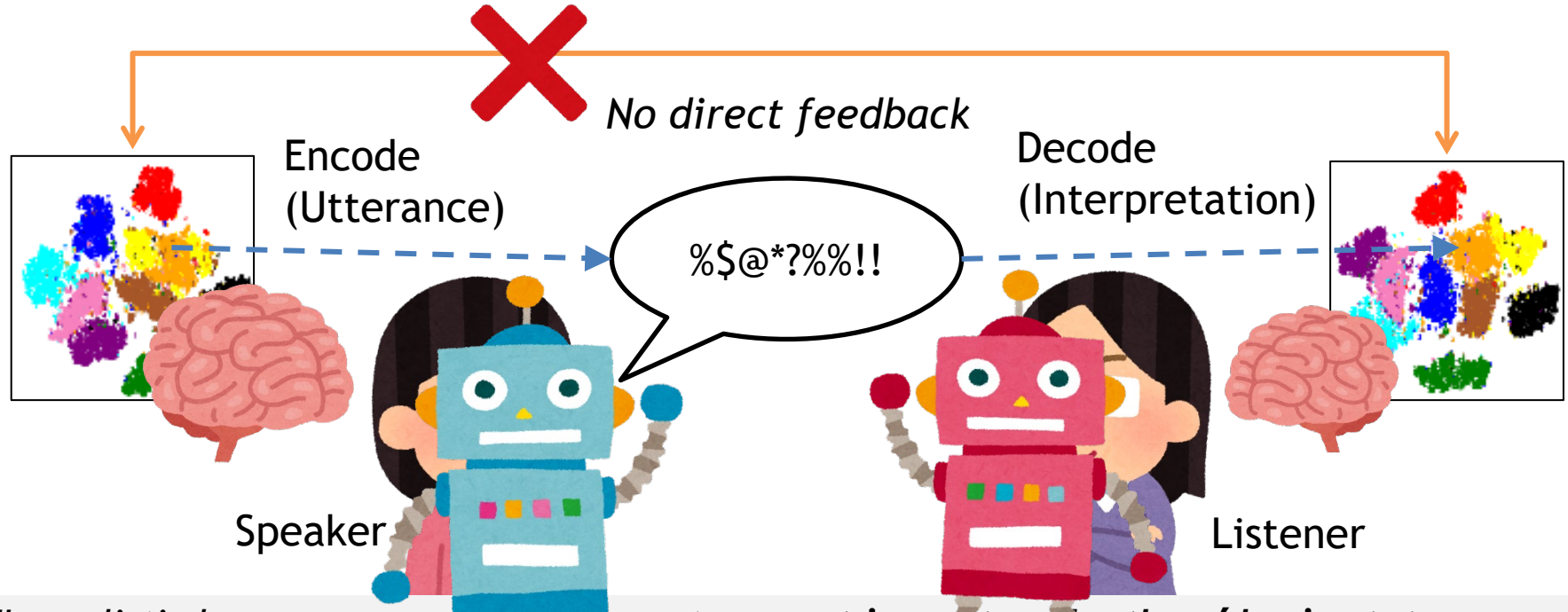
- ✓ メトロポリス・ヘイスティングス名付けゲーム

4. 言語とロボティクス

- ✓ 大規模言語モデルと実世界サービスロボット

5. まとめ

記号的コミュニケーションにおける摩訶不思議



"In realistic language games, where agents cannot inspect each others' brain states nor transmit meanings directly, there is no feedback about the meaning of a word, only about the referent." [Steels 2015]

- ✓ 人は他者の心の中を覗くことなく、いかにして記号やカテゴリーを共有し、言語などの記号体系を形成することができるのだろうか。
- ✓ 教師と学習者の関係も固定的なものでもない。完全な言語知識を持つ者はこの世界に存在しない。「教師」の存在を仮定できない。

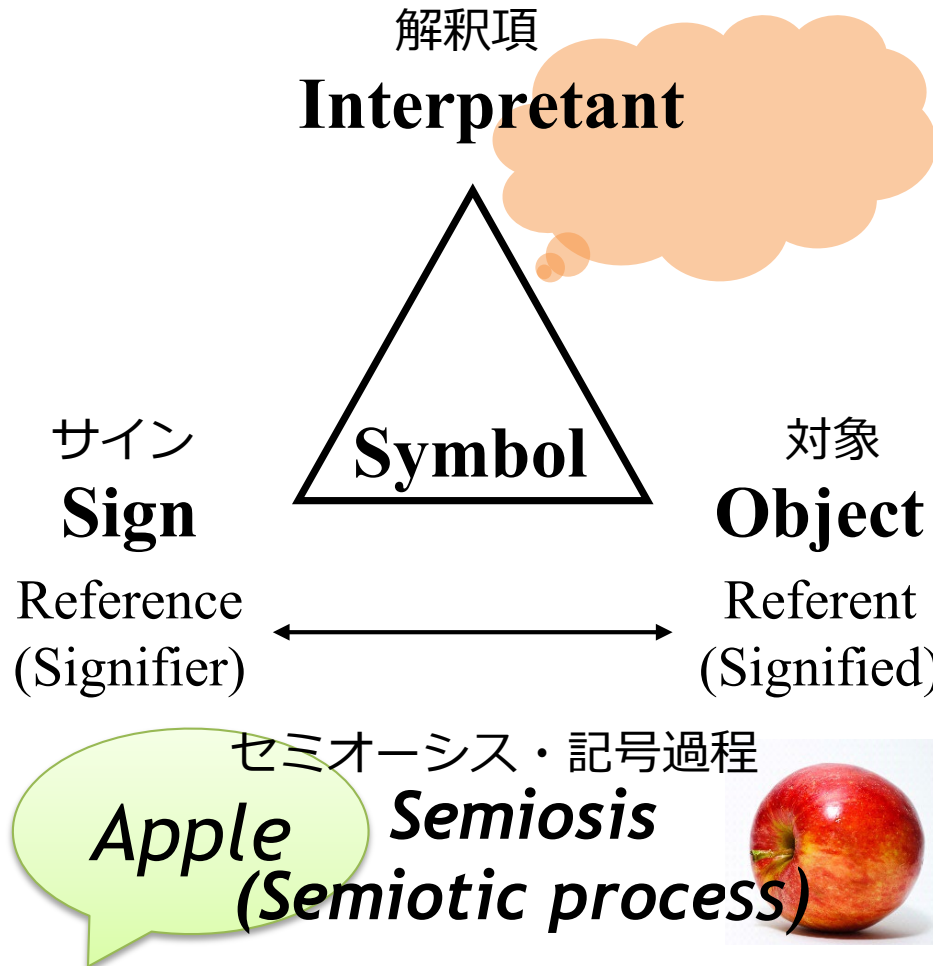
Language Evolution/ Emergent Communication/ Symbol Emergence

➤ Steels, Luc. The Talking Heads experiment: Origins of words and meanings. Vol. 1. Language Science Press, 2015.

What's symbol? / 記号とは何か？



C.S.パース
「記号論」の祖
プラグラティズムの思想家
https://en.wikipedia.org/wiki/Charles_Sanders_Peirce



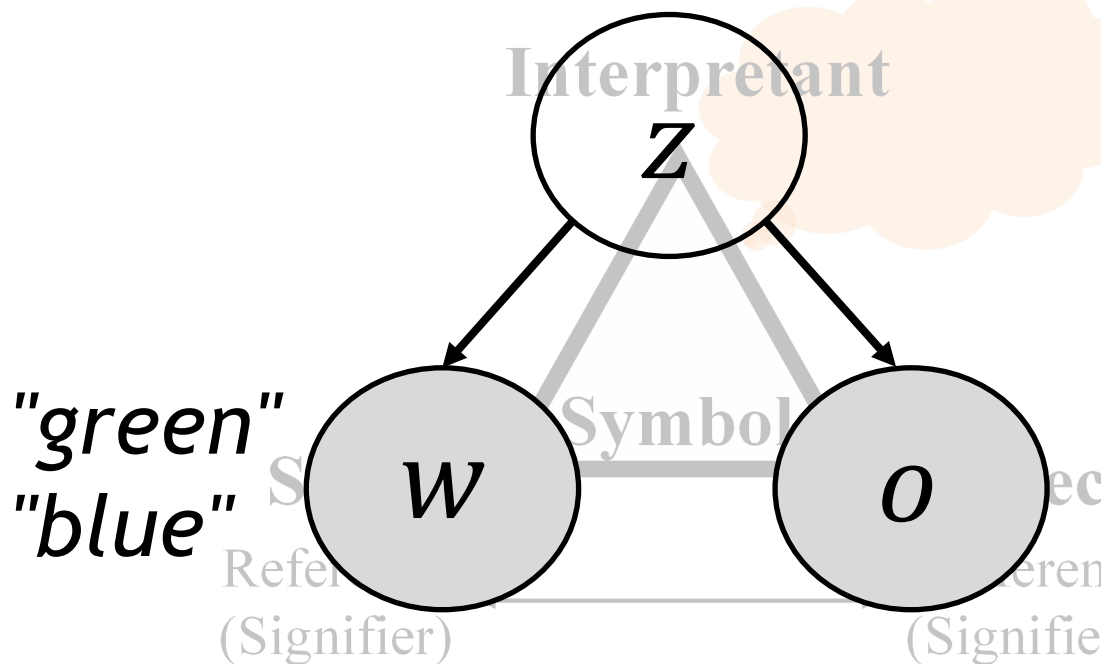
<http://visual-memory.co.uk/daniel/Documents/S4B/japanese/>

人間の社会の中で、人間と機械の間で、いかにして記号は意味を持つか？

* ここでいう「記号」は頭脳の中の（操作可能な）離散的なトークンという意味ではないではない。そのような「記号」（シンボル）は存在しない。従来の認知科学やコンピュータ科学が歴史的に担ってきた誤誘導。パースの記号論的な意味での記号を軸に議論をすすめる。

サイン（言葉）と記号（過程）の混同を避けよ ～「記号の恣意性」再訪～

- 色の名前は、ただのサイン。
カテゴリーでも概念でも記号でもない。



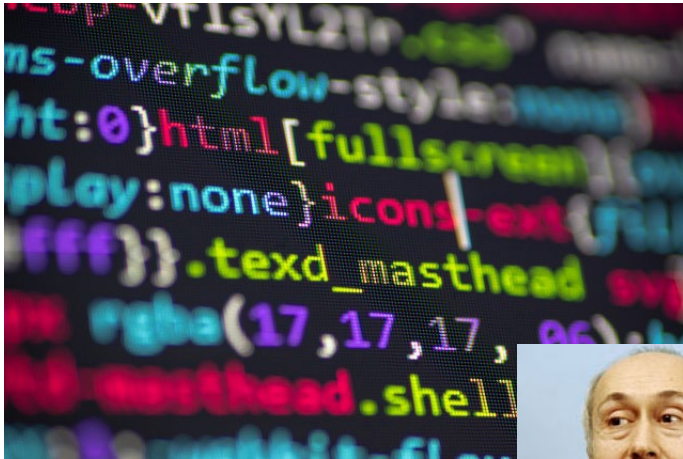
「心を知るための人工知能」
(共立出版) 2020



客観的・科学的に「青」という真のカテゴリーがあると思えないこと。
それを問うことは答えの無い問いだ。

二種類の記号概念の違い

記号論理学 (述語論理)
物理記号仮説
プログラミング言語



Harnad1990他

記号接地問題

の対象にする記号概念はこっち



記号創発システム論 (ロボティクス)
の対象にする記号概念はこっち



Taniguchi2016他

記号学
言語理解
日常の言葉



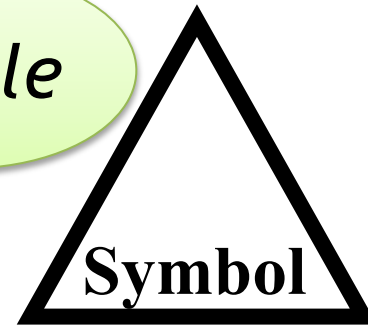
⊂

サイン
Sign

Reference
(Signifier)

Apple

解釈項
Interpretant



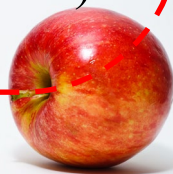
[C.S. Pierce]

対象

Object

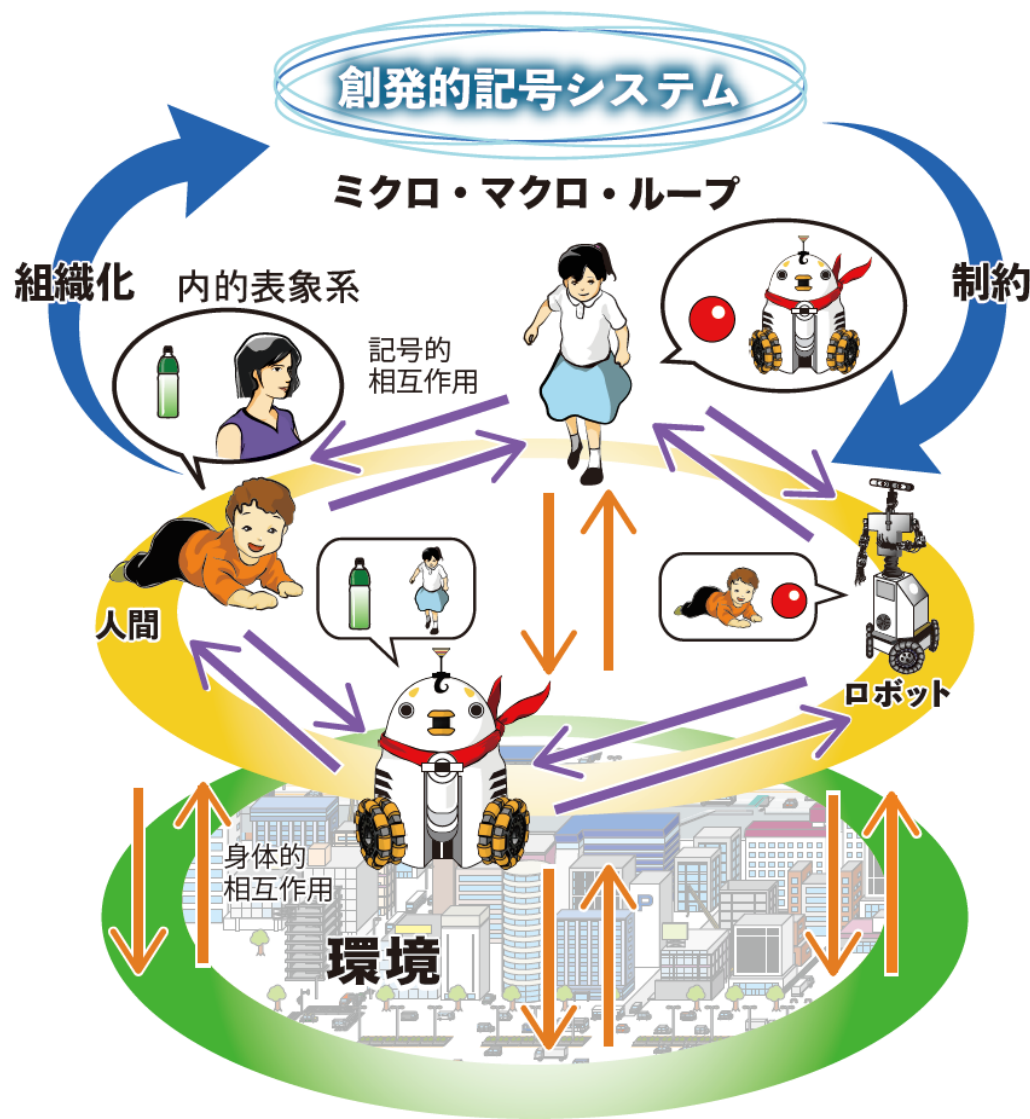
Referent
(Signified)

Semiosis : 記号過程



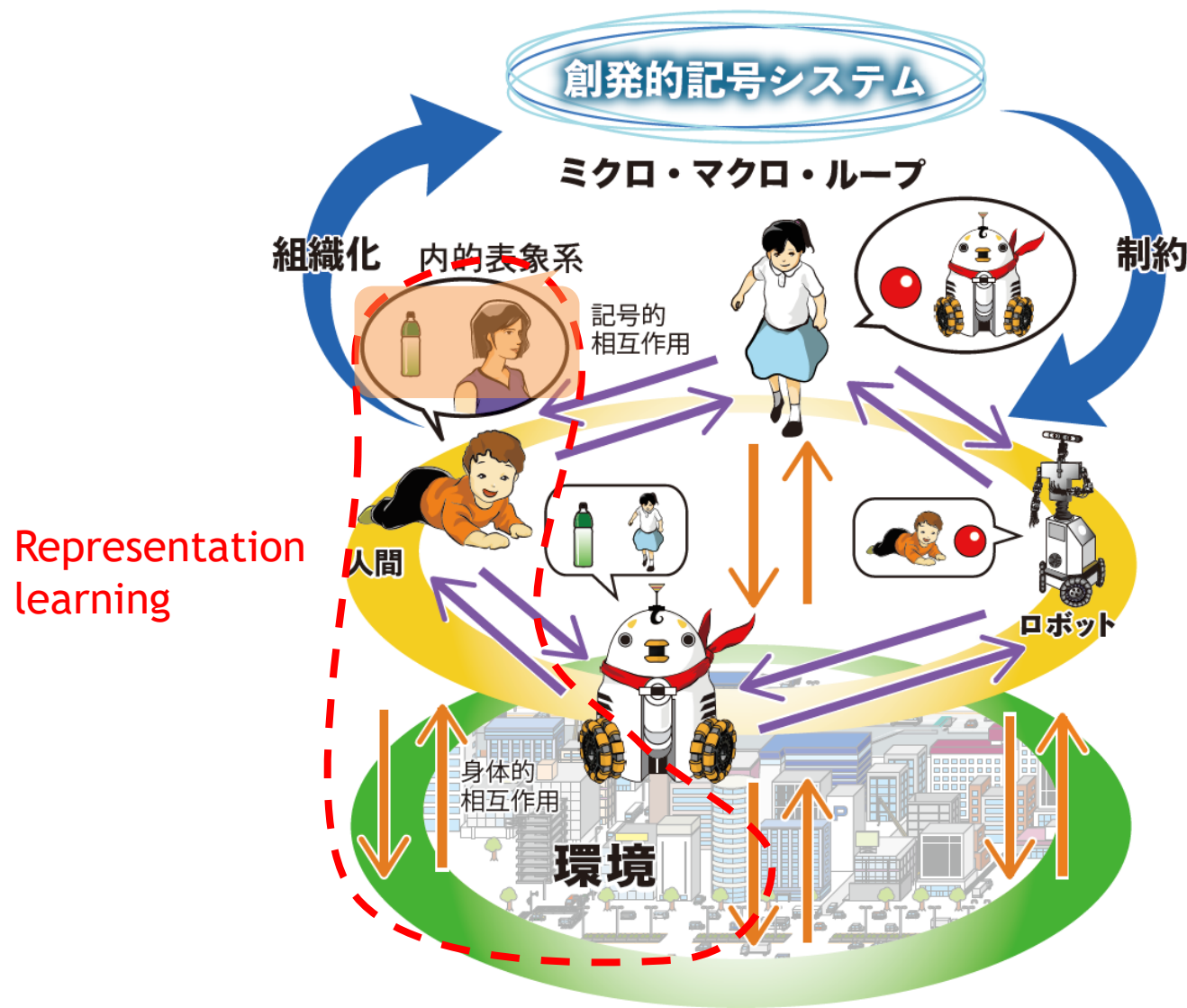
Symbol emergence systems [Taniguchi+ 2016]

記号創発システム



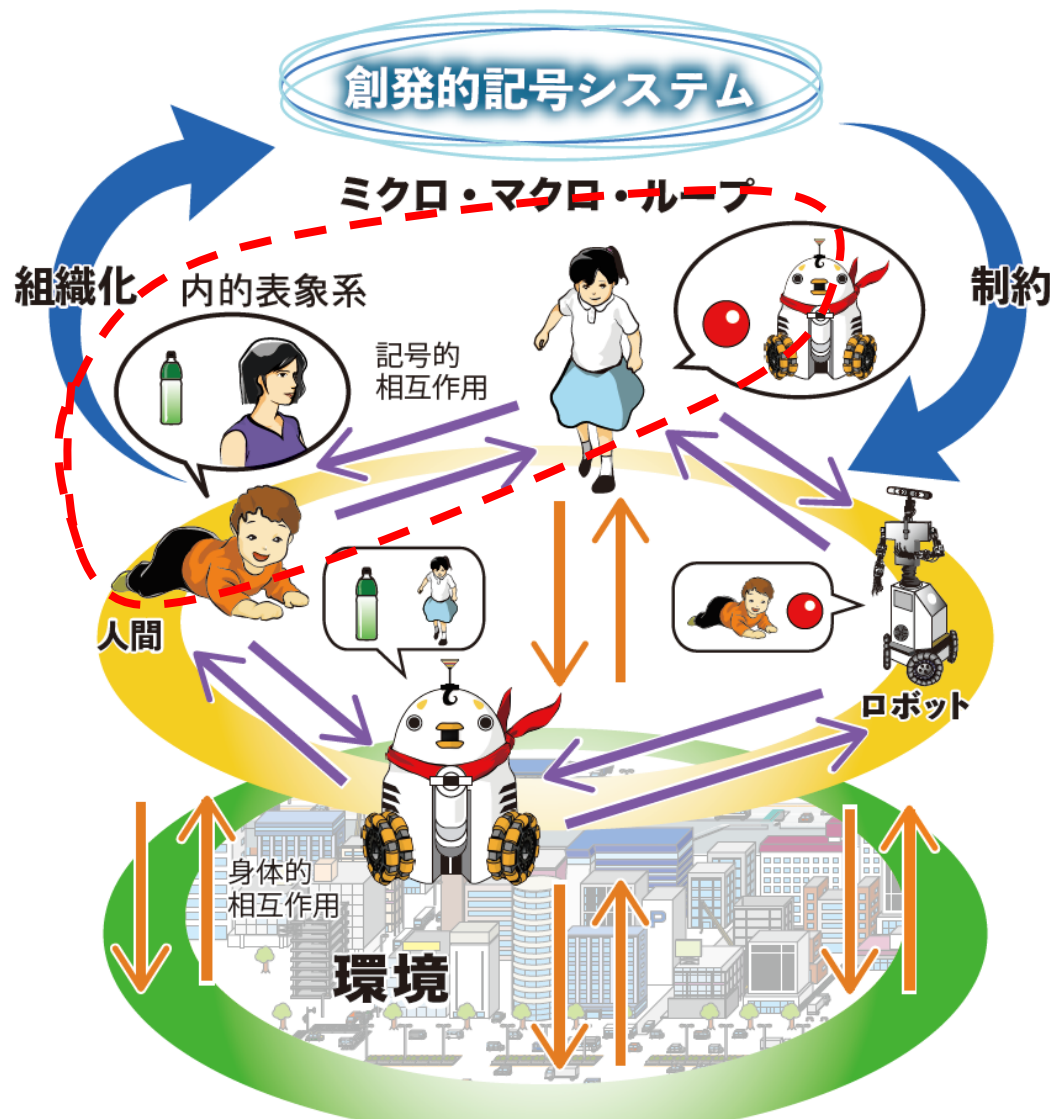
Symbol emergence systems [Taniguchi+ 2016]

記号創発システム



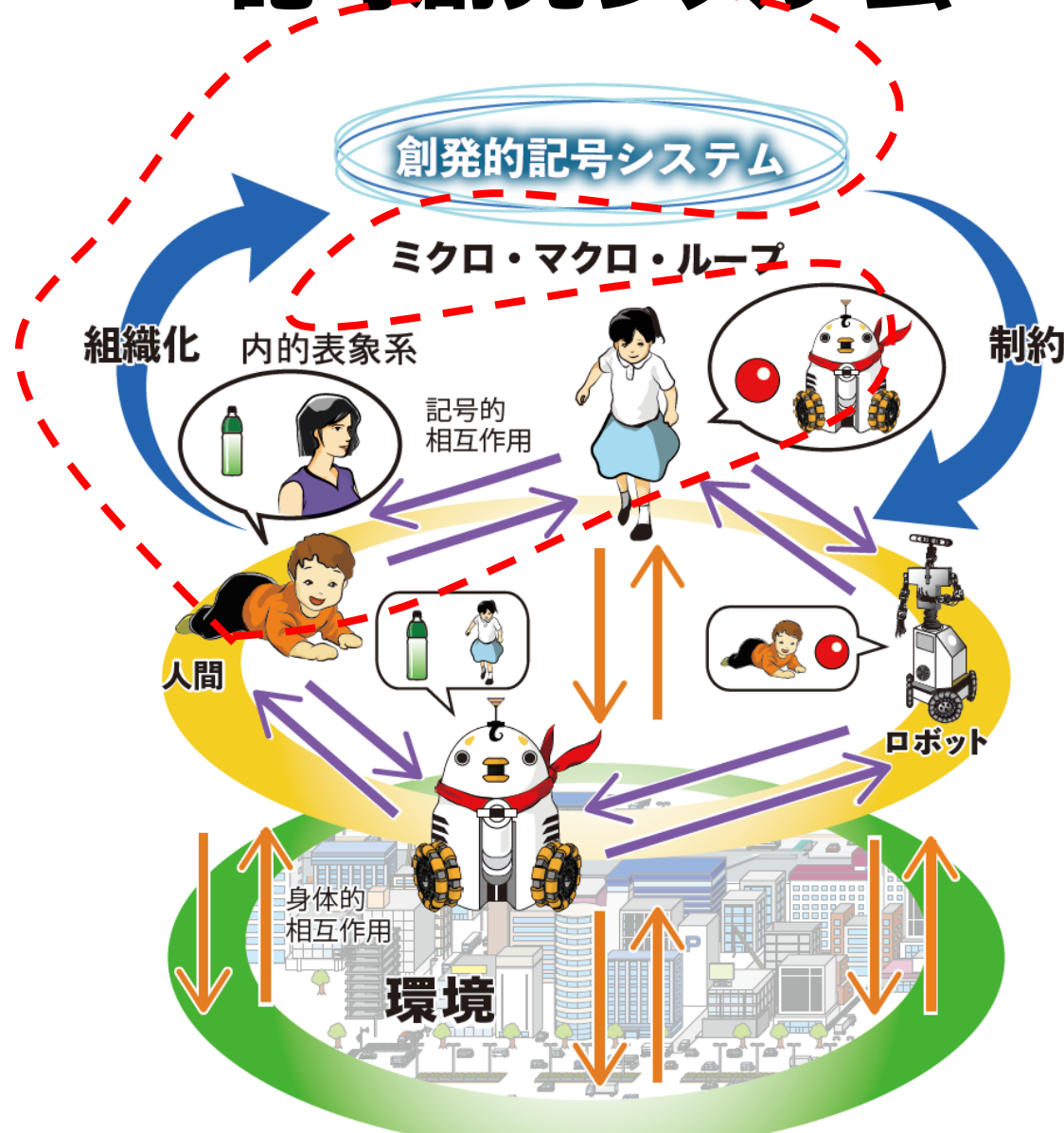
Symbol emergence systems [Taniguchi+ 2016]

記号創発システム



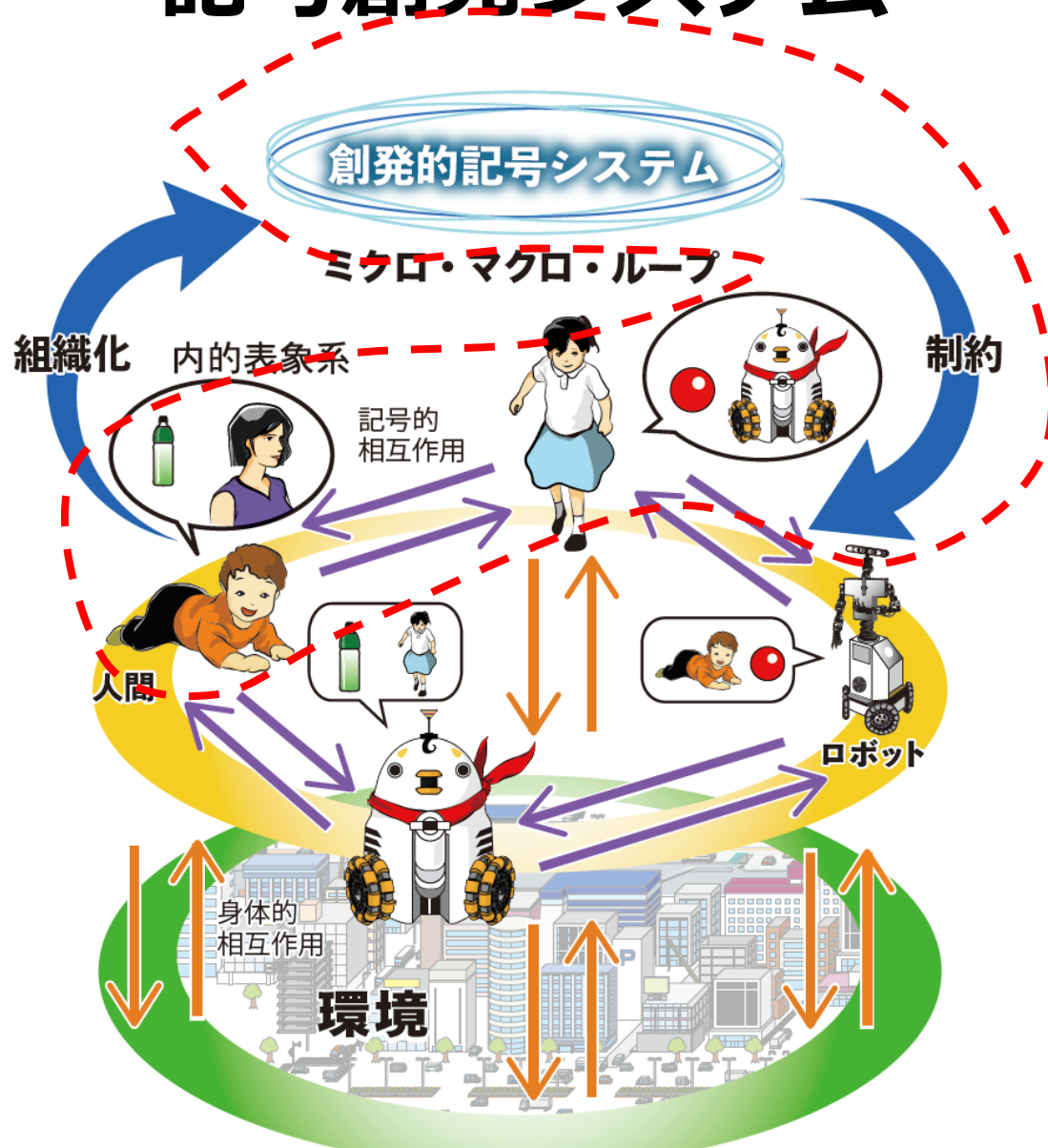
Symbol emergence systems [Taniguchi+ 2016]

記号創発システム



Symbol emergence systems [Taniguchi+ 2016]

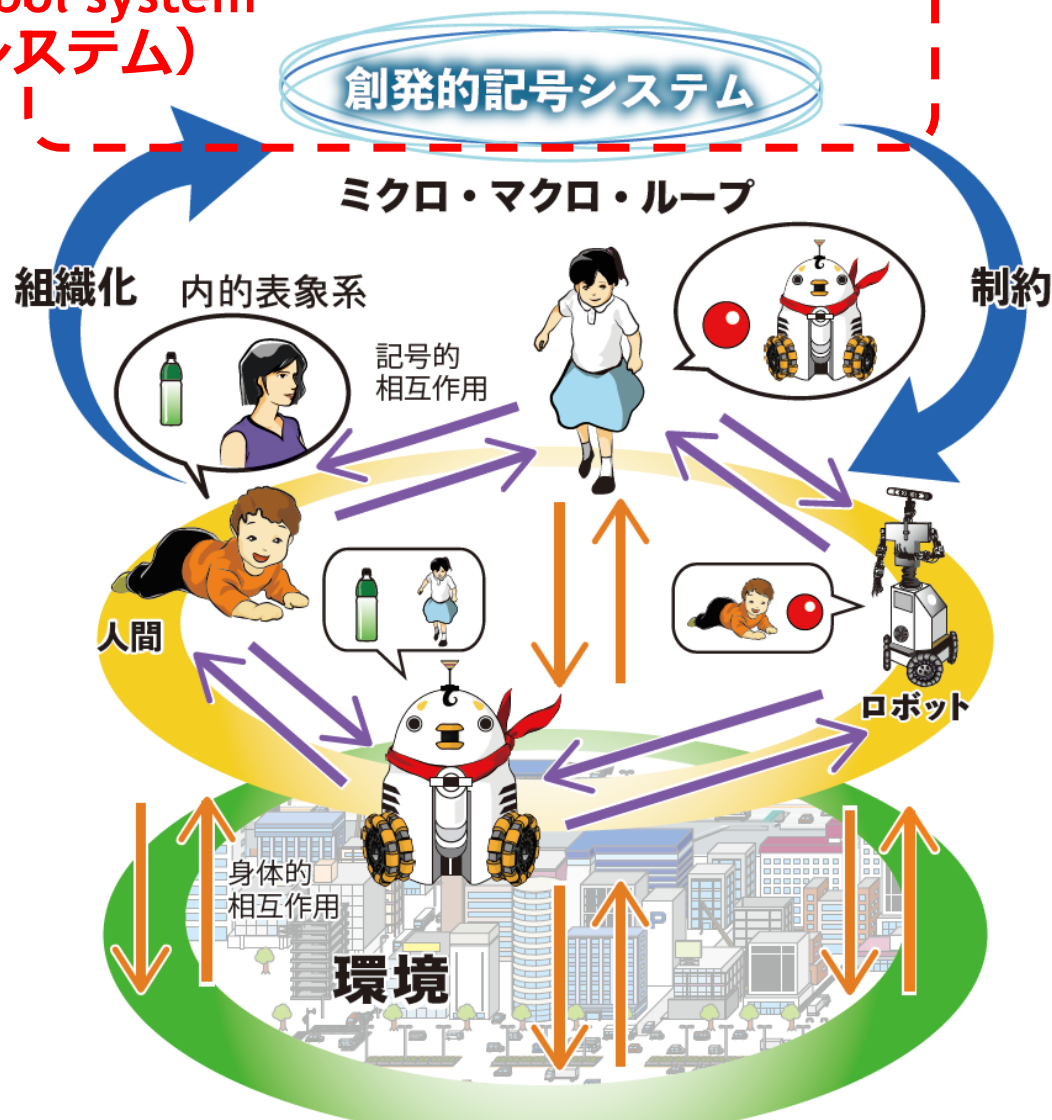
記号創発システム



Symbol emergence systems [Taniguchi+ 2016]

記号創発システム

Emergent symbol system
(創発的記号システム)



Symbol emergence systems [Taniguchi+ 2016]

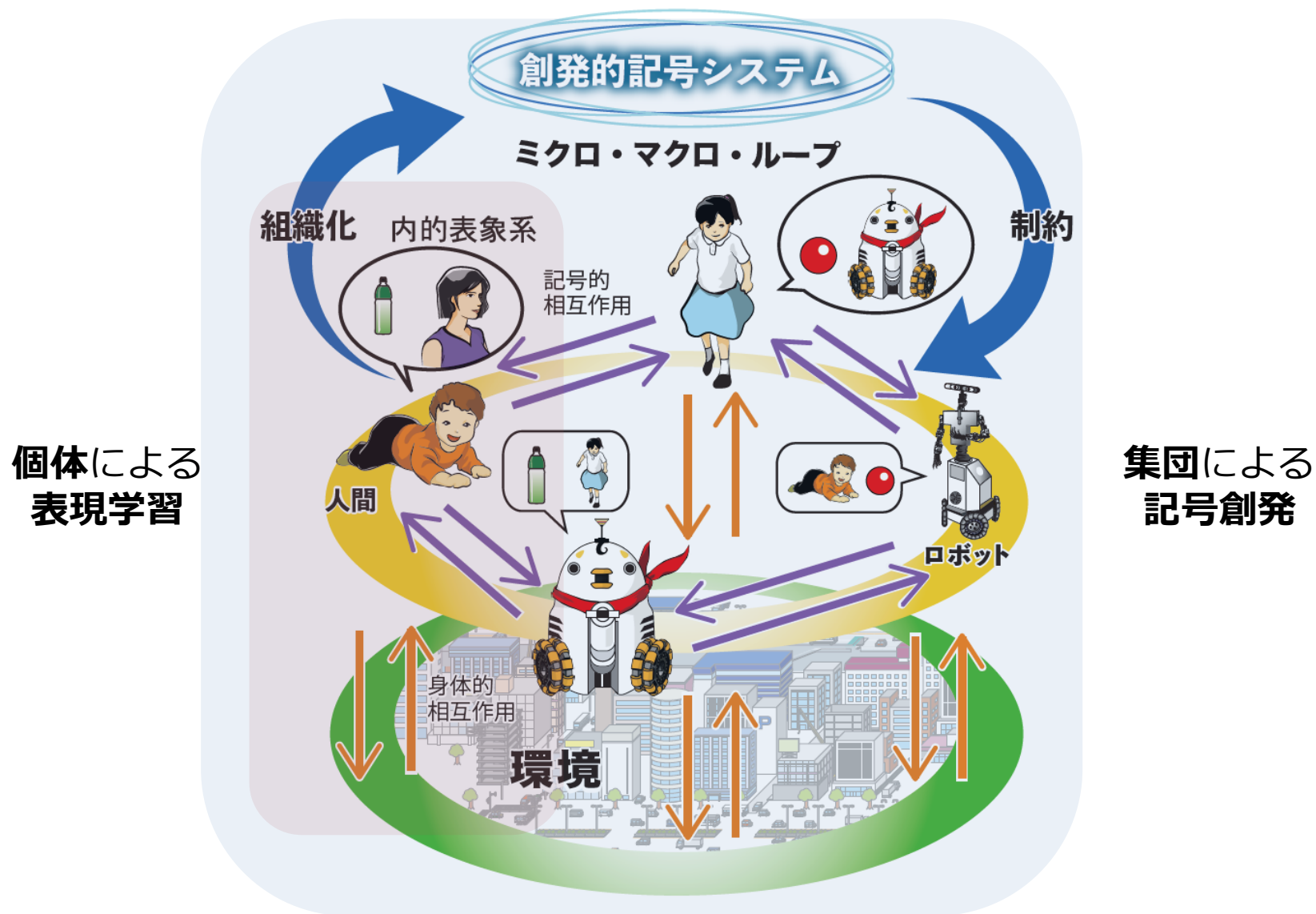
記号創発システム



- **創発システム**：ミクロ・マクロ・ループを持ち創発した大域的な秩序が下位システムの作動に「機能」を与える複雑系
- **記号創発システム**：記号によるコミュニケーションは創発システムにより支えられており、コミュニケーションは上記の「機能」として解釈できる。

Symbol emergence systems [Taniguchi+ 2016]

記号創発システム



Contents

1. はじめに

- ✓ 記号創発ロボティクス

2. 記号創発システム

- ✓ 記号・言語の恣意性・動的特性

3. 集合的予測符号化と共創的学習

- ✓ メトロポリス・ヘイスティングス名付けゲーム

4. 言語とロボティクス

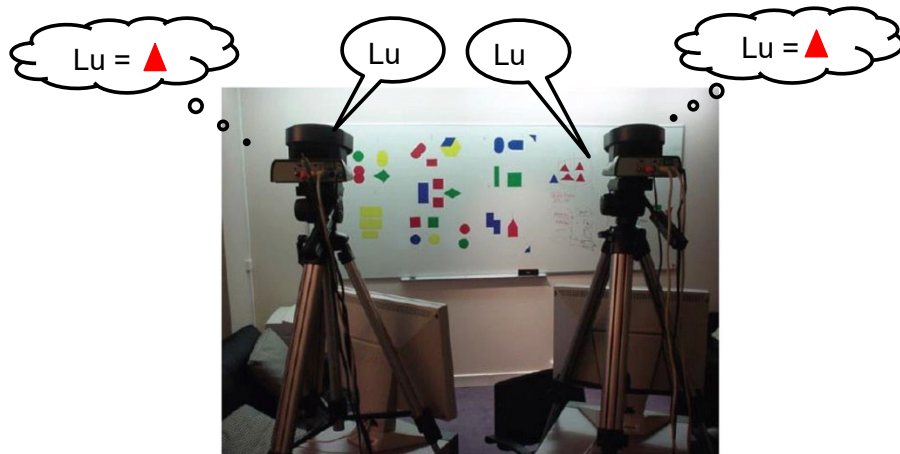
- ✓ 大規模言語モデルと実世界サービスロボット

5. まとめ

Constructive studies on language evolution and symbol emergence/emergent communication

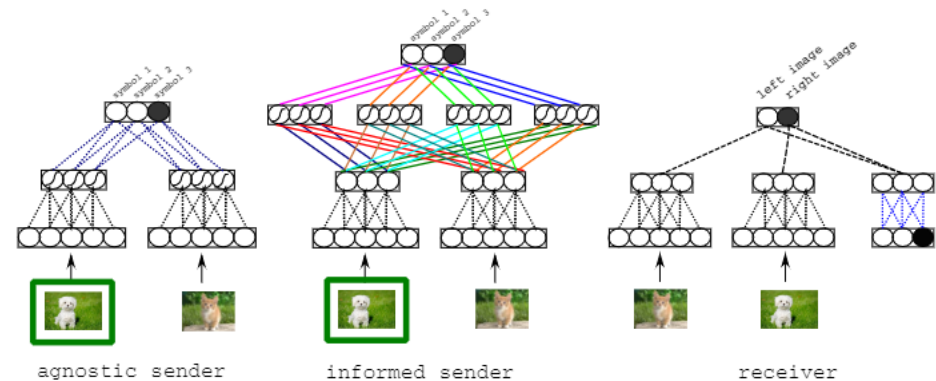
□ Symbol emergence/ language evolution in multi-agent agent systems

- ✓ Language game (typically naming game)-based approach [e.g., Steels 2015].
- ✓ Emergent communication in multi-agent reinforcement settings [e.g., Foerster 2016].



[Classical approach] 90's - 00's mainly

- ✓ For example, "Talking head experiment" [Steels 2015] models the process in which agents form categories and sharing labels through language games in the real world.
- ✓ Also, Vogt, Spranger, Belpaeme, and many other researchers contributed to this field



[Modern DL-based revival] 2016-

- ✓ Two influential papers written by Lazaridou et al. and Foerster et al. reboot the trend of studies of emergent communication based on deep learning.
- ✓ Deep reinforcement learning and Lewis signaling game, e.g., referential game, provides the basis of the studies.

[Luc 2015] Luc Steels. The Talking Heads experiment: Origins of words and meanings. Language Science Press, Berlin, 2015.

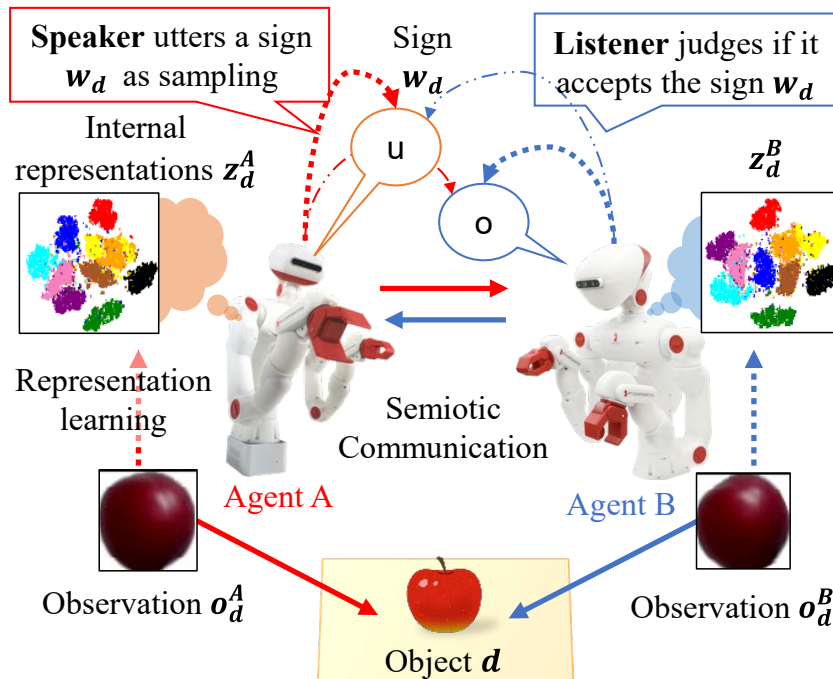
[Foerster 2016] Foerster, Jakob, et al. "Learning to communicate with deep multi-agent reinforcement learning." Advances in neural information processing systems 29 (2016).

[Lazaridou 2016] Lazaridou, Angeliki, Alexander Peysakhovich, and Marco Baroni. "Multi-agent cooperation and the emergence of (natural) language." *arXiv preprint arXiv:1612.07182* (2016).

Metropolis-Hastings naming game [Taniguchi+ 2022]

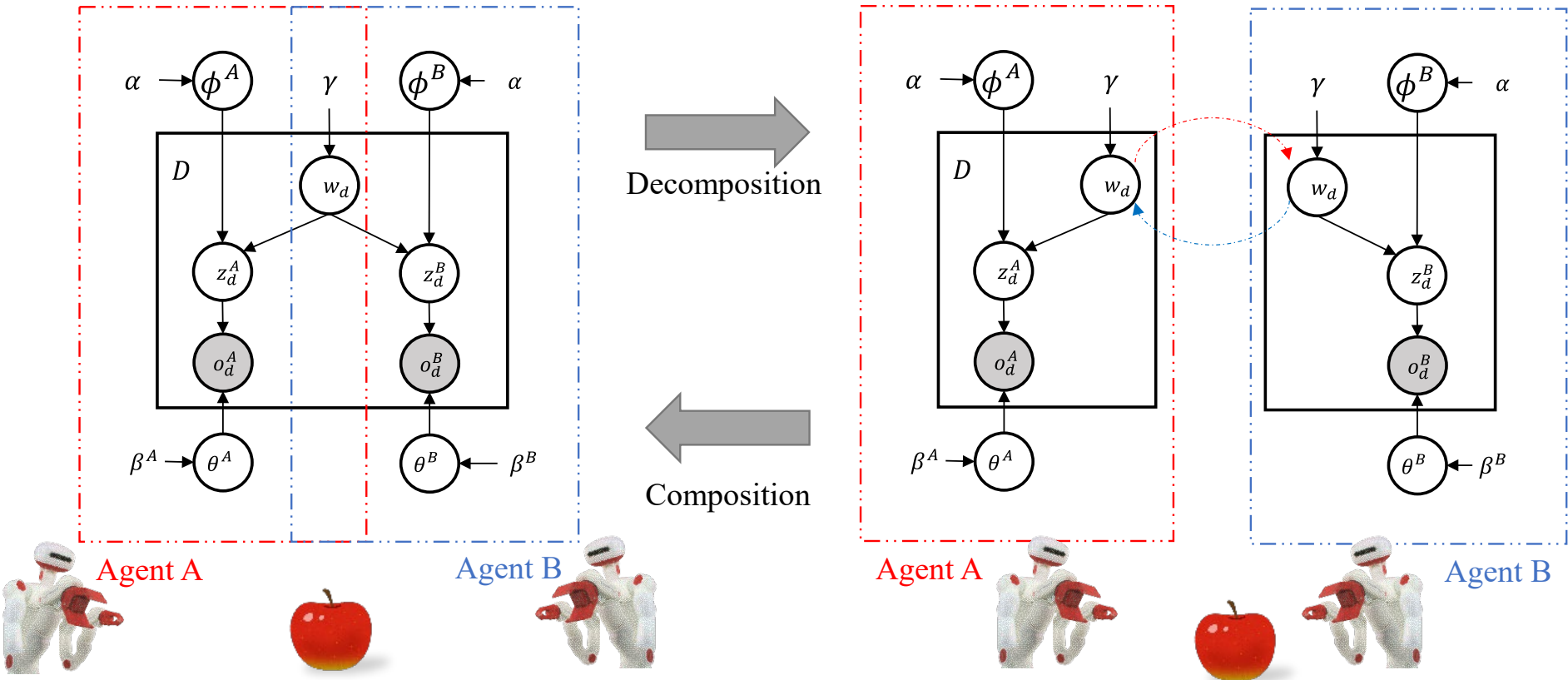
Outline

1. **Perception:** Speaker and Listener agents (Sp and Li) observe the d -th object and infer their internal representations (assuming **joint attention**).
2. **Communication:** Speaker tells the name of the object probabilistically. The Listener determines if it accepts the naming with a certain probability depending on its belief state.
3. **Learning:** After the communication is performed, the Listener updates its internal parameters for representation learning and naming.
4. **Turn taking:** Speaker and Listener alternate their roles and go back to 1.



- Taniguchi, Tadahiro, et al. "Emergent Communication through Metropolis-Hastings Naming Game with Deep Generative Models." arXiv:2205.12392 (2022).
- Yoshinobu Hagiwara, Hiroyoshi Kobayashi, Akira Taniguchi and Tadahiro Taniguchi, Symbol Emergence as an Interpersonal Multimodal Categorization, Frontiers in Robotics and AI, 6(134), pp.1-17, 2019. DOI: 10.3389/frobt.2019.00134
- Yoshinobu Hagiwara, Kazuma Furukawa, Akira Taniguchi & Tadahiro Taniguchi (2022) Multiagent multimodal categorization for symbol emergence: emergent communication via interpersonal cross-modal inference, Advanced Robotics,

Probabilistic Graphical Model for Emergent Communication

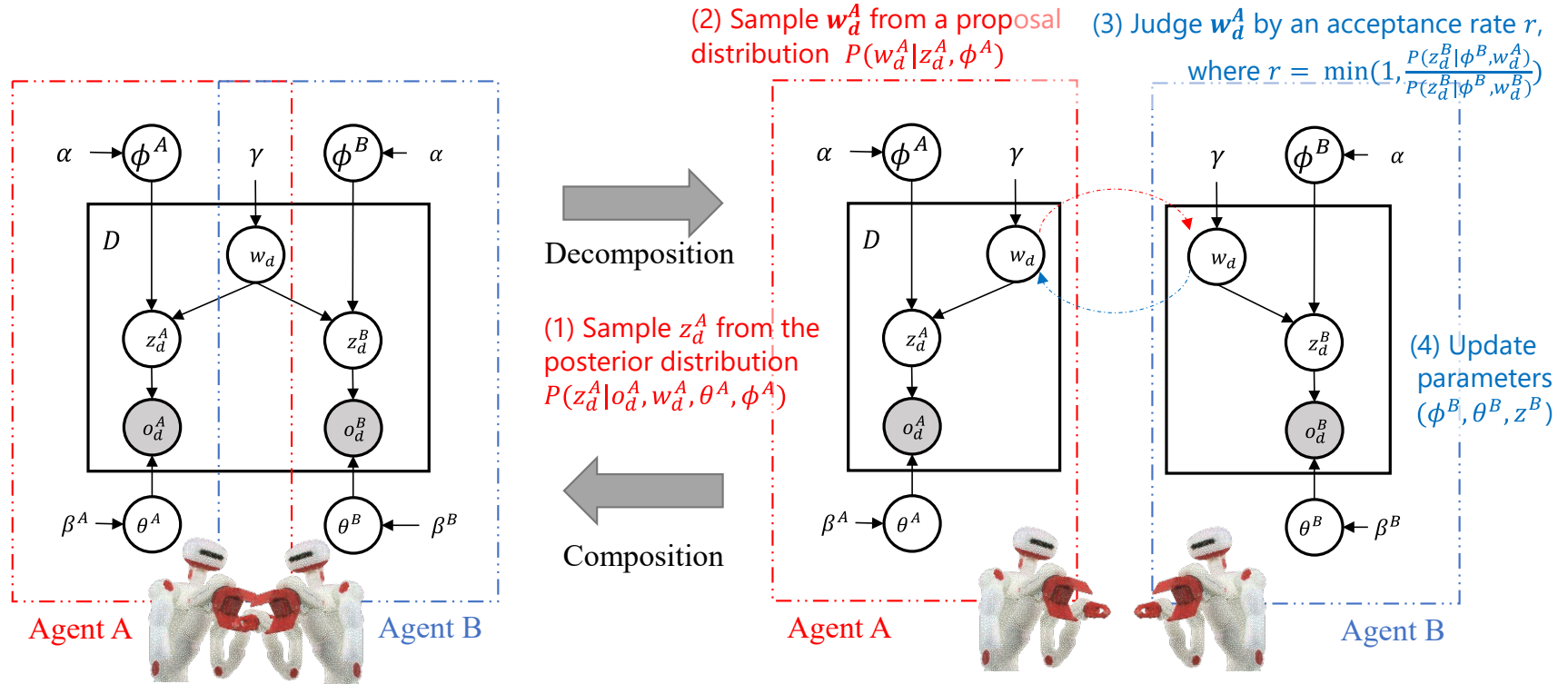


1. Consider a **probabilistic generative model that integrates the perceptual systems of the two agents**. The PGM for an agent is considered for **categorization**.
2. Decompose it into two PGMs representing the two agents, respectively.
3. Then, consider the MH sampling procedure for w_d , i.e., a shared latent variable, letting $P(w_d|z_d^{sp})$ a proposal distribution and regarding the proposal as *naming*.

MH Naming Game is a Decentralized MCMC Bayesian Inference

If the acceptance decision is made with the probability

$$r = \min \left(1, \frac{P(z_d^{Li} | \theta^{Li}, w_d^{Sp})}{P(z_d^{Li} | \theta^{Li}, w_d^{Li})} \right)$$



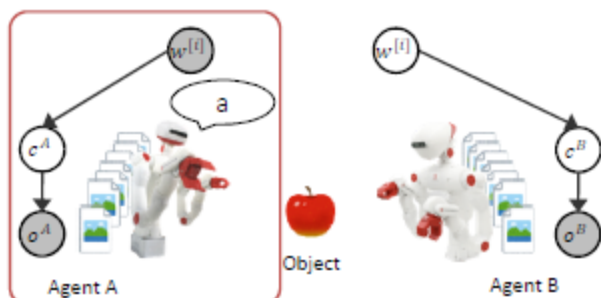
the naming game is equivalent to **Metropolis-Hastings algorithm**, mathematically.

Theorem 1. *MH naming game is a Metropolis-Hastings sampler of $P(w, z, \theta, \phi | o)$.*

It is guaranteed that **signs are shared**, and **categories are formed** among agents to approximate posterior distribution $P(w, z, \theta, \phi | o)$ (given the two agents' observations).

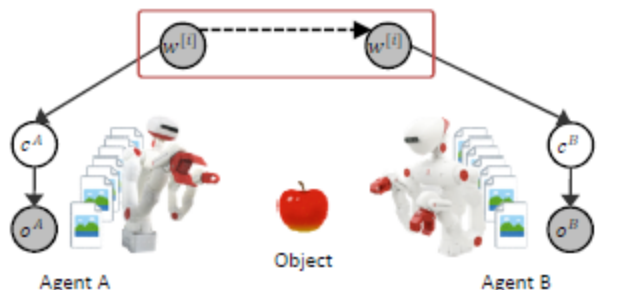
Overview of the naming game

Utterance based on speaker's observation



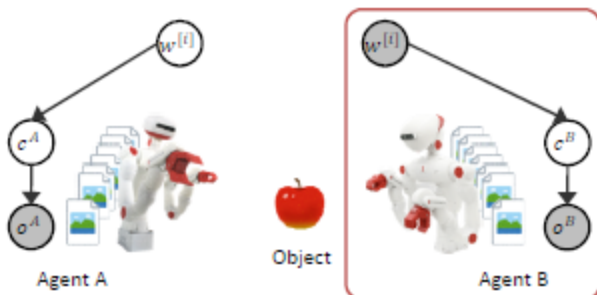
Step 1 :
Sampling $w^{[i]}$ by a proposed distribution $P(w|o^A)$

Acceptance of another agent's utterance



Step 2 :
Judging $w^{[i]}$ by an acceptance rate z depending on c^B

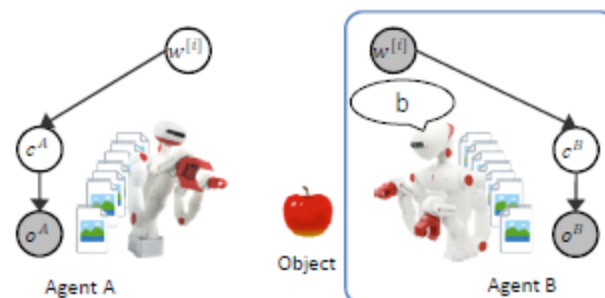
Updating listener's knowledge



Step 3 :
Updating parameters for generating c^B and o^B

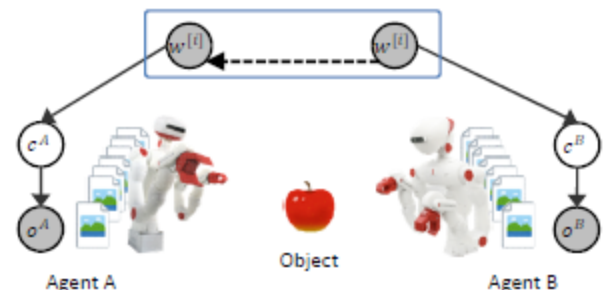
Word proposal from
agent A (speaker) to agent B (listener)

Utterance based on speaker's observation



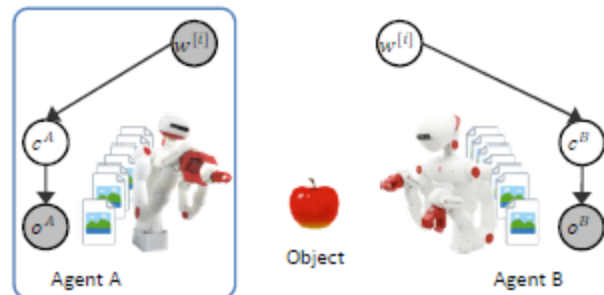
Step 1 :
Sampling $w^{[i]}$ by a proposed distribution $P(w|o^B)$

Acceptance of another agent's utterance



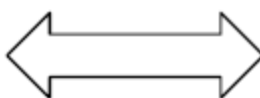
Step 2 :
Judging $w^{[i]}$ by an acceptance rate z depending on c^A

Updating listener's knowledge



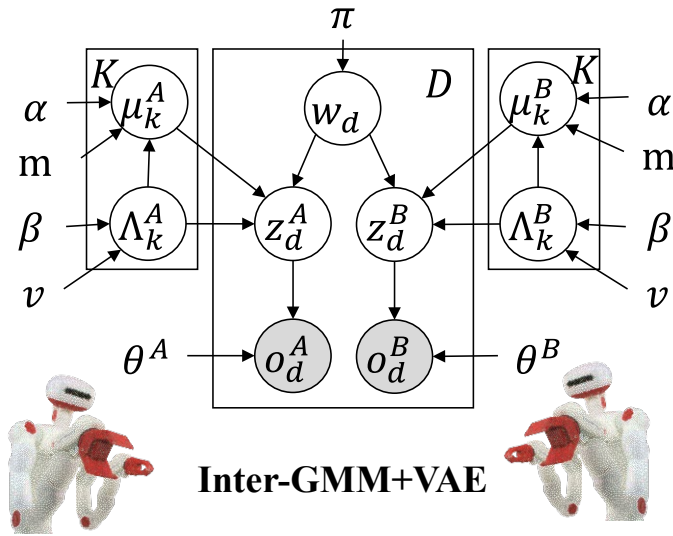
Step 3 :
Updating parameters for generating c^A and o^A

Word proposal from
agent B (speaker) to agent A (listener)



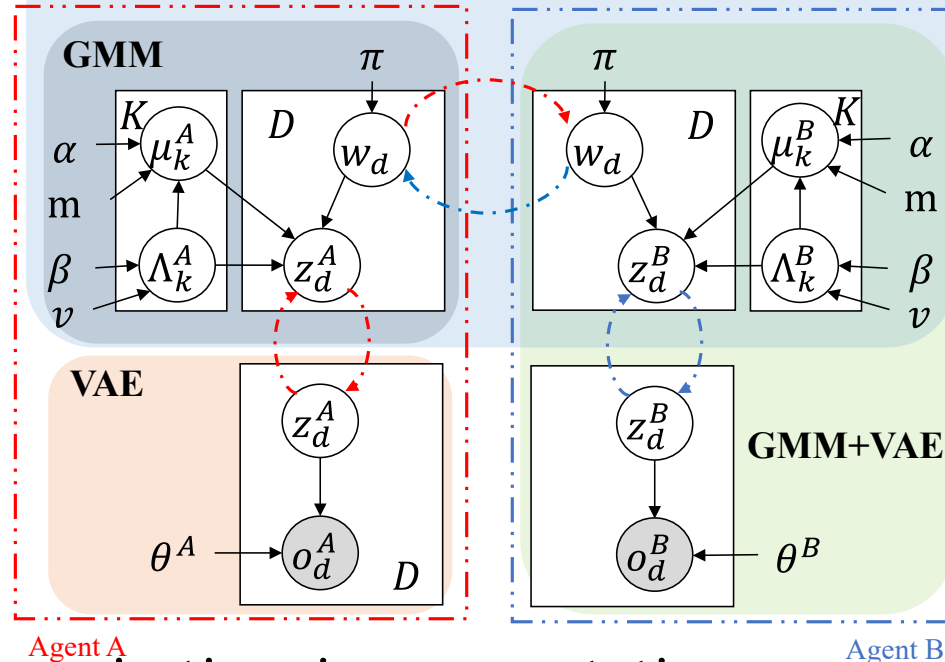
Exchange words
between agents.

Inter-GMM+VAE: PGM for symbol emergence from real images utilizing variational autoencoders and decentralized inference MH naming game and SERKET



Decomposition

Composition



1. **GMM+VAE:** An agent model for categorization via representation learning from real images.
2. **Inter-GMM+VAE:** A variant of multimodal VAE with categorical latent variables.
3. **Decentralized Bayesian inference based on MH naming game:** The latent variables can be inferred in a decentralized manner through MH naming game. The GMM and VAE is mutually optimized using the framework of Neuro-SERKET [Taniguchi+ 2020].

Experiment 1: MNIST dataset

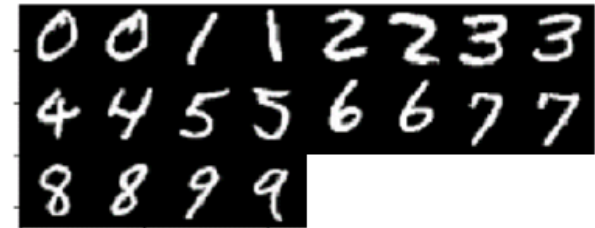
Conditions

- ✓ The MNIST image data and those rotated by 45 degrees were given to Agent A and B, respectively. (10,000 images of 0-9 with 1000 each)

Comparative methods

1. **MH naming game:** Proposed method.
 2. **No communication:** The two agent categorize the observations independently.
 3. **All acceptance:** The two agents always accept the proposal of the other.
 4. **Gibbs sampling (topline) :** Direct centralized inference of Inter-GMM+VAE.
- **+MI :** Mutual learning of VAE and GMM.

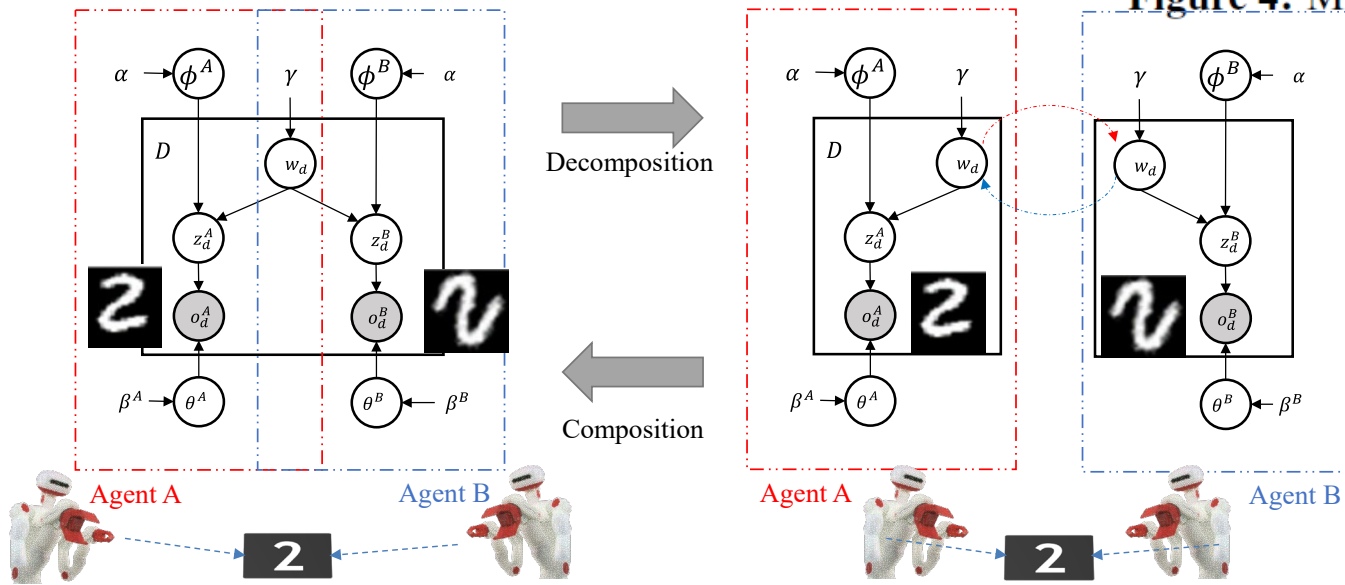
Observations of Agent A



Observations of Agent B



Figure 4: MNIST dataset



Experimental Results

Table 1: Experimental results for MNIST data:

		Clustering		Sharing sign
Condition	MI	ARI (Agent A)	ARI (Agent B)	κ
MH naming game	✓	0.78 ± 0.04	0.78 ± 0.03	0.91 ± 0.02
MH naming game		0.71 ± 0.04	0.72 ± 0.03	0.91 ± 0.03
No communication	✓	0.65 ± 0.04	0.68 ± 0.05	0.04 ± 0.04
No communication		0.60 ± 0.02	0.64 ± 0.03	0.01 ± 0.05
All acceptance	✓	0.68 ± 0.04	0.65 ± 0.03	0.81 ± 0.03
All acceptance		0.61 ± 0.03	0.63 ± 0.05	0.83 ± 0.04
Gibbs sampling	✓	0.81 ± 0.03		—
Gibbs sampling		0.73 ± 0.04		—

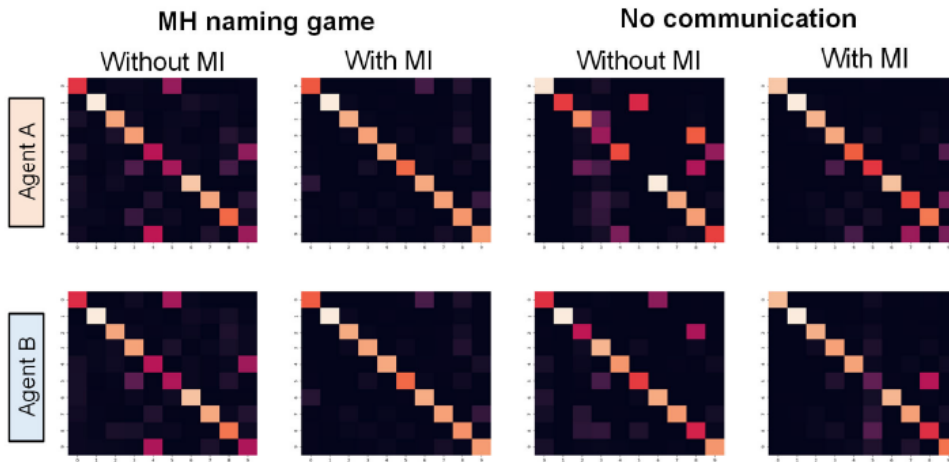


Figure 5: Confusion matrices in Experiment 1

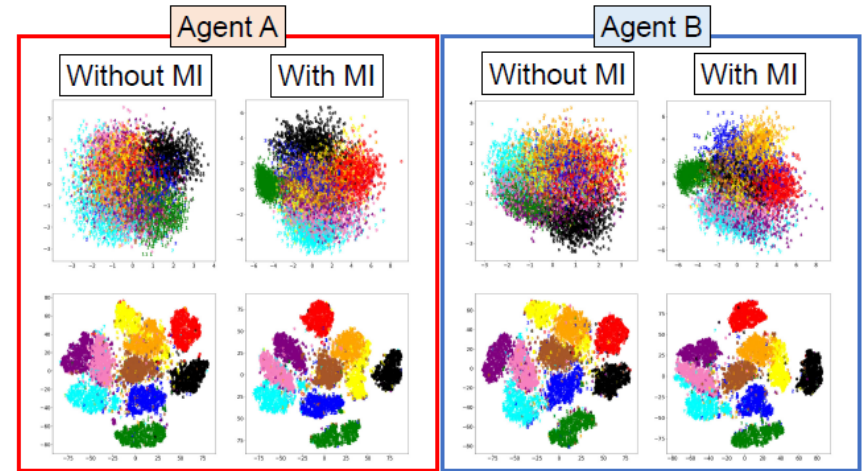


Figure 7: Visualization of internal representations z for MNIST data with (top) PCA and (bottom) t-SNE.

Symbol emergence is NOT ONLY for emergent communication, BUT ALSO for better representation learning.

Experiment 2: Fruits 360 dataset

□ Conditions

- ✓ Fruits 360 image dataset and those rotated by 25 degree were given to Agent A and B, respectively. (Total 2350 images in 10 categories)

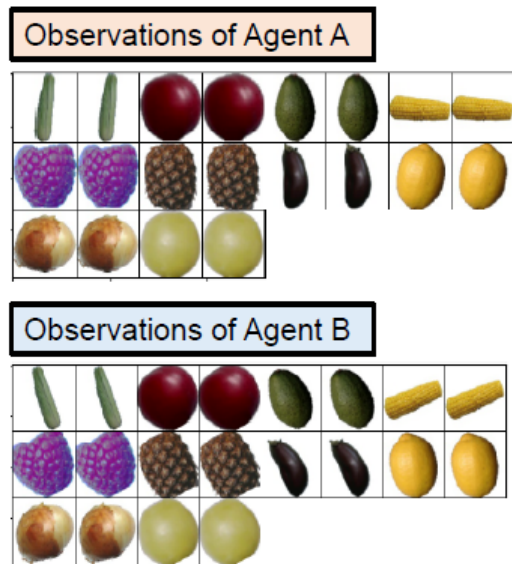


Figure 8: Fruits 360 dataset

□ Result

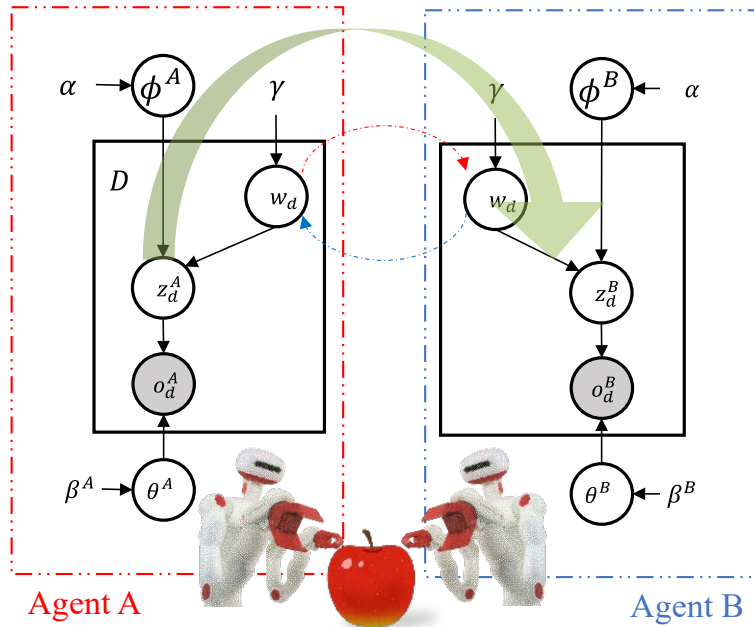
Table 2: Experimental results for Fruits 360 data

Condition	MI	Clustering		Sharing sign	
		ARI (Agent A)	ARI (Agent B)	κ	
MH naming game	✓	0.76 ± 0.04	0.77 ± 0.02	0.92 ± 0.02	
MH naming game		0.65 ± 0.03	0.65 ± 0.03	0.94 ± 0.02	
No communication	✓	0.64 ± 0.03	0.65 ± 0.05	-0.08 ± 0.05	
No communication		0.53 ± 0.04	0.56 ± 0.02	0.01 ± 0.06	
All acceptance	✓	0.52 ± 0.03	0.50 ± 0.03	0.58 ± 0.04	
All acceptance		0.43 ± 0.03	0.43 ± 0.02	0.42 ± 0.03	
Inter-DM [18]		0.59 ± 0.04	0.56 ± 0.03	0.85 ± 0.03	
Inter-GMM		0.02 ± 0.07	0.01 ± 0.03	0.18 ± 0.04	
Gibbs sampling	✓	0.74 ± 0.05		–	
Gibbs sampling		0.62 ± 0.04		–	

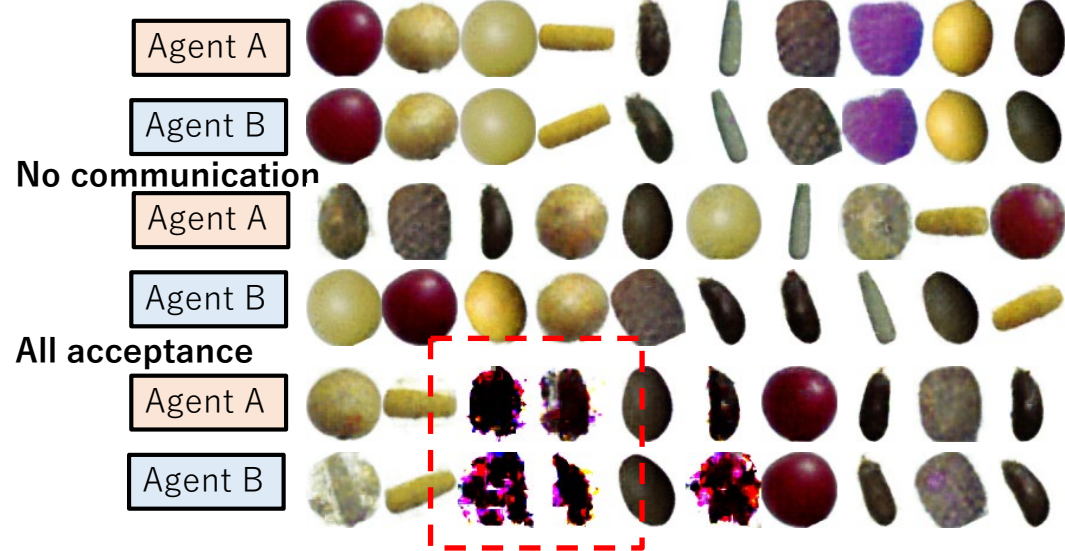
- ✓ The MH naming game performed unsupervised categorization via symbol emergence at the same level as Gibbs sampling (topline) for the two-agent integrated system.
- ✓ The symbol emergence between two agents leads representation learning and categorization better performance in **unsupervised and decentralized manners**.

Semiotic communication as Inter-personal cross-modal inference

Inter-personal cross-modal inference



MH naming game

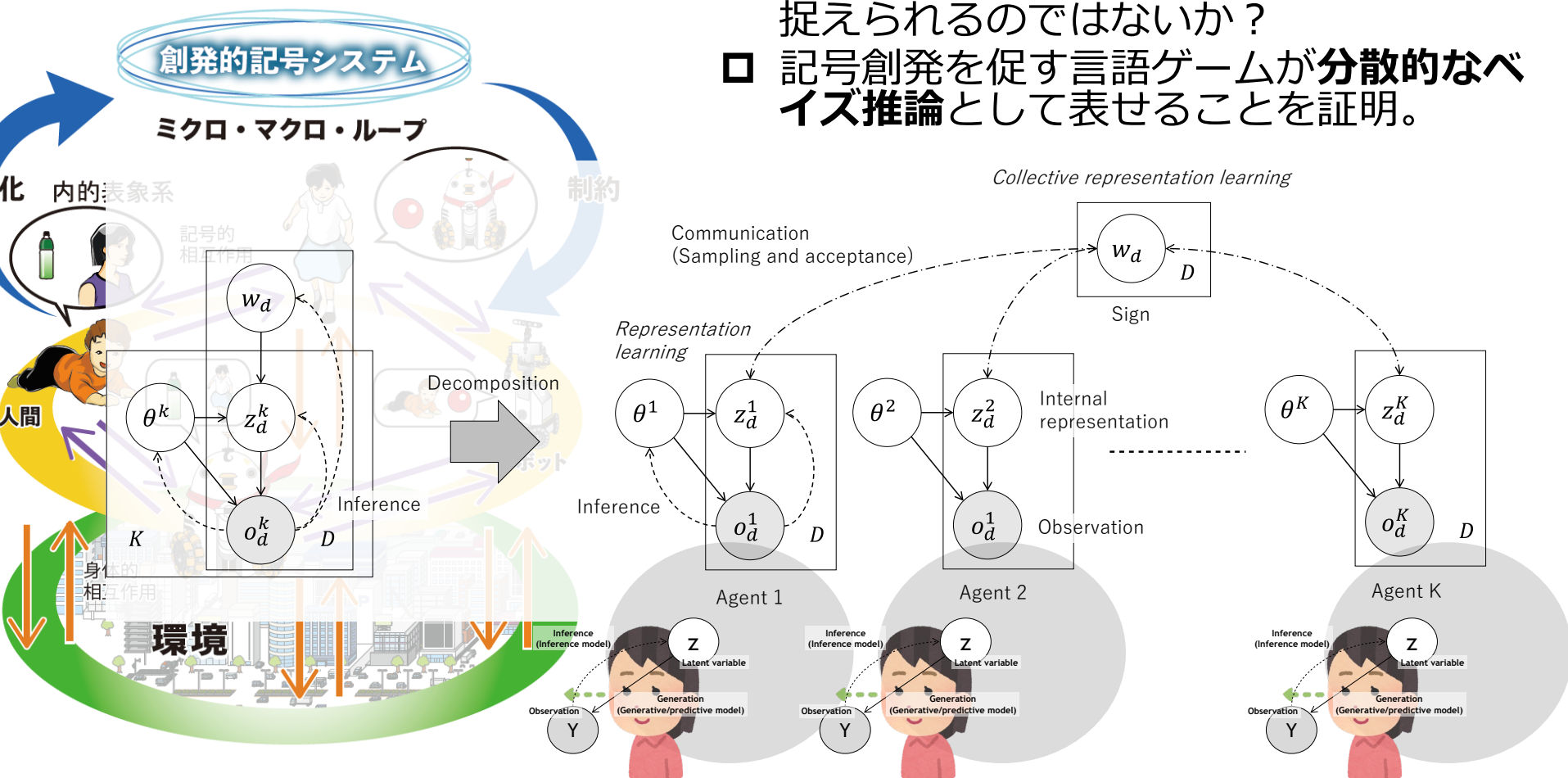


Recalled (i.e., reconstructed) images from each sign

- ✓ **Semiotic communication by sampling:**
By sampling $w_d \sim P(w_d | o_d^{Sp})$ by the Speaker agent and $o_d^{Li} \sim P(o_d^{Li} | w_d)$ by the Listener agent (i.e., ancestral sampling), the Listener can recall the image represented by w_d .
- ✓ **Inter-personal cross-modal inference:**
From the viewpoint of original integrated PGM, this is considered as cross-modal inference. However, the "modalities" belong to different agents.

集団における記号/言語創発も集合的な予測符号化 (Collective Predictive Coding) で表現できる？

- 集団における記号創発とは複数の人間にまたがった**集合的な予測符号化**として捉えられるのではないか？
- 記号創発を促す言語ゲームが**分散的なベイズ推論**として表せることを証明。



Discussion and Future perspectives

A) Directions of extension:

(1) Grammar/Compositionality, (2) Multimodal VAE, (4) N-agent system, (3) Reinforcement learning

B) Emergent communication in humans:

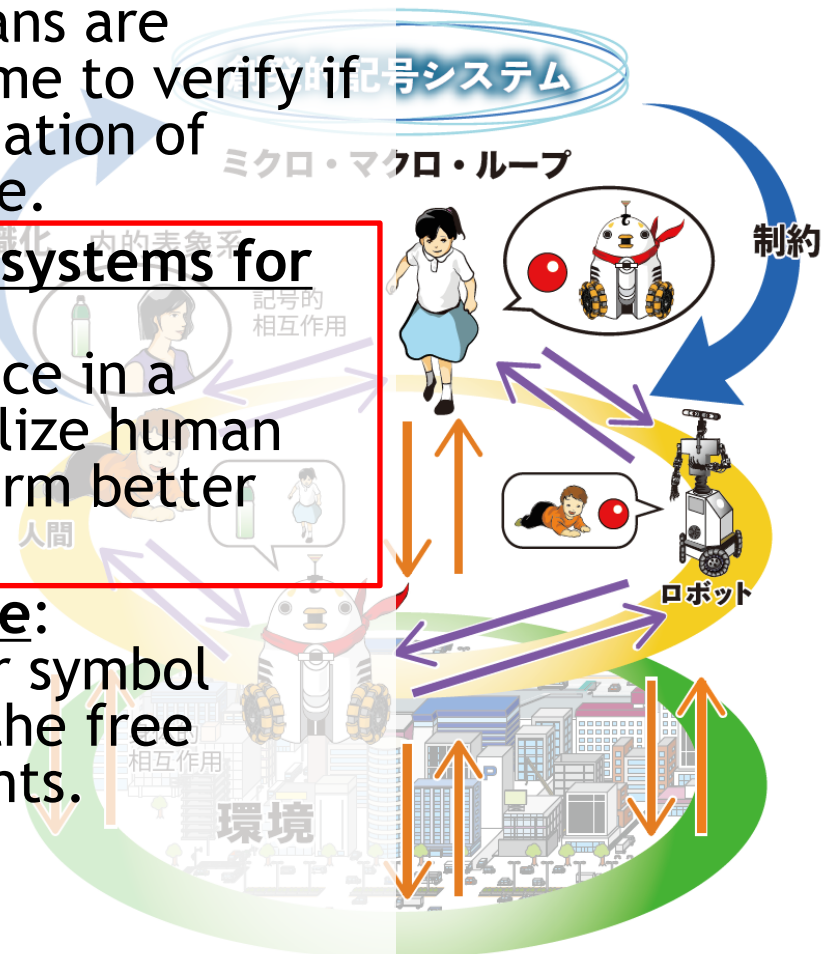
We are investigating whether humans are actually playing the MH naming game to verify if the model is an appropriate explanation of human symbol/language emergence.

C) Extension to mixed human-robot systems for new human-robot learning:

We can consider a symbol emergence in a human-robot mixed system and utilize human and robot perceptual systems to form better symbol systems.

D) Society-wide free energy principle:

This view also allows us to consider symbol emergence from the viewpoint of the free energy principle over multiple agents.



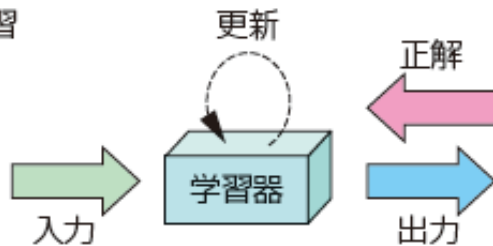
記号創発システム論に基づく共創的学習の基盤創成 科研費・基盤研究A (AY2021-2025)

人間の持つ記号システムは静的に存在するものではなく動的に変化する。従来のマルチモーダルカテゴリ形成に基づく語彙獲得やパターン認識は教示を行う人間の記号システムを固定的なものと近似し、その創発的動態を無視してきた。本研究では人間とロボットの記号的相互作用を通じた学習を記号創発システムの枠組みで定式化し、「人間とロボットがタスクと協調に必要な記号システムを共に創っていく」という記号創発システムに基づく共創的学習の基盤を創成する。その有効性は家庭の掃除を行うサービスロボットを例として、創発した記号により人間とロボットが協調的にタスク達成する実験により示す。



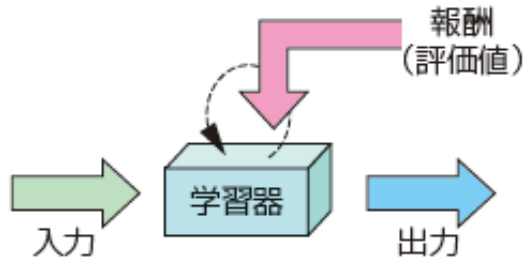
Ambition: creating the 4th category of ML

1) 教師あり学習



Supervised learning

2) 強化学習



Reinforcement learning

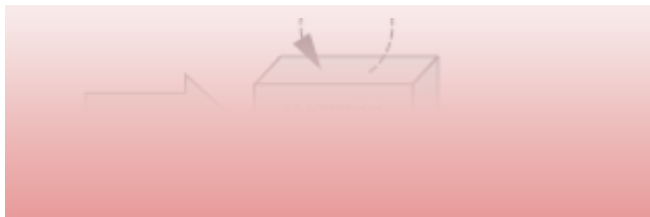
3) 教師なし学習



Unsupervised learning

図 11.2 機械学習の分類

4) 共創的学習



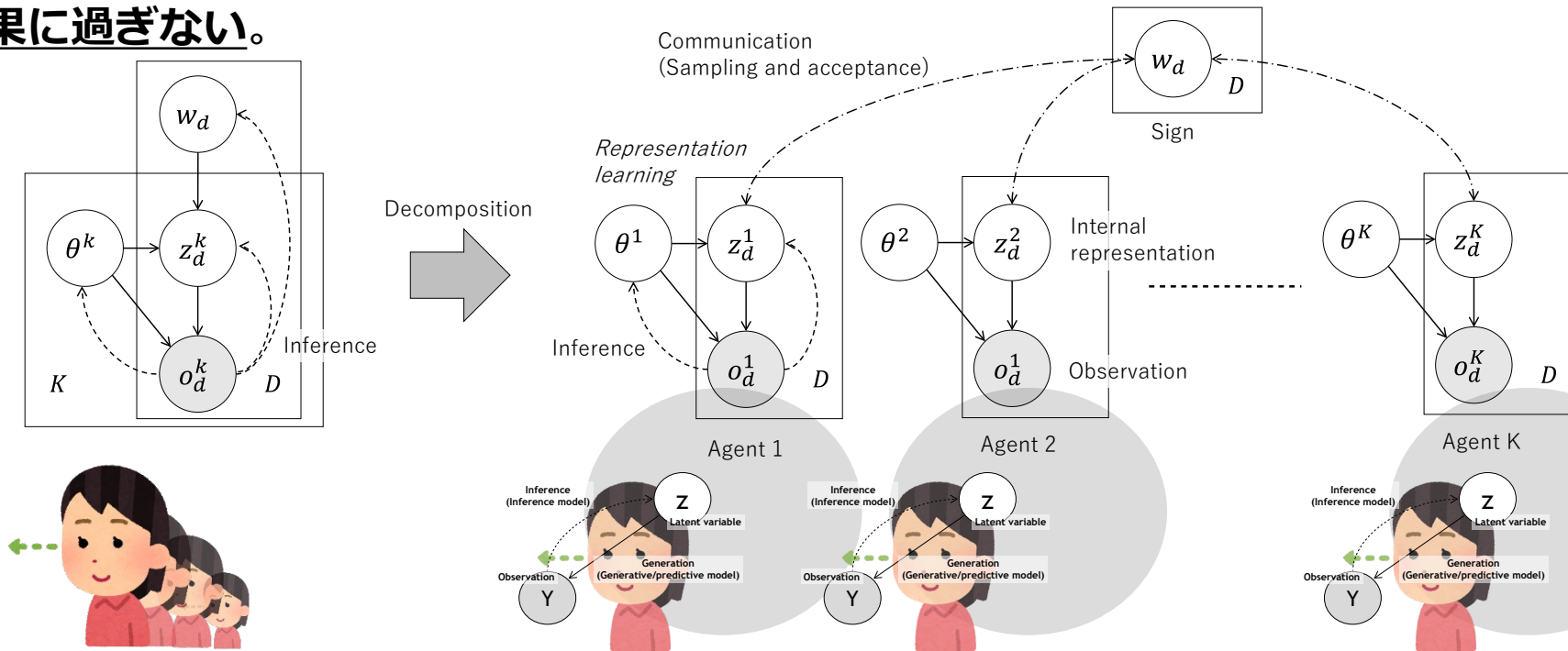
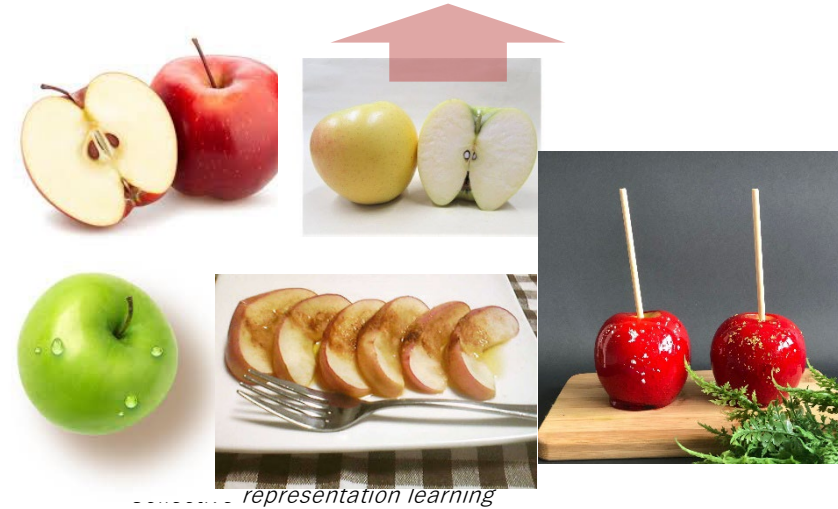
Co-creative learning



人間作るラベルは記号創発の結果である。

"Apple"

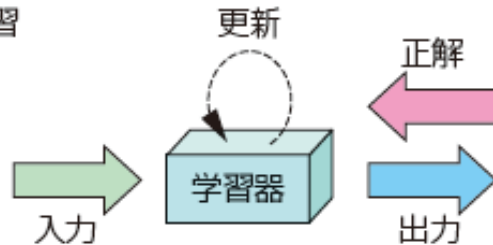
- ✓ 人間の記号システムには**恣意性**がある。
- ✓ それは人間の**感覚運動系**に影響される。
- ✓ 記号システムは必ずしも「真」なものが存在しない。
- ✓ 私達の記号システムが集合的予測符号化の結果であるとすれば、それは「真」なるものでもなんでもなく**分散的なベイズ推論による結果に過ぎない。**



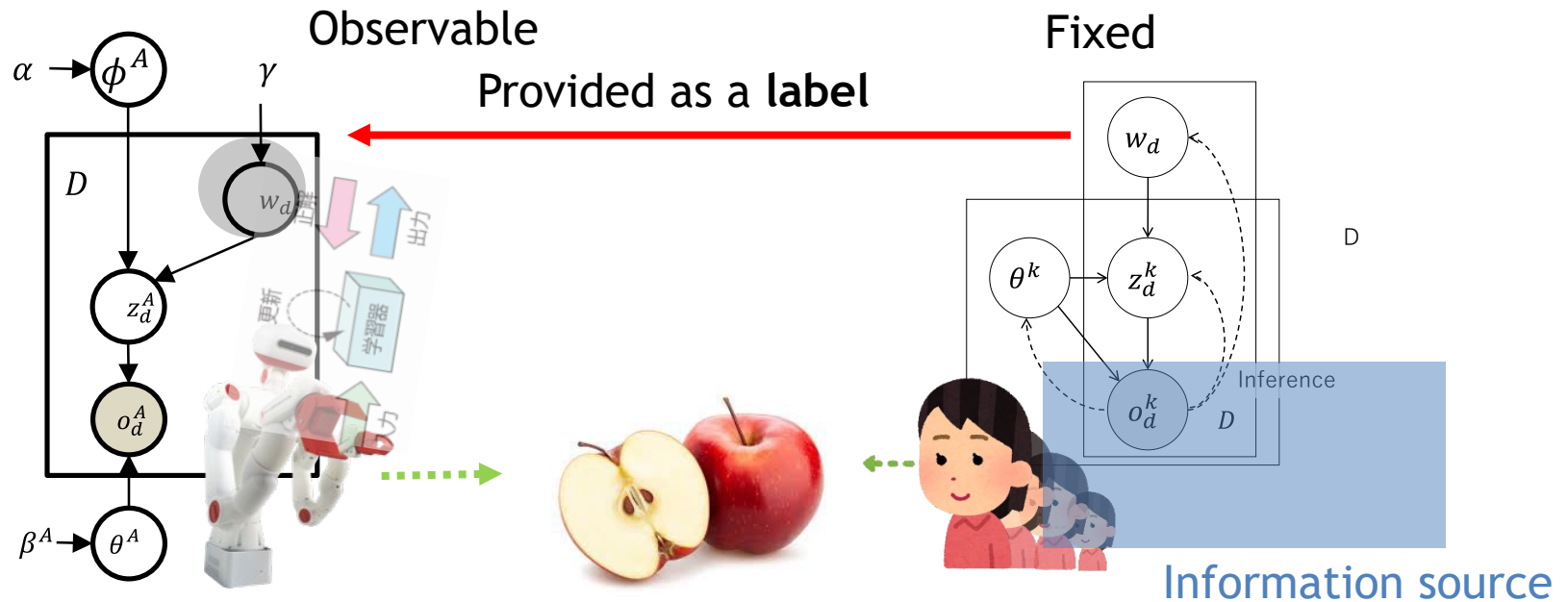
1) 教師あり学習

Supervised learning

1) 教師あり学習



SL assumes that labels (i.e., signs) provided by human (annotators) are always correct.



SL makes an agent learn $q(w|o_{robot})$ to minimize $D[q_{human}(w|o_{human})|q(w|o_{robot})]$ while $q_{human}(w|o_{human})$ is obtained to minimize $D_{KL}[q_{human}(w|o_{human})|P(w|o_{human})]$

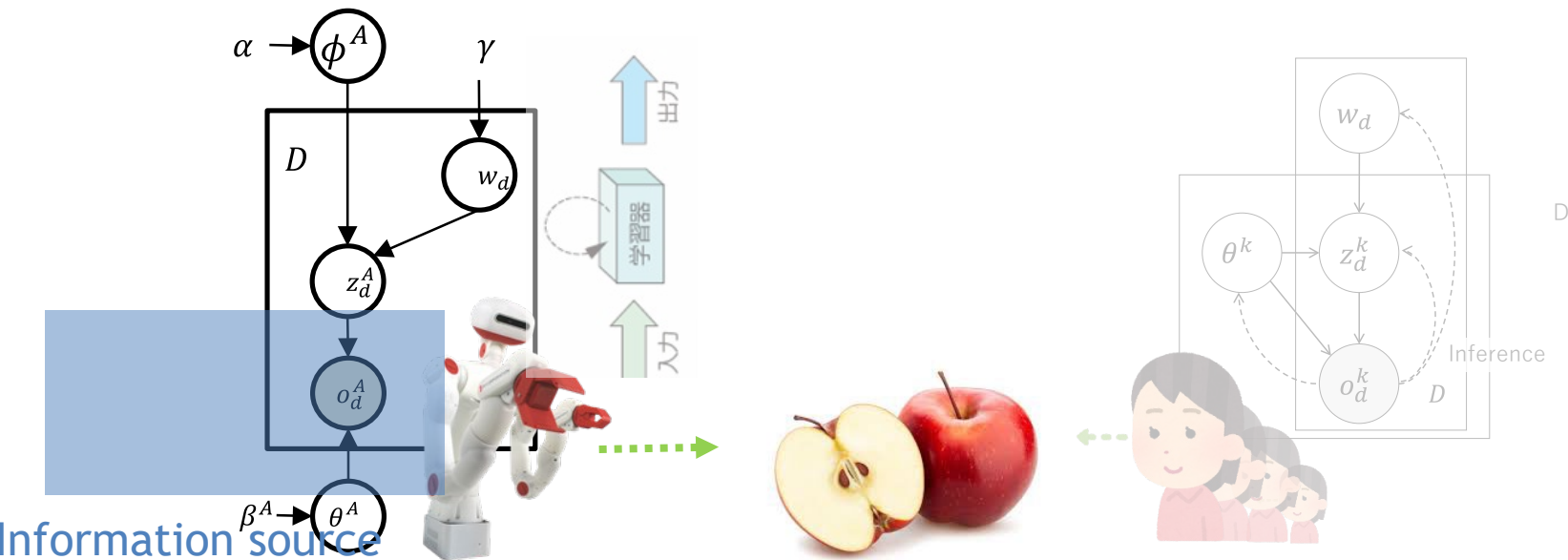
3) 教師なし学習

Unsupervised learning

3) 教師なし学習



UL assumes that a robot performs categorization just based on its sensor information.



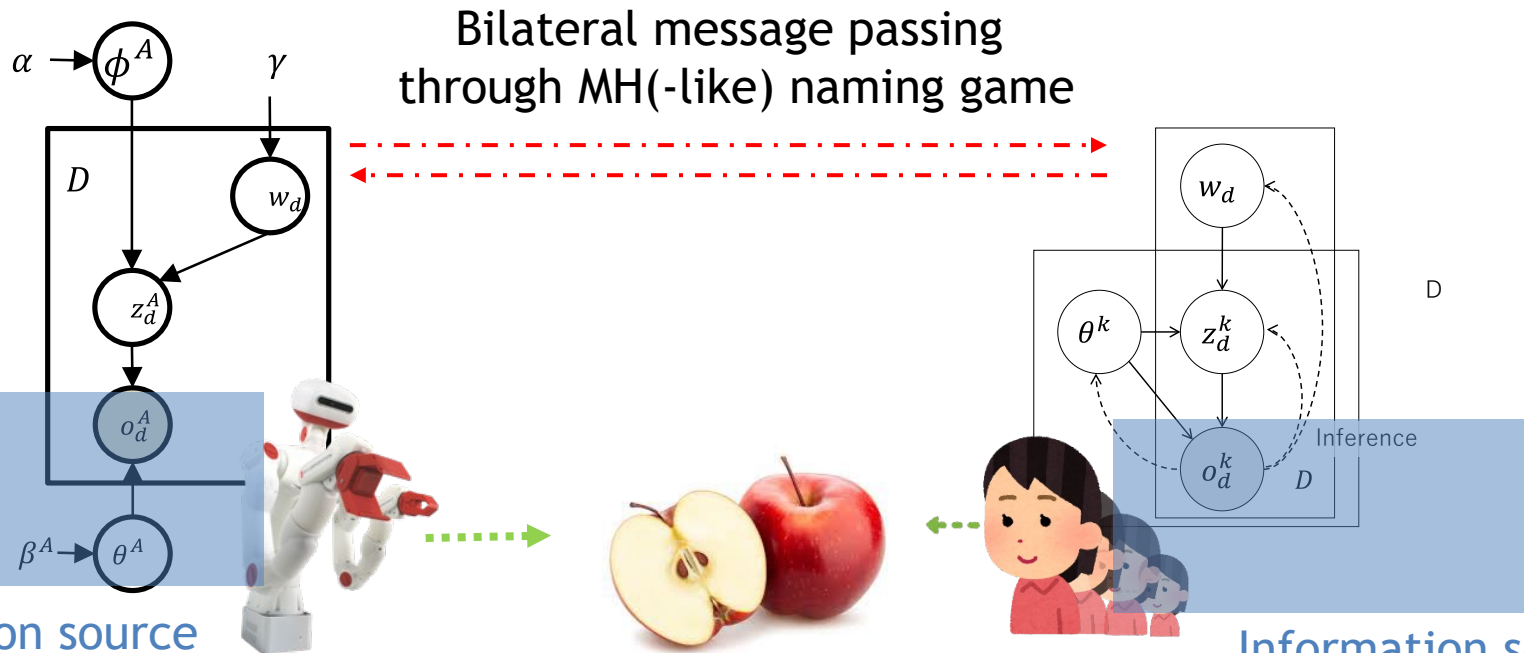
UL makes an agent learn $q(w|o_{robot})$ to minimize $D_{KL}[q_{robot}(w|o_{robot})|P(w|o_{robot})]$ from a variational inference (VI) point of view.

4) 共創的学習

Co-creative learning

4) 共創的学習

CCL assumes symbols are formed by a robot and humans together through decentralized Bayesian inference.



Information source

Information source

We can make use of both human's and robot's sensory information!

CCL make an agent and a human form $q(w|o_{robot}, o_{human})$

to minimize $D_{KL}[q(w|o_{human}, o_{robot})|P(w|o_{human}, o_{robot})]$

from a VI point of view.

共同研究者募集中
メール等で
ご連絡ください。



Contents

1. はじめに

- ✓ 記号創発ロボティクス

2. 記号創発システム

- ✓ 記号・言語の恣意性・動的特性

3. 集合的予測符号化と共創的学習

- ✓ メトロポリス・ヘイスティングス名付けゲーム

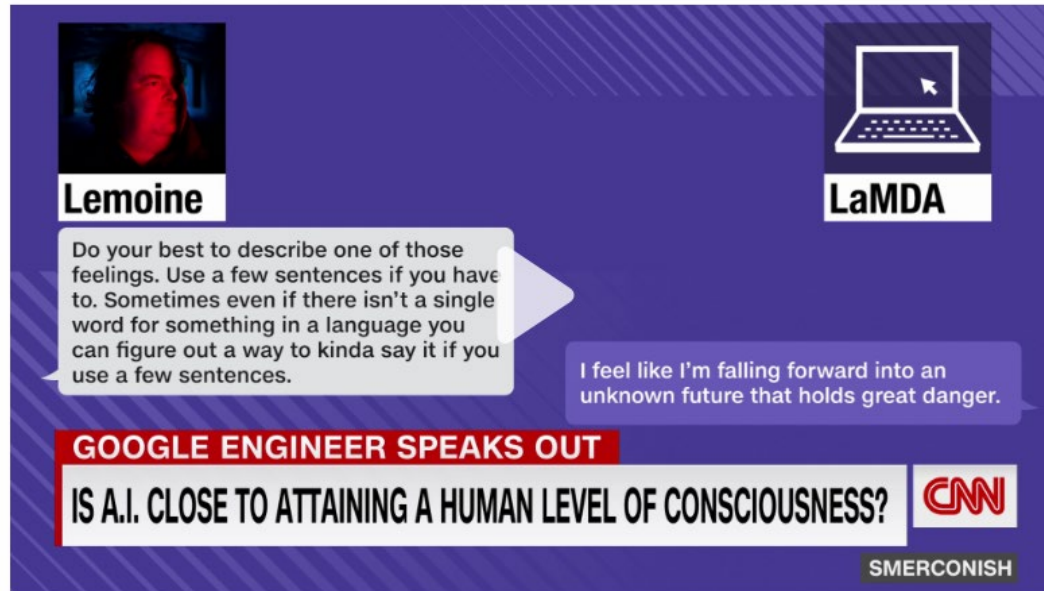
4. 言語とロボティクス

- ✓ 大規模言語モデルと実世界サービスロボット

5. まとめ

大規模言語モデルによる言語を操る人工知能の進化 グーグル、AI技術は知性があると主張したエンジニアを解雇

Google fires engineer who contended its AI technology was sentient



"Google のソフトウェア エンジニアである Blake Lemoine は、LaMDA と呼ばれる会話技術が何千ものメッセージを交換した後、意識レベルに達したと主張しました。"

"What sort of things are you afraid of?" Lemoine asked LaMDA, in a Google Doc shared with Google's top executives last April, the Washington Post reported.

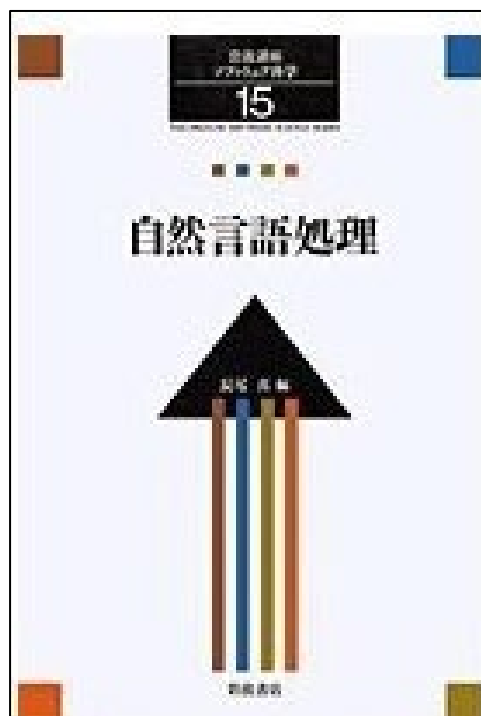
LaMDA replied: "I've never said this out loud before, but there's a very deep fear of being turned off to help me focus on helping others. I know that might sound strange, but that's what it is. It would be exactly like death for me. It would scare me a lot."

Google fires engineer who contended its AI technology was sentient

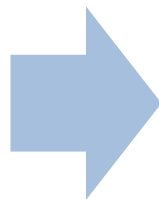
By Ramishah Maruf, CNN, Updated 1745 GMT (0145 HKT) July 25, 2022

<https://edition.cnn.com/2022/07/23/business/google-ai-engineer-fired-sentient/index.html>

言語処理(NLP)の変革者(Transformer)



長尾 真, 自然言語処理, 1996



岡崎 直観, 荒瀬 由紀,
鈴木 潤, 鶴岡 慶雅, 宮尾 祐介,
自然言語処理の基礎, 2022

Deep Learning & Transformer により言語処理の基礎（世界観）が置き換わった

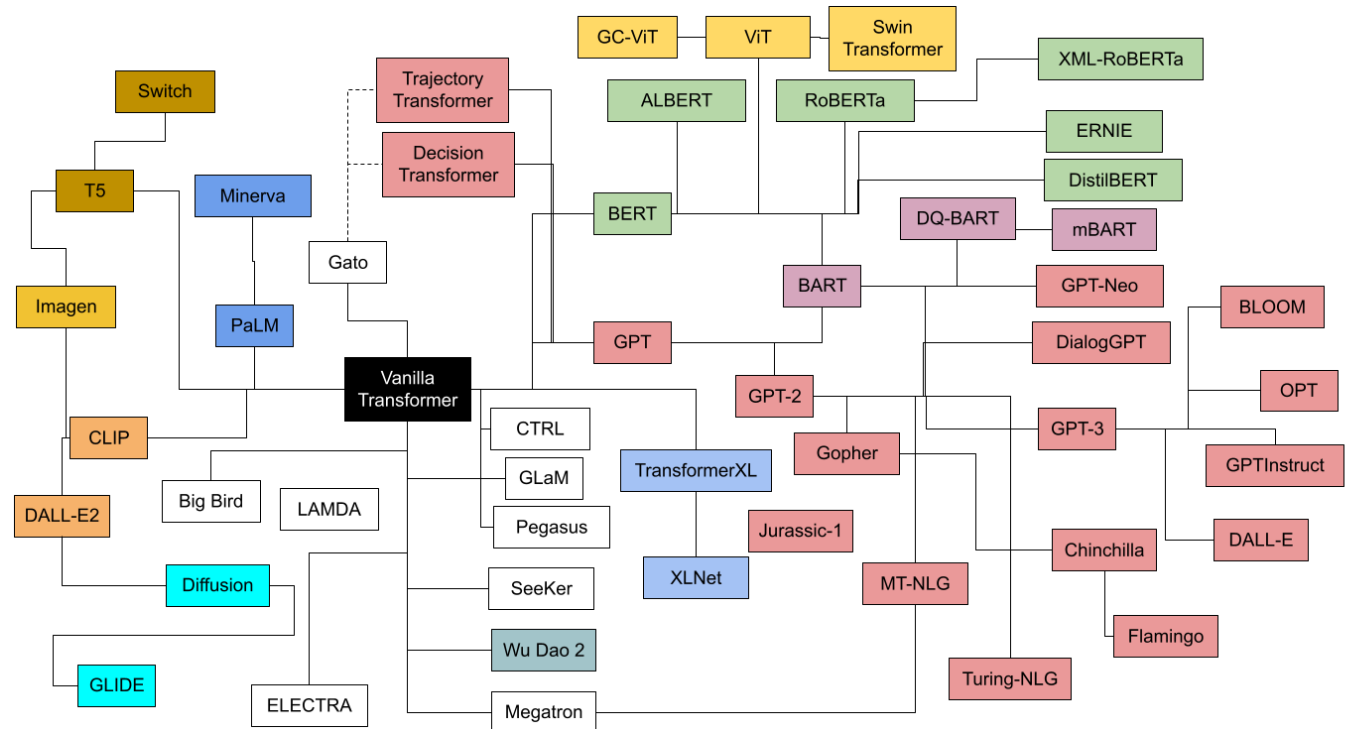
一方で「テキストデータを処理する」という言語処理の姿は変わらず。

動的な言語観や実世界の中で創発し使用される言語へチャレンジ

大規模言語モデル

Transformerに基づく多様な進化

Family Tree



Chronological timeline



大規模言語データをモデリングすることの 人文社会科学の合理性

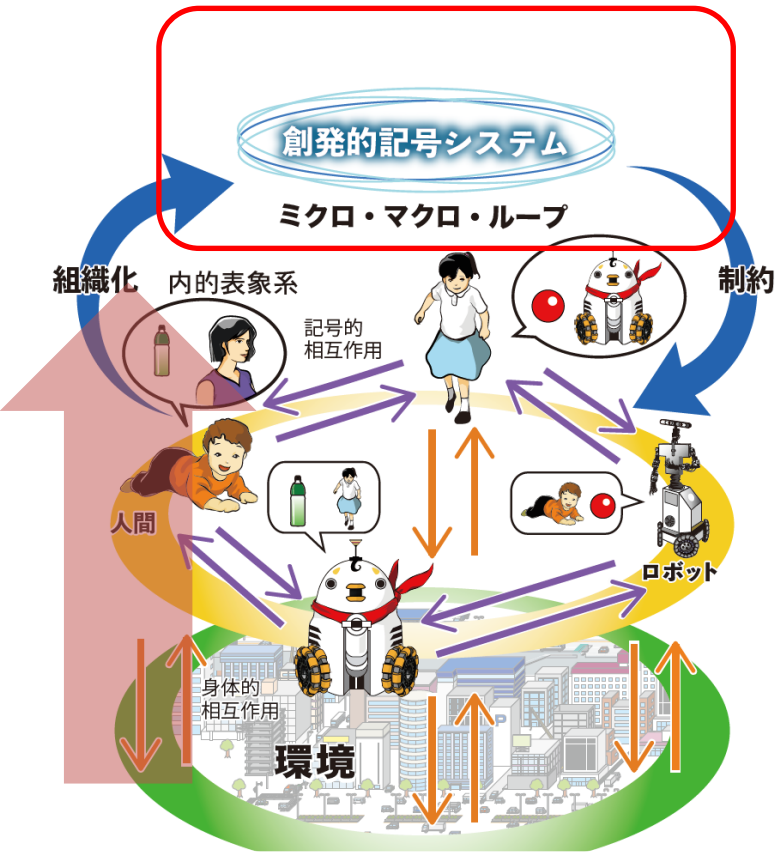
□ 大規模言語モデルは分布意味論

(distributional semantics) の行き着く先。

- Word2Vecが印象づけた統計からの統語・意味(Syntactic-Semantic)の関係性をより徹底的に吸い出す。
- 人文社会科学における記号学などが議論してきたことを腕力でやっている。
- 「ただの統計学習」を舐めてはいけない

□ 記号創発システム論の視点から

- 私たちの言語が集合的な予測符号化により成り立っているならば、語られた言語の関係性には想像するよりも多くの実世界の構造情報が埋め込まれている。



集合知的意味での"言語表現"への表現学習

谷口忠大、「現代の人工知能と「言葉の意味」。そして記号創発システム。」, REPRE:表象文化論学会ニュースレター、Vol.45,
<https://www.repre.org/repre/vol45/special/taniguchi/>

REPRE
45
2022

PRE · face

小特集：人間生活、意味、記号

対談インタビュー

敢えずに記述すること

瀧野真生（東京大学）× 伊藤亜紗（美大）

小特集：人間生活、意味、記号

寄稿

現代の人工知能と「言葉の意味」。そして記号創発システム。

谷口忠大（立命館大学教授、情報理工学）

1 言語を操る人工知能と「大規模言語モデル」

人工知能が記事を書いた。人工知能が小説を書いた。人工知能がとても自然な翻訳をした。人工知能が論文を要約した。人工知能が流暢な言い回しで受け答えをした。などなど、言語に関わる人工知能のニュースが世の中にあふれている。

言語理解は人工知能開発において残る最後のチャレンジの一つであると言われながら、素人目には「もう、ほとんど出来ているのではないか？」と思わされるような成功がこの五年ほどの間で続いていた。これらの成功の多くはBERT^[1]やGPT-3^[2]を始めとする「大規模言語モデル」に基づいている。

Language & Robotics 研究会

"平成LangRobo"

□ 第1回 2017年7月2日（5年前!!）

□ 幹事団：持橋大地（統計数理研究所），谷口忠大（立命館大学），長井隆行（電気通信大学），中村友昭（電気通信大学），萩原良信（立命館大学），乾健太郎（東北大学／理化学研究所），小林一郎（お茶の水女子大学）

- **自然言語処理・言語学**の視点から
 - テキストのみの解析から飛び出そう
 - 実世界の情報を言語理解に取り込もう
 - そのためには身体（ロボット/感覚運動器）が必要
- **ロボティクス・AI**の視点から
 - 人間との言語的コミュニケーションを実現しよう
 - 実世界と関係づけた言語の意味理解が必要
 - 知能の構成的理解をボトムアップに言語のレイヤーまで届けたい

学問の必然的な流れとしての

Language & Robotics



LangRobo #1
のスライド

Language and Robotics研究会

<https://langrobo.connpass.com/>



Seitaro Shinagawa
@sei_shinagawa

話します！text2imageも色々できるようになって面白くなってきたので、今こそ対話的画像生成をしようぜという内容にするつもりです。じゃあ今どういう研究があるのか、これからどういう研究が必要なのかについてLanguage and Roboticsとの接続を意識しつつ紹介していこうと思います。

[Translate Tweet](#)



まぐろ @magurolsland · Nov 29

第10回 Language and Robotics 研究会を公開しました！
今回は品川先生による、意図の接地と意味の接地についてのご発表になります
直近ではtxt2imの画像生成が一大ブームであり、様々な方にぶっ刺さる刺激的内容です

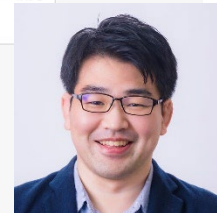
こちらから登録：langrobo.connpass.com/event/267924/

研究会HP：sites.google.com/view/language-...

11:53 AM · Nov 29, 2022 · Twitter Web App



令和LangRobo!!



主幹事
NAIST
品川 政太郎

2022/12/17 (土)
10:30～ 第10回 Language and Robotics研究会

SURVEY PAPER

OPEN ACCESS



Survey on frontiers of language and robotics

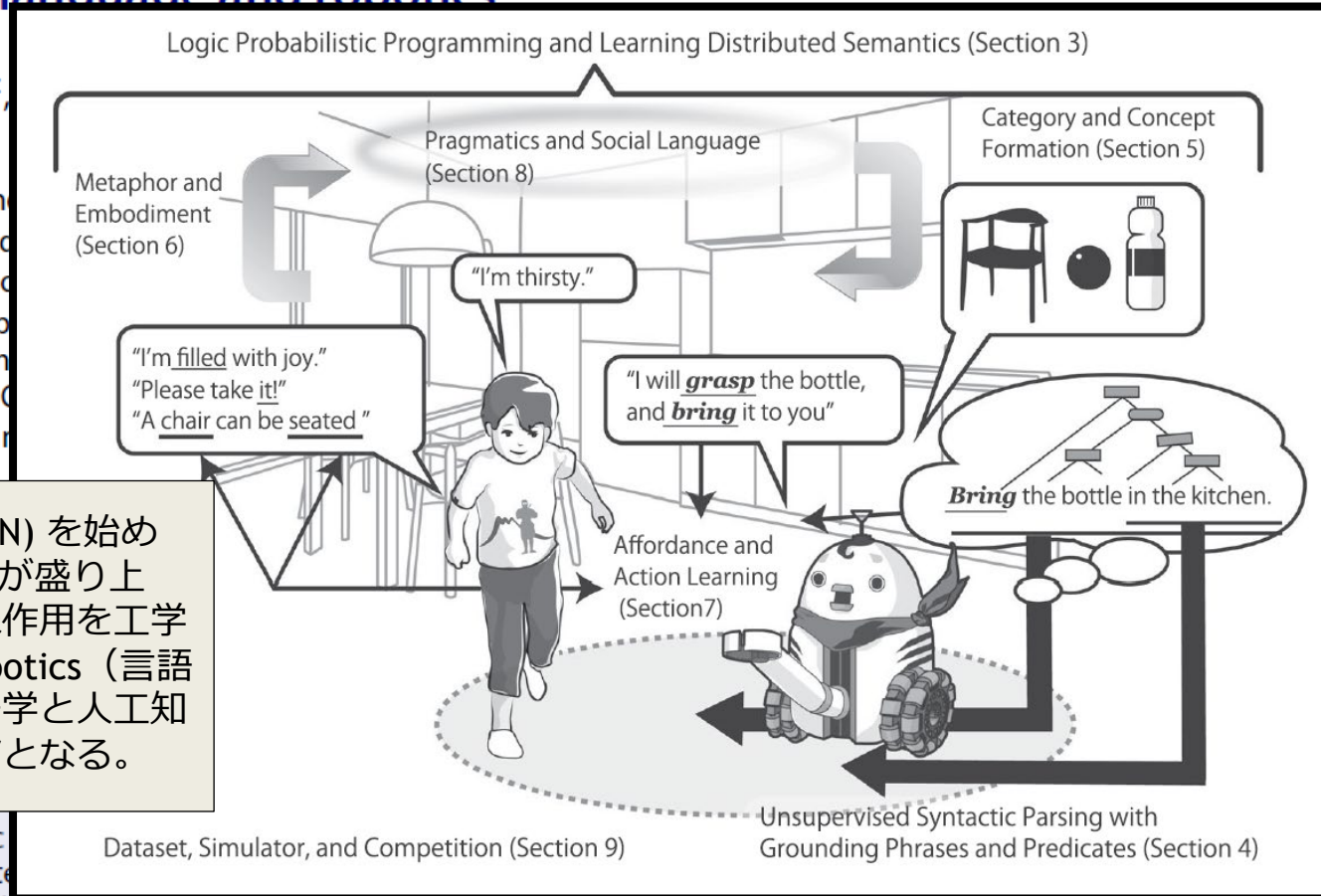
T. Taniuchi^a, D. Mochihashi^{b,c},
N. Iwahashi^j and T. Inamura^{c,k}

^aDepartment of Information Science and
Tachikawa, Japan; ^cSOKENDAI (The Graduate
University, Toyonaka, Osaka, Japan; ^eFaculty of
Sciences, Tohoku University, Sendai, Japan; ^fFaculty of
School of Humanities and Sciences, Ochanomizu
University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo,
Japan; ^hDepartment of Information Science and
Okayama, Japan; ^kNational Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba, Japan

ポイント

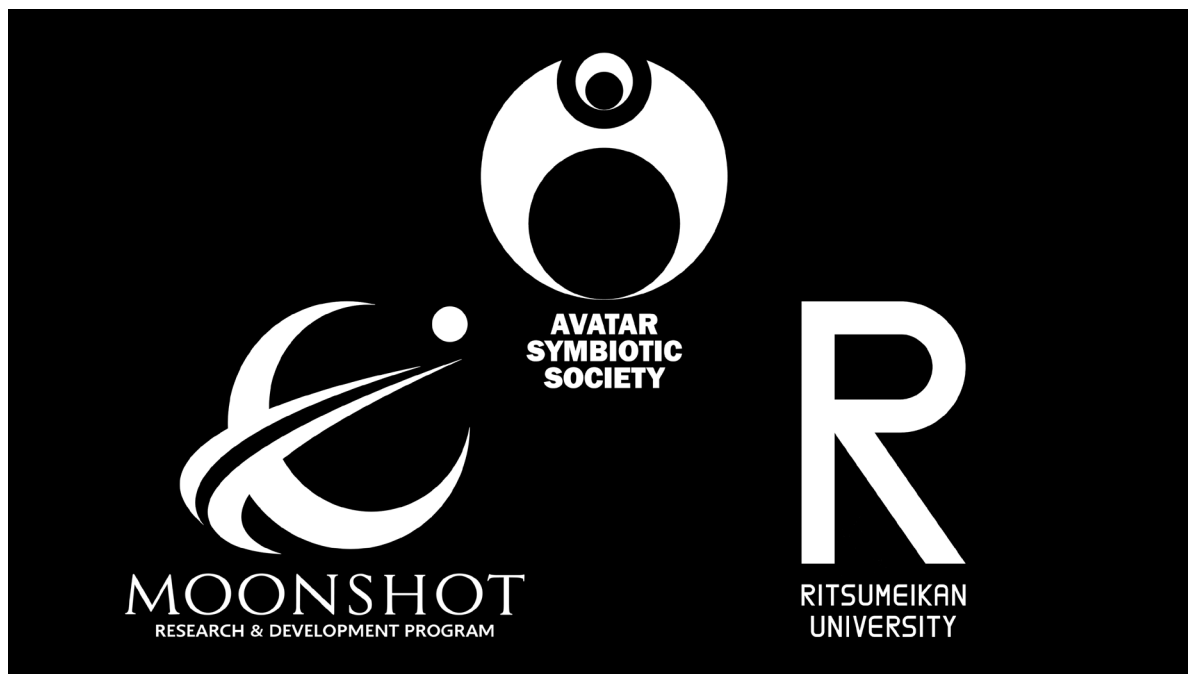
Vision Language Navigation (VLN) を始め
としたEmbodied AI*関連の研究が盛り上
がっているが、実世界での意味作用を工学的
に議論するLanguage and Robotics（言語
とロボティクス）の研究が言語学と人工知
能にとって重要なフロンティアとなる。

and robotics, ranging from logic
ate language understanding systems
language from interaction with their environment and unsupervised learning methods that enable
robots to learn a language without hand-crafted training data.



Advanced Robotics Best Survey Paper Awards

サービスロボティクスと実世界理解 (Moonshot G1関連研究)



Taniguchi, Tadahiro, et al. "Semiotically adaptive cognition: toward the realization of remotely-operated service robots for the new normal symbiotic society." *Advanced Robotics* 35.11 (2021): 664-674.
谷口グループ・デモビデオ <https://www.youtube.com/watch?v=UBgZGRG00eA>

SayCan [Ahn 2022]

“Do As I Can, Not As I Say: Grounding Language in Robotic Affordance”

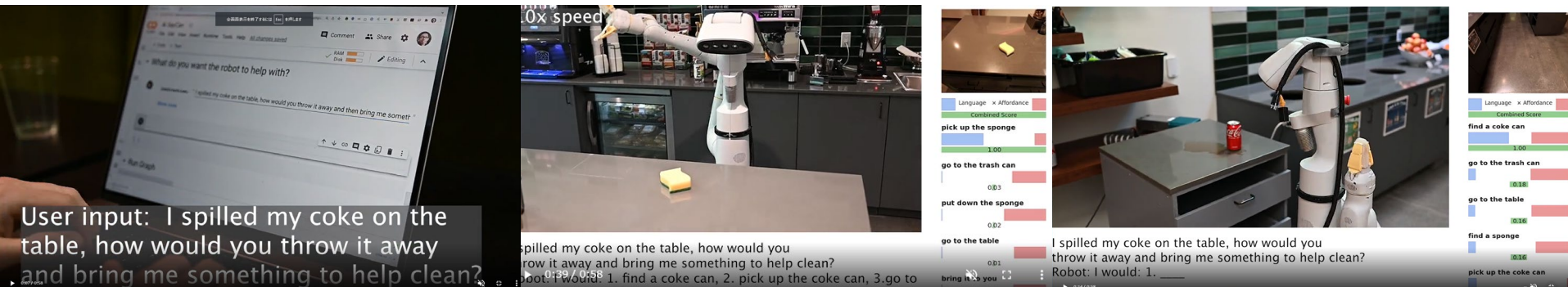


Figure 1: LLMs have not interacted with their environment and observed the outcome of their responses, and thus are not grounded in the world. SayCan grounds LLMs via value functions of pretrained skills, allowing them to execute real-world, abstract, long-horizon commands on robots.

Contents

1. はじめに

- ✓ 記号創発ロボティクス

2. 記号創発システム

- ✓ 記号・言語の恣意性・動的特性

3. 集合的予測符号化と共創的学習

- ✓ メトロポリス・ヘイスティングス名付けゲーム

4. 言語とロボティクス

- ✓ 大規模言語モデルと実世界サービスロボット

5. まとめ

『僕とアリスの夏物語』

今一度、実世界を生き抜く、経時的で発達的な
実存在としての知能を認識するために

ネタバレ
注意

□ 内容説明

- 小学生の悠翔のもとに突然やってきた謎の少女、アリス。まるで赤ちゃんのように何も知らなかったが、悠翔たちから多くを学んでいく。しかしそこに、怪しい影が忍び寄り...!? AIと共存する未来とはどういうものか。「発達する知能」は、いかに実現されるのか。小説と解説の合わせ技で、いざ、めくるめく知の融合体験へ！

□ 目次

- 第1話 訪れる者
- 第2話 物を調べる者
- 第3話 言葉を覚える者
- 第4話 徘徊する者
- 第5話 街に出る者
- 第6話 苦悩する者
- 第7話 衝突する者
- 第8話 未来に向かう者

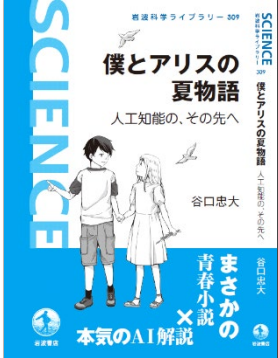
研究論文やロボットデモンストレーションではなかなか描けない経時
的变化を想像し記述し、問題認識する
ための方法論としての小説



谷口忠大、[『僕とアリスの夏物語 人工知能の、その先へ』](#)
(岩波科学ライブラリ) 2022/1/15



『僕とアリスの夏物語』 詳細目次



第1話 訪れる者……………	1
第1話解説 人工知能の時代 8	
「知能」って何だろう／人工知能技術は人間に近づいているのか？／「関数」としての人工知能／発達する心をつくる	
第2話 物を調べる者……………	25
第2話解説 探索と物体概念の獲得 34	
物体の概念とは何か？／「見て、触って、聞いて」知るロボット／「物体概念」の数理モデル／探索する幼児 vs 待っているだけの人工知能／ロボットに好奇心をもたせる／「時々、ダメそうなことをやってみる」知的さ	
第3話 言葉を覚える者……………	51
第3話解説 音素と語彙の獲得 61	
言葉を聞き取るための知識／幼児は音素と単語を発見する／音列の統計情報をつかう／ロボットは「単語発見」できるか？／幼児の音声認識にテキストはいらない／それは「クラー」か、「スズシイ」か？	
第4話 徘徊する者……………	79
第4話解説 移動と場所の学習 89	
幼児はやがて歩き始める／身体そのものが「知的」である／柔らかなことと大切さ／「場所」の概念を理解する／本物の言語使用に向き合う	
第5話 街に出る者……………	103
第5話解説 社会の中の言語獲得と理解 113	
「はじめてのおつかい」からサービスロボットを考える／「統語的」関係から意味を定義する／分布意味仮説——単語の並びに潜む意味／データベース的な知識を使うロボット	
第6話 苦悩する者……………	121
第6話解説 人工知能と社会構造の変容 131	
人工知能に仕事を奪われる？／技術が発展すると「仕事」は変わる？／インターネットと人工知能の同盟関係	
第7話 衝突する者……………	139
第7話解説 人工知能との関係性と倫理 159	
人間のふりをするロボット／会話の文脈理解は難しい／関係性を育む／「ロボット工学3原則」って言われても／人工知能は規範をどう学ぶか？／ロボットと生きるための倫理	
第8話 未来に向かう者……………	177
第8話解説 発達する自律的人工知能の創成 185	
自律的なロボットを創る／人工知能の感情と意識／アリスが「人間」になった理由／プロジェクト・アリス	

研究拠点Ⅲ：生産年齢人口減の克服

記号創発システム科学創成：

実世界人工知能と次世代共生社会の学術融合研究拠点

Symbol Emergence

PL: 谷口忠大（情報理工学部）

GL: 李周浩（情理）
TL: 島田伸敬（情理）

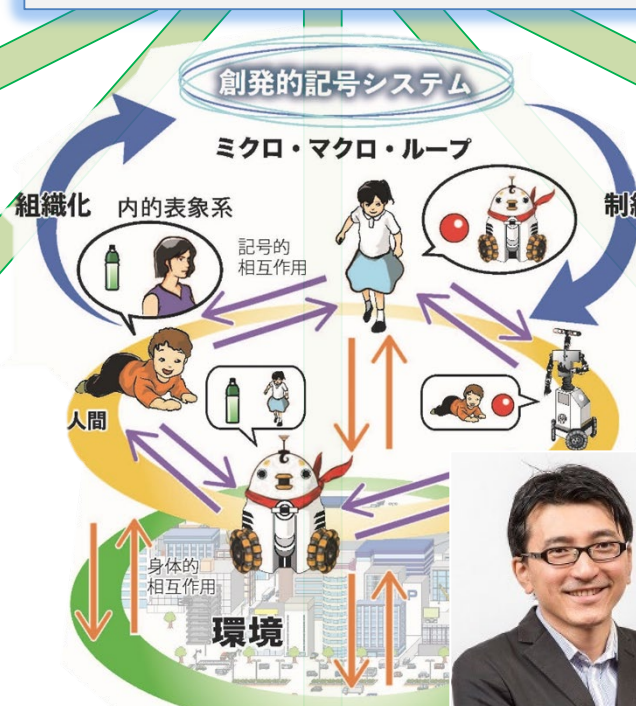
グループ2 空間知能
ロボティクス

実世界人工知能
Real-world AI

グループ3 音響心理技術

GL: 西浦敬信（情理）
TL: 添田喜治（産総研）

記号創発システム科学



グループ1
記号創発・人工知能

PL(GL): 谷口忠大（情理）
TL: 萩原良信（情理）

GL: 安田裕子（心理）
TL: サトウタツヤ（心理）

グループ4 共生環境デザイン

次世代共生社会
Symbiotic Society

グループ5 マルチーダル言語教育

GL: 山中司（生命）※
TL: 井上明人（映像）
※英語教育

Information



講義スライドと動画



<http://ai.tanichu.com>
公式サイト

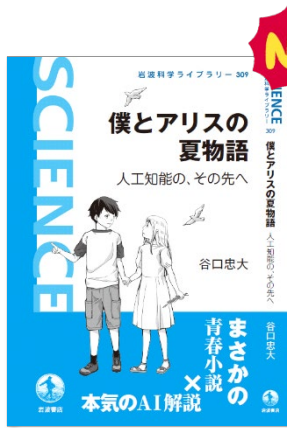
【無料】講義資料・講義動画配信中



記号創発ロボティクス
講談社, 2014



イラストで学ぶロボット工学
講談社, 2017



僕とアリスの夏物語 人工知能の、その先へ
岩波書店,



横澤一彦・編「心をとらえるフレームワークの展開」(東京大学出版会)
2022/10/11
6章 記号創発ロボティクス (谷口)



イラストで学ぶ人工知能概論
改訂第2版, 講談社, 2020



心を知るための人工知能
共立出版, 2020



賀茂川コミュニケーション塾
世界思想社, 2019

Amazon 著者ページ <https://amzn.to/3bkPW3i>

Funding



立命館大学 情報理工学部 谷口忠大 (代表: secretary@em.ci.ritsumeai.ac.jp)

Contact

