

記号創発ロボティクス: 内部視点から見る記号系組織化への 構成論的アプローチ

立命館大学情報理工学部 准教授
谷口忠大



Contents

1. はじめに
2. 記号創発ロボティクス
3. マルチモーダルカテゴリ形成
4. 二重分節解析器
5. 教師なし語彙獲得
6. まとめ

自己紹介

● 学歴・職歴

- 2006年3月 京都大学大学院工学研究科
精密工学専攻博士後期課程
(指導教員: 榎木哲夫)
- 2005年4月 日本学術振興会特別研究員(DC2)
- 2006年4月 日本学術振興会特別研究員(PD)
- 2008年4月 立命館大学情報理工学部知能情報学科 助教
- 2010年4月 立命館大学情報理工学部知能情報学科 准教授



谷口忠大 @tanichu

機械学習
応用

Machine
learning

記号創発
ロボティクス

Cognitive
robotics

自律分散型
スマートグリッド

Decentralized
autonomous
system

コミュニケーション支援
コビブリオバトル

Human
communication

余談ですが、ついったーはこんなかんじです。

Tadahiro Taniguchi (@tanichu)

谷口忠大、たにちゅー、立命館大学情報理工学部准教授。プライベートアカ。新刊「イラストで学ぶ人工知能概論」「記

ツイート	フォロー	フォロワー	お気に入り	リスト
95,249	793	4,154	1,719	18

プロフィール

ツイート ツイートと返信 画像 / 動画

Tadahiro Taniguchi @tanichu · 15秒

この画面をキャプする

記号創発システム論 記号創発ロボティクス



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

Contents

1. はじめに
2. 記号創発ロボティクス
3. マルチモーダルカテゴリ形成
4. 二重分節解析器
5. 教師なし語彙獲得
6. まとめ

発達する知能

環境に適応し多様な概念や行動を獲得する知能



- 人間は生まれた時、未分化な認識世界の中で活動を始めます。
- 環境適応の中で様々な概念や行動を獲得していく。
- そして言語を用いたコミュニケーションをも可能にする。
- その構造、計算論的プロセスを知りたい。

言葉の意味とは何か？

グラフ構造を持った意味ネットワーク, 辞書の例で..

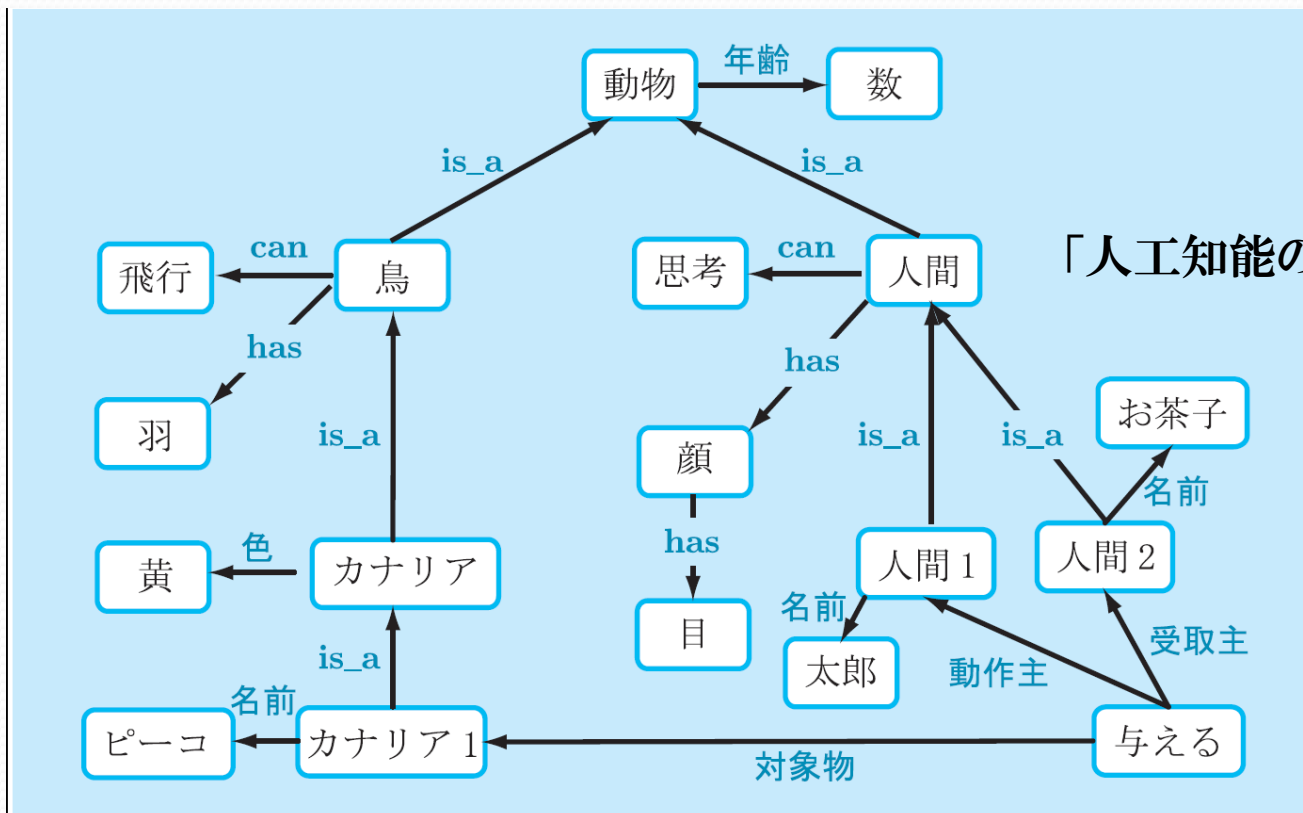
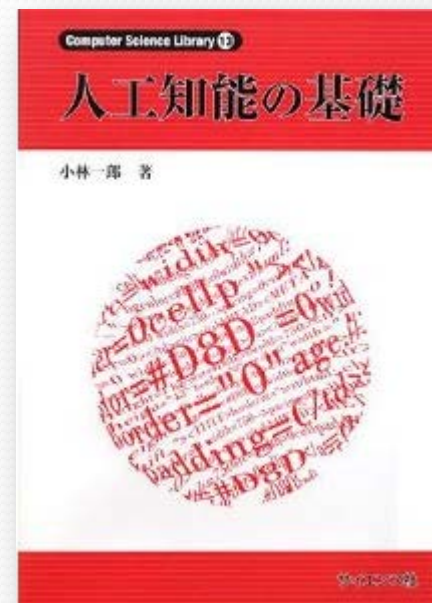


図 8.4

意味ネットワークの例
「人工知能の基礎」サイエンス社より

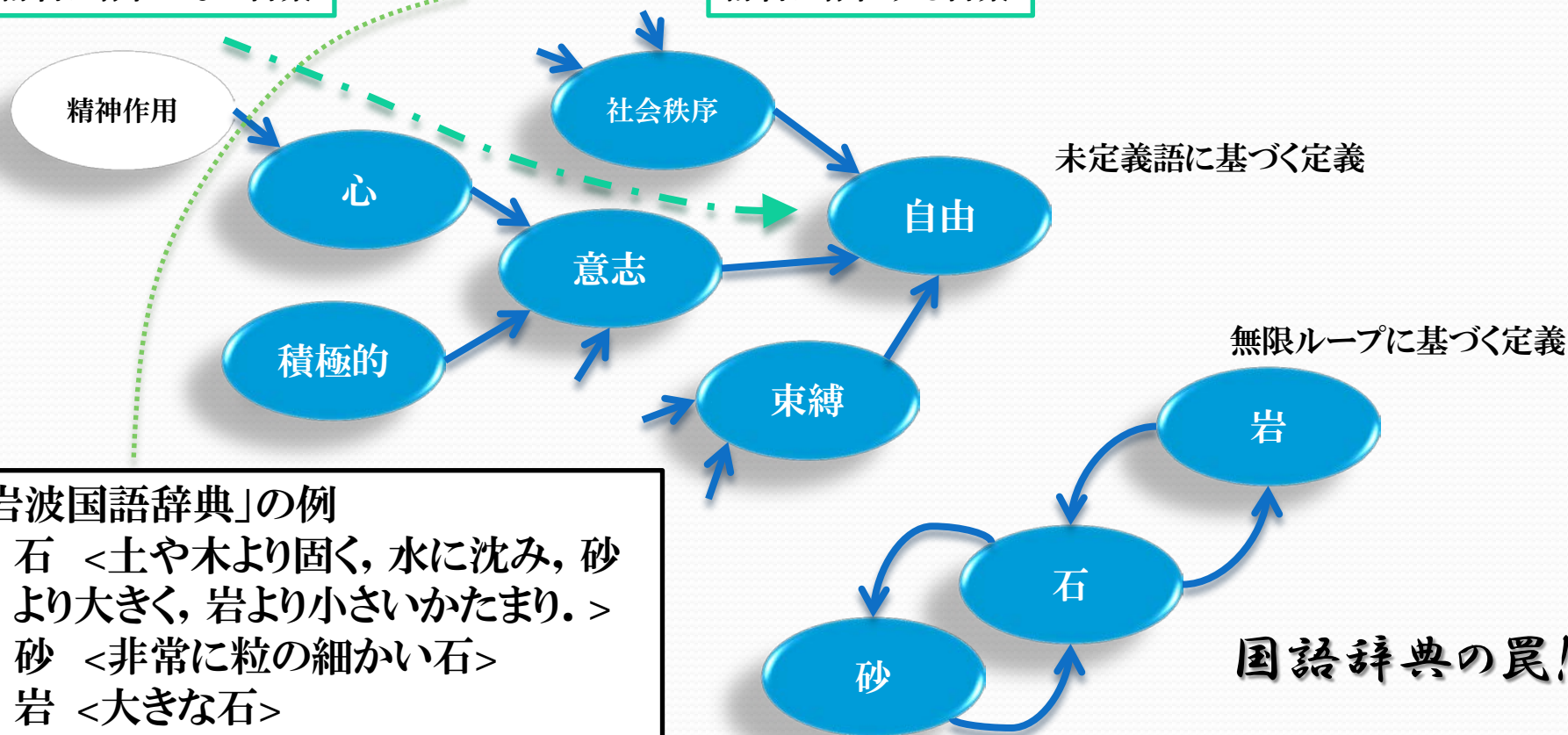


言葉の意味とは何か？

グラフ構造を持った意味ネットワーク, 辞書の例で..

辞書に存在しない言葉

辞書に存在する言葉



「岩波国語辞典」の例

- 石 <土や木より固く, 水に沈み, 砂より大きく, 岩より小さいかたまり.>
- 砂 <非常に粒の細かい石>
- 岩 <大きな石>

言葉の意味は感覚的に理解するしかない。

記号接地問題

- ロボットがいかに自らの身体を通して記号を意味づけるか？という問題。[Harnad '90]
 - 人間が設計した記号に対して、ロボットがセンサ・モータ系を通して意味づける。
- 記号の恣意性（記号論より）
 - ラベル付けの恣意性
 - 範疇化・分節化の恣意性
- 「接地」の考え方では、人間が作った恣意的な記号系を真なる記号系として用いている。（「真の記号系」存在仮定）

ロボットにとっての記号系と人間にとっての記号系は同じか？

記号系を創発的にとらえる理解

● 環世界

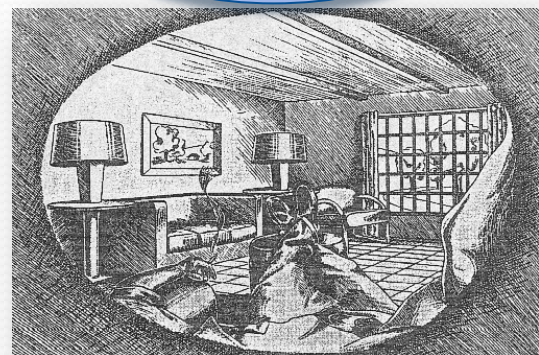
- 「生物から見た世界」(ユクスキュル)
- それぞれの動物が知覚し作用する世界の総体

● センサ・モータ系の閉じから記号へ

- 認知的に閉じた経験から得られる情報の中で如何に、記号系が組織化されていくのか。
- 自らの環世界に立脚して、多様な行動や概念を獲得し、それに基づいてコミュニケーションを行なう知能を計算論的に理解する。

記号創発システムへの
構成論的アプローチ

≡ 記号創発ロボティクス



エルンスト・マツハ「感覚の分析」より

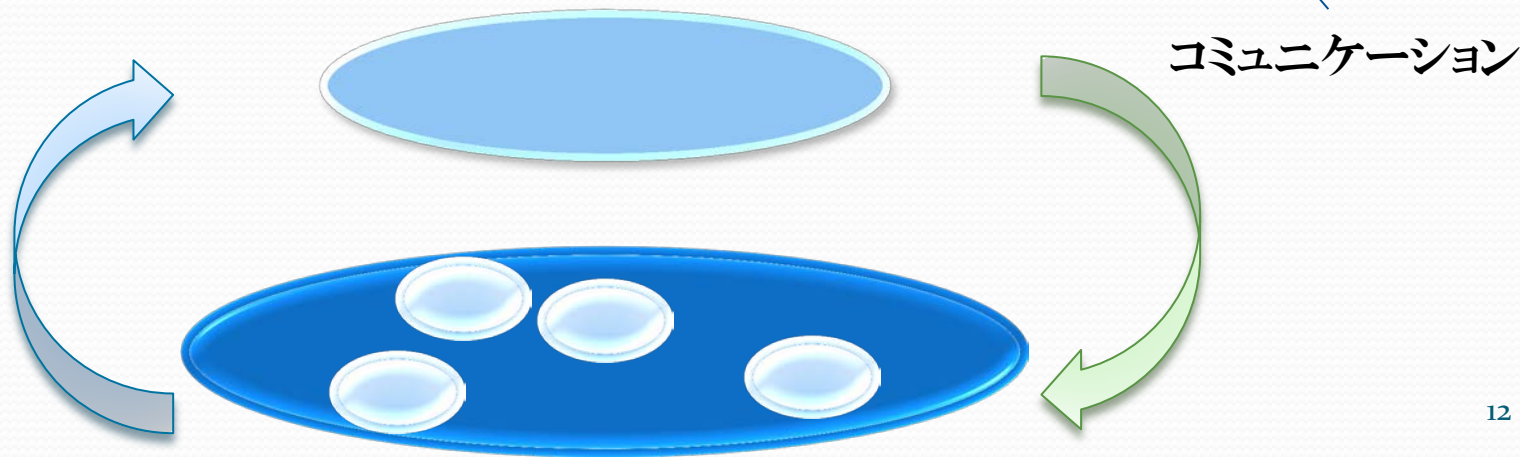
“記号”

創発システムとは？

集団の持つ記号系

- 創発

- システム構成要素間の局所的な相互作用を通じ、大域的な秩序がボトムアップ的に発現し、こうしてできる大域的な秩序が境界条件として要素間の局所的相互作用をトップダウン的に支配するという双方向の過程により、新しい機能、形質、行動などの獲得をもたらすこと。



記号創発システムのマイクロ・マクロループ

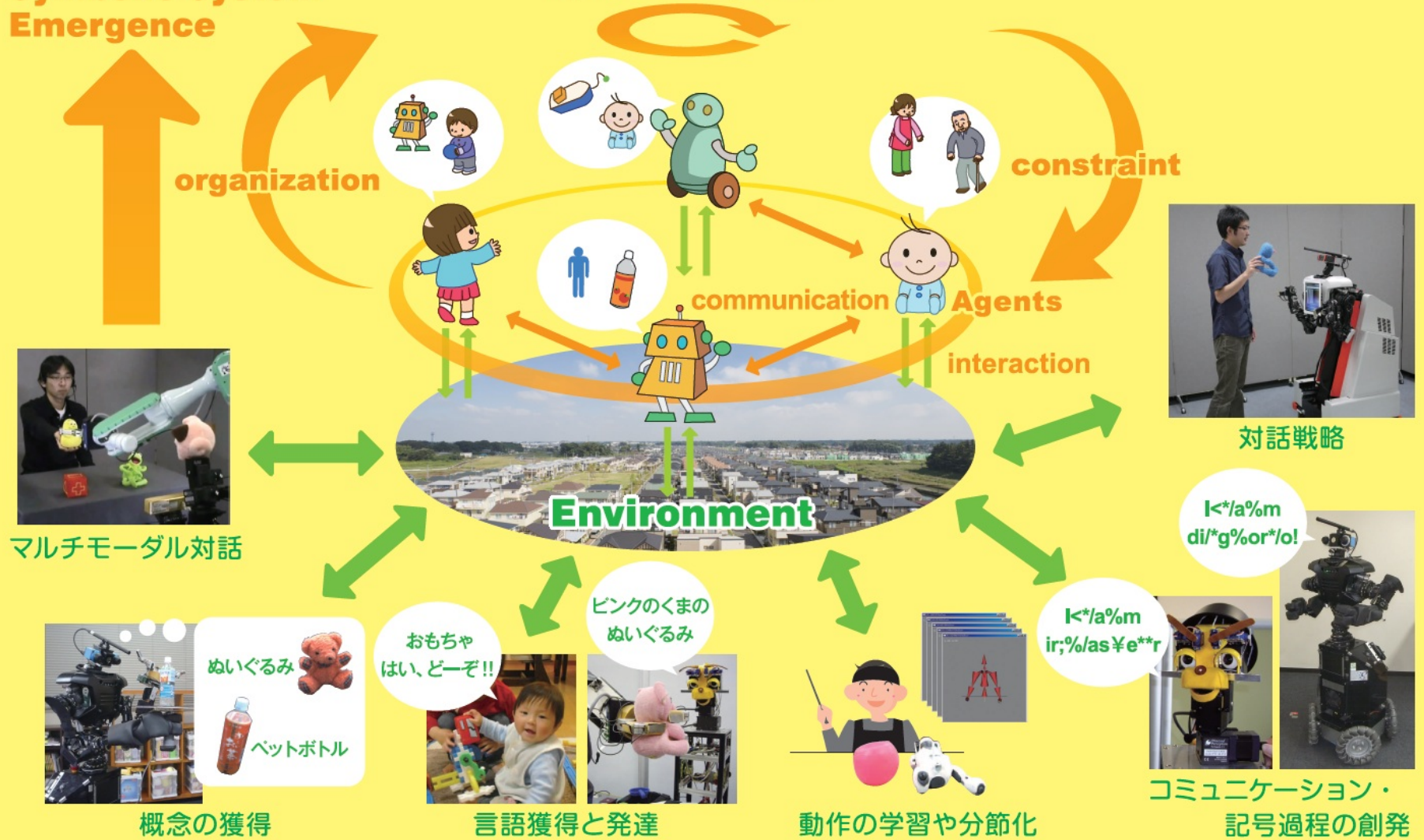
- ボトムアップな自己組織化
 - 個々のエージェントが自らの身体(感覚・運動)に基づく環境との相互作用を通して、概念形成等を行い、記号過程を支える情報を自己組織化させる。
- トップダウンな制約
 - 他者との記号論的な相互作用(コミュニケーション)を実現するために、また、それを通じた協調作業を可能にするために、集団によって担われる創発した記号系にトップダウンな制約を受ける。また、それをボトムアップに変更する。



記号創発ロボティクス

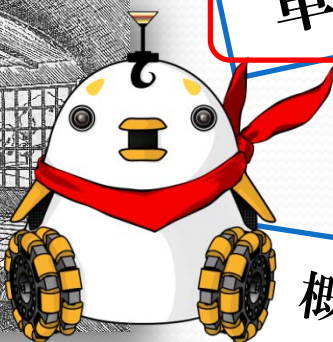
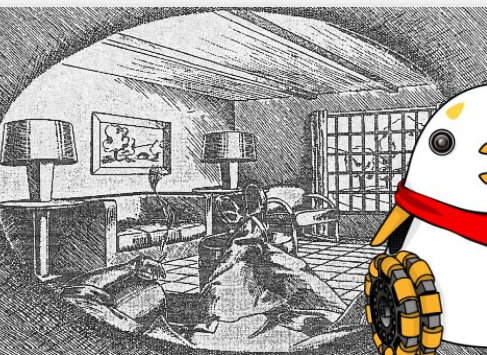
Symbolic System
Emergence

Symbolic System



個体の閉じた認識世界の中で いかにして言語獲得を行えるか？

- 言語獲得の「動的過程」を表現する記述の必要性
- 実世界で動作しうる計算論モデルの構築

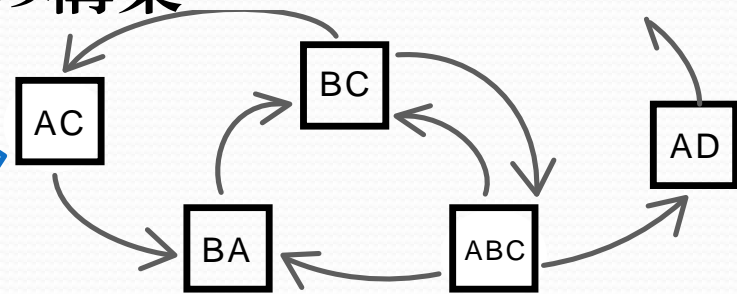


単語・文法の獲得

二重分節解析器

概念・カテゴリーの獲得

マルチモーダル
カテゴリー形成



※もちろん他にもやらないといけ
ないことは山ほどありますが…

Contents

1. はじめに
2. 記号創発ロボティクス
3. マルチモーダルカテゴリ形成
4. 二重分節解析器
5. 教師なし語彙獲得
6. まとめ

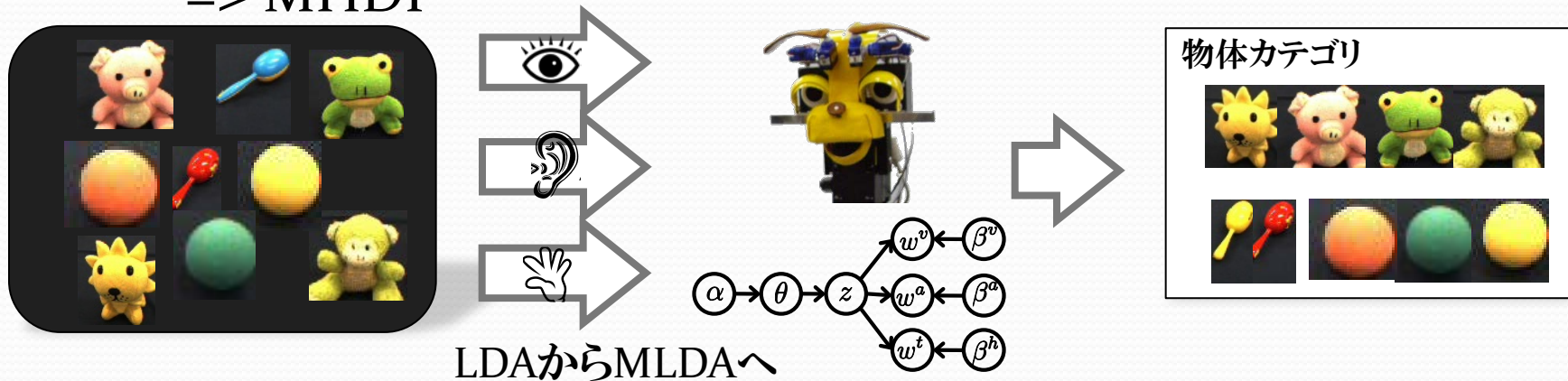
マルチモーダル情報統合と カテゴリ形成

- 人は物体をカテゴリに分けて記憶している!?
 - 物体カテゴリを形成
 - 全ての物体を個別に覚える事なく様々な物体に対応
 - カテゴリを通した様々な予測
 - 新たに「見る」物体に対しても「これも○○だろう」とカテゴリを通して認識することで、他のモダリティ情報を想起可能, 柔軟に対応可能.
 - 単語・言語情報への接続
 - 人と対話するために必要
 - マルチモーダル情報統合
 - カテゴリ形成には複数の感覚系の情報が利用されている.

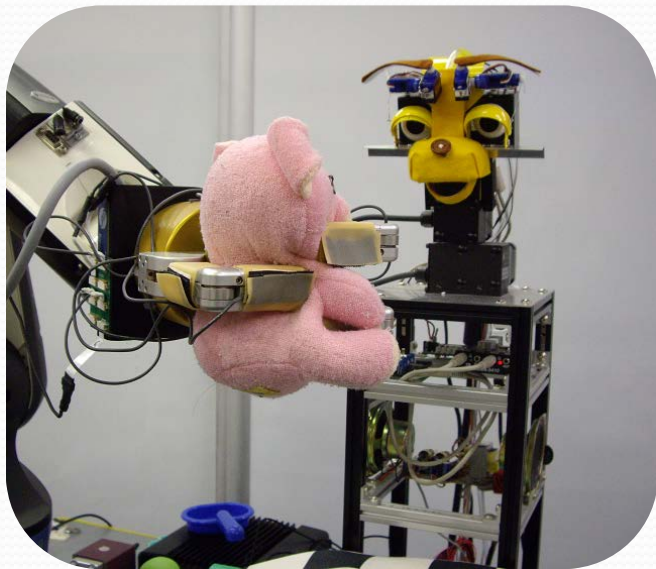
身体性に基づくボトムアップな
マルチモーダルカテゴリ形成

マルチモーダルカテゴリ形成

- MHDP [Nakamura '11]
 - 視覚・聴覚・触覚情報を用いた物体のカテゴリ形成
 - 確率モデルLatent Dirichlet Allocation (LDA)のマルチモーダル拡張 => MLDA
 - 教師なしでカテゴリ分類しロボットの物体カテゴリを形成
 - ノンパラメトリックベイズに基づくカテゴリ数の自動推定
=> MHDP



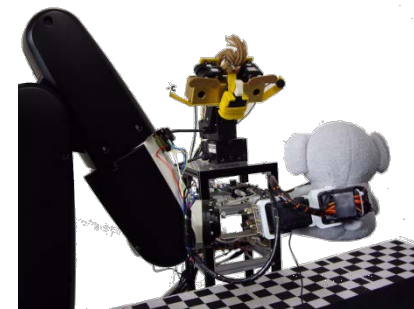
実験 [Nakamura '11]



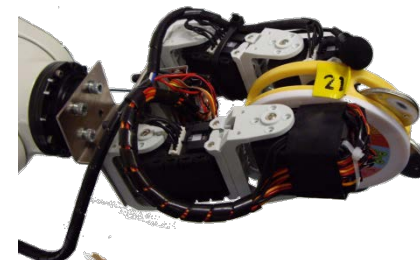
- 視覚情報 PCA SIFT (36次元) 500次元のHG
- 聴覚情報 MFCC (13次元) 50次元のHG
- 触覚情報 センサー値の変化情報(2次元) 15次元HG

● マルチモーダル情報は
全てロボットにより取得

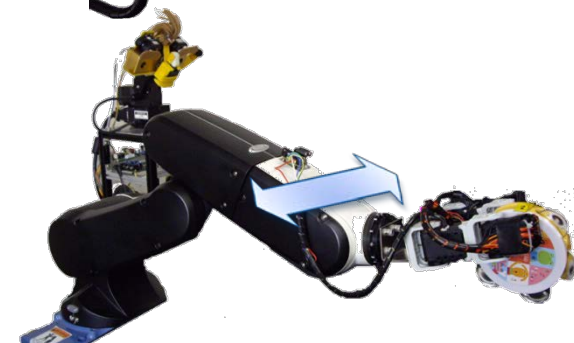
見る



握る

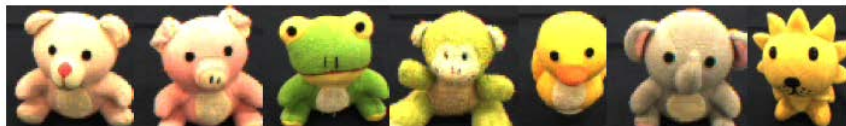


振る

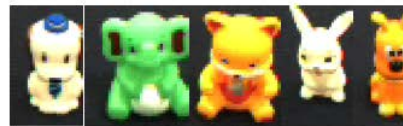


ロボットに扱わせた物体

Category 1 (Plushie)



Category 2 (Rubber doll)



Category 3
(plushie with a bell)



Category 4
(Toy vegetable)



Category 5
(Sponge ball)



Category 6
(Bottle)



Category 7
(Cup)



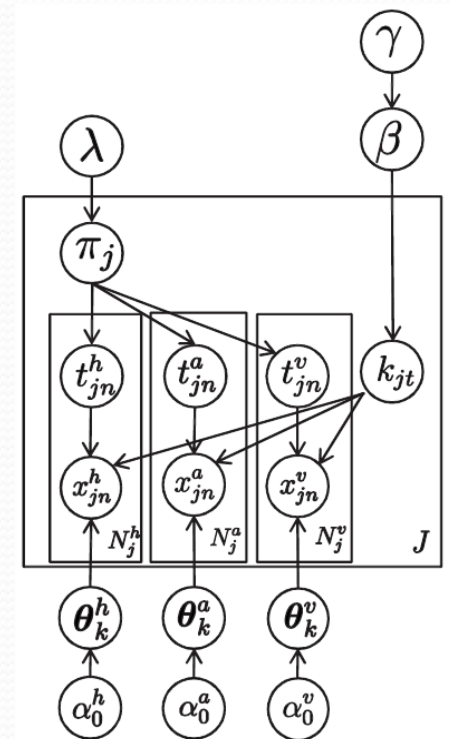
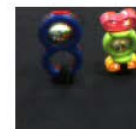
Category 8
(Maraca)



Category 9
(Block)



Category 10
(Rattle)

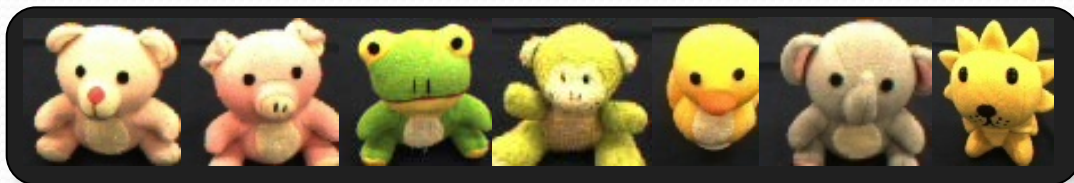


Objects used in the experiment and their categories

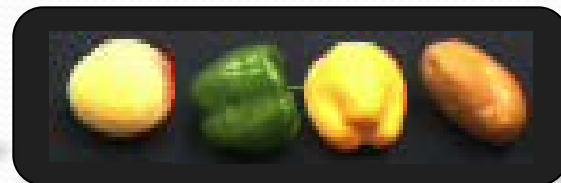
Graphical model
of MHPD-LDA

マルチモーダル情報統合に基づく カテゴリ分類結果

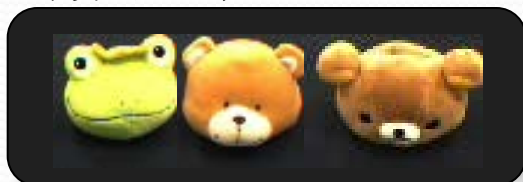
ぬいぐるみ



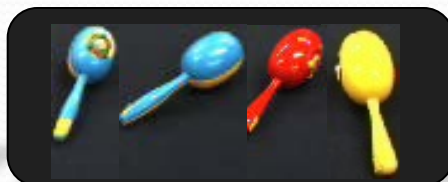
野菜のおもちゃ



鈴入り人形



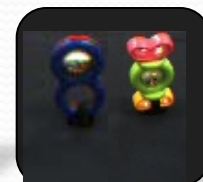
マラカス



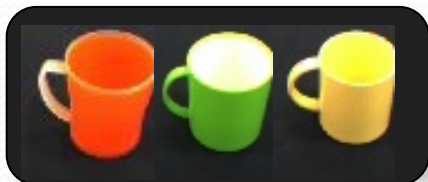
スポンジボール



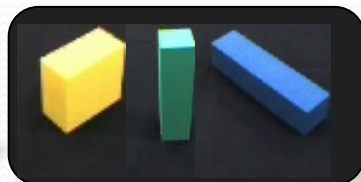
ガラガラ



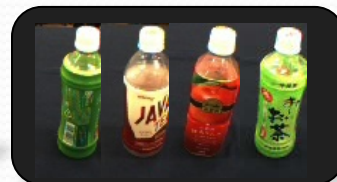
カップ



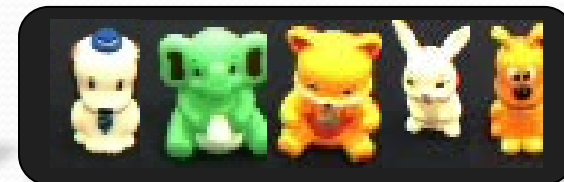
積み木



ペットボトル



ゴム製人形



マルチモーダルな情報の統合によって
多くの被験者と同様なカテゴリ分類を自動的に形成した。

単一モダリティの分類

- 視覚情報のみによる分類

- 分類精度: 79.6%
- 推定カテゴリ数: 12



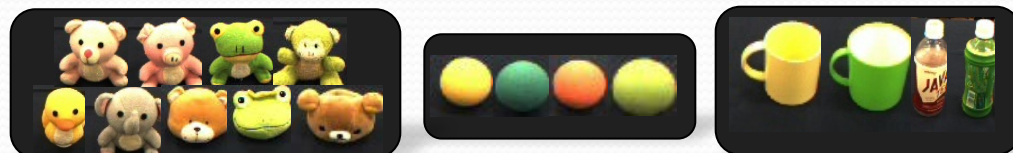
- 聴覚情報のみによる分類

- 分類精度: 38.4%
- 推定カテゴリ数: 3



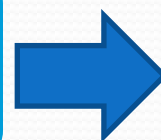
- 触覚情報のみによる分類

- 分類精度: 53.8%
- 推定カテゴリ数: 12



モダリティを制限すると、人間の物体カテゴリと同様な形成はできていない

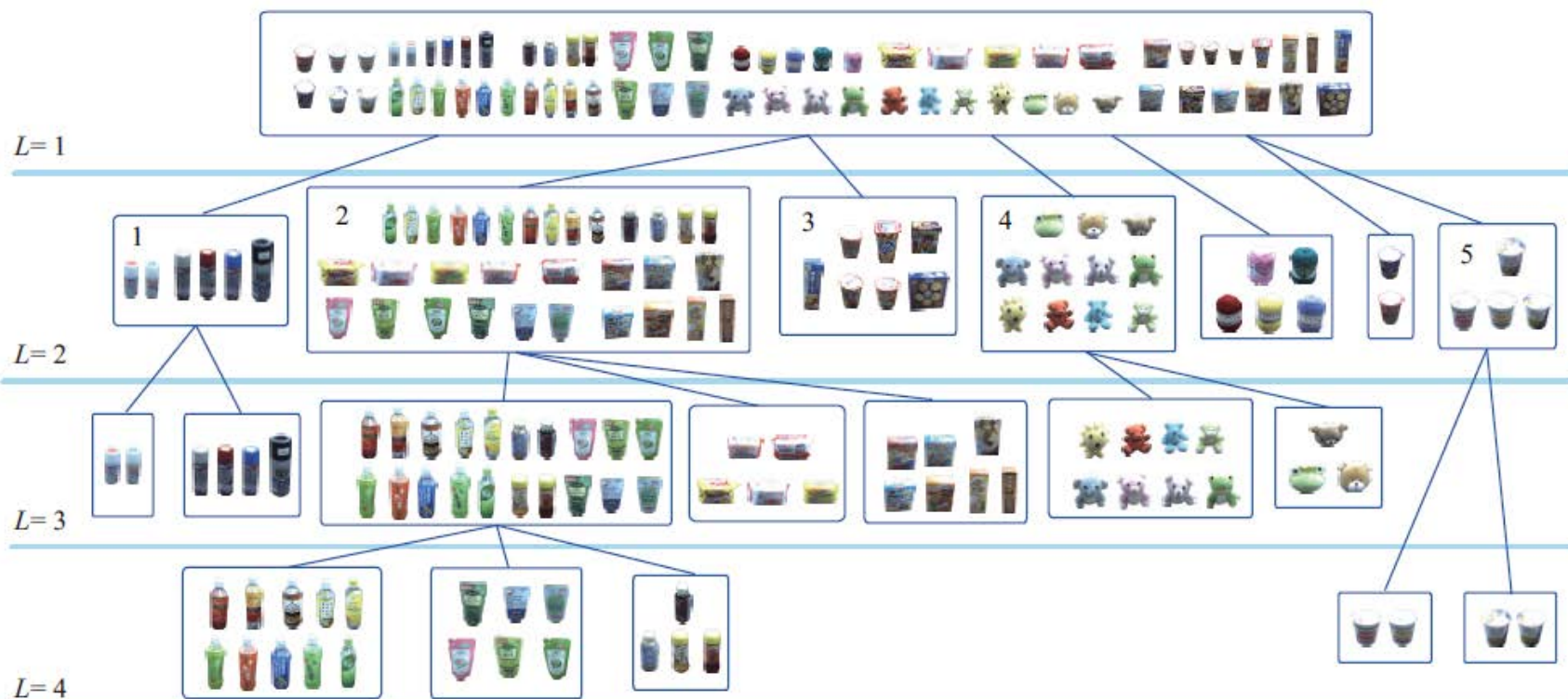
2015/2/9



カテゴリの
身体依存性

階層マルチモーダルLDAを用いたロボットによる階層的概念的形成[安藤 他 2013]

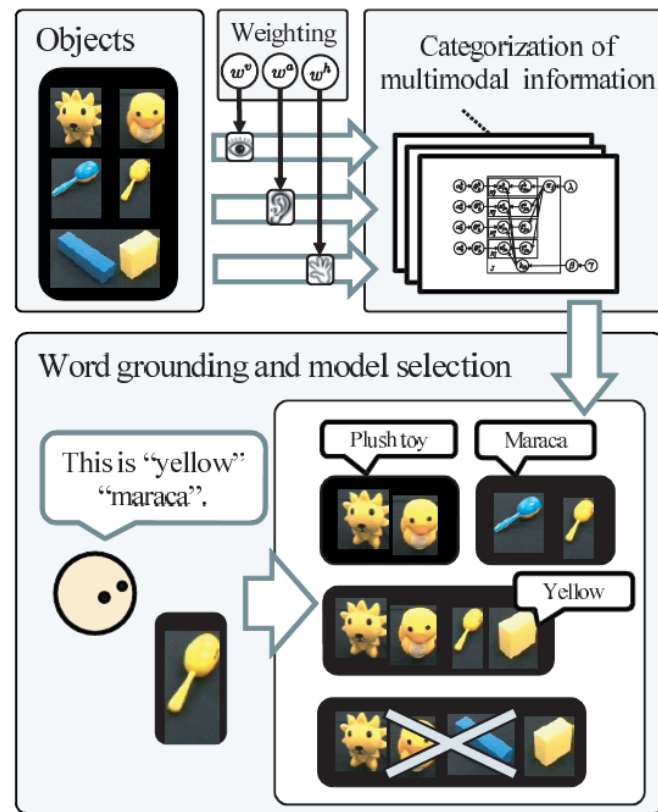
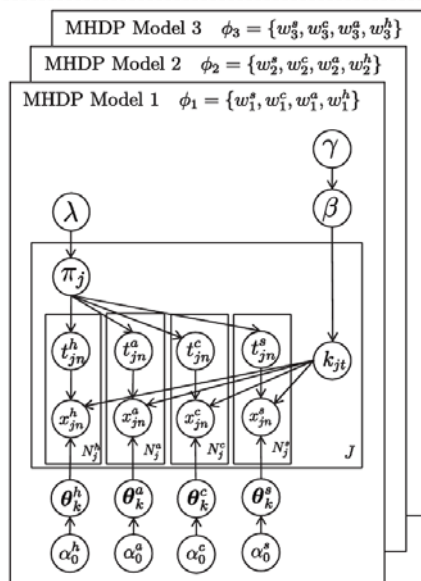
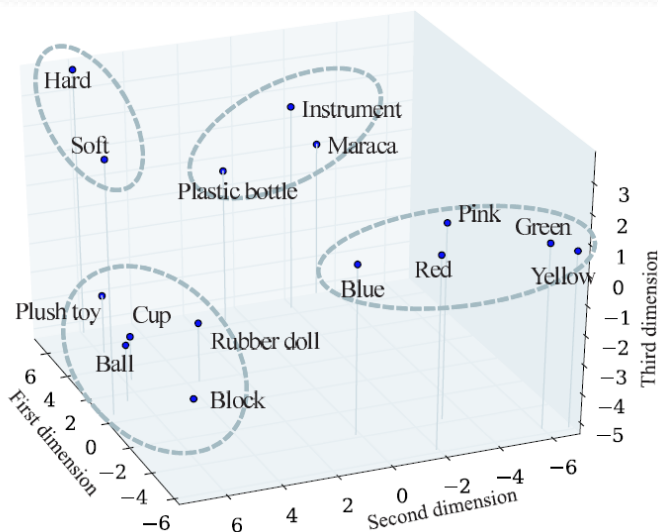
LDAを階層化したhLDA [Blei '03]をマルチモーダル化, ツリー構造の概念形成



安藤義記, 中村友昭, 荒木孝弥, 長井隆行, "階層マルチモーダルLDAを用いたロボットによる階層的概念的形成", 日本ロボット学会誌, Vol.31, No7, pp.2-12 (2013)

Bag of Multimodal HDPを用いたロボットによる概念・語意の獲得 [Nakamura '12]

- モダリティの重みを様々に変更することで、多様な概念を獲得させた。



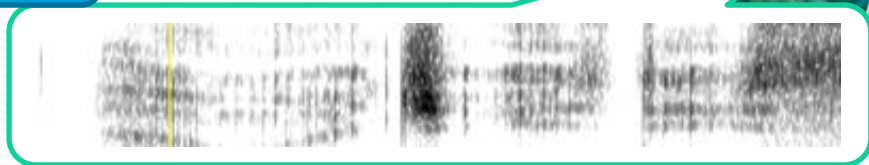
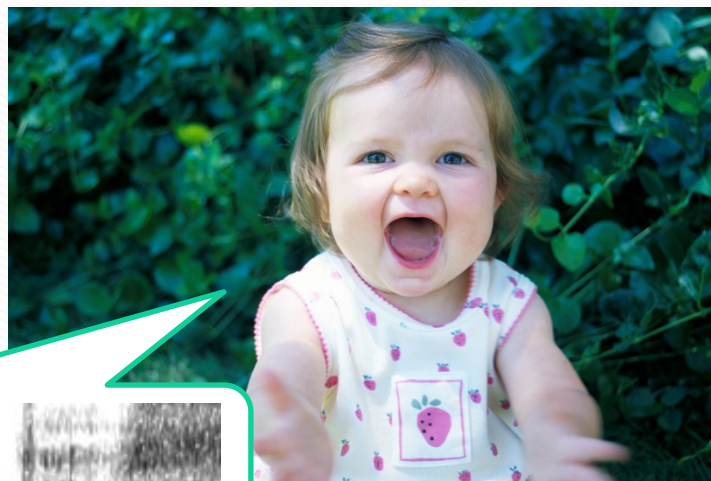
Contents

1. はじめに
2. 記号創発ロボティクス
3. マルチモーダルカテゴリ形成
4. 二重分節解析器
5. 教師なし語彙獲得
6. まとめ

人間の記号的・言語的知能を支える 二重分節解析器

- 二重分節構造を持つ時系列データを解析する能力、生成する能力を人間は持ち、その能力は音声言語以外にも広く用いられているのではないか？
 - 音声言語の生成と認識
 - 文字情報の生成と認識
 - 歌の学習と生成
 - 運動の模倣と生成
 - etc. etc. ...

作業仮説

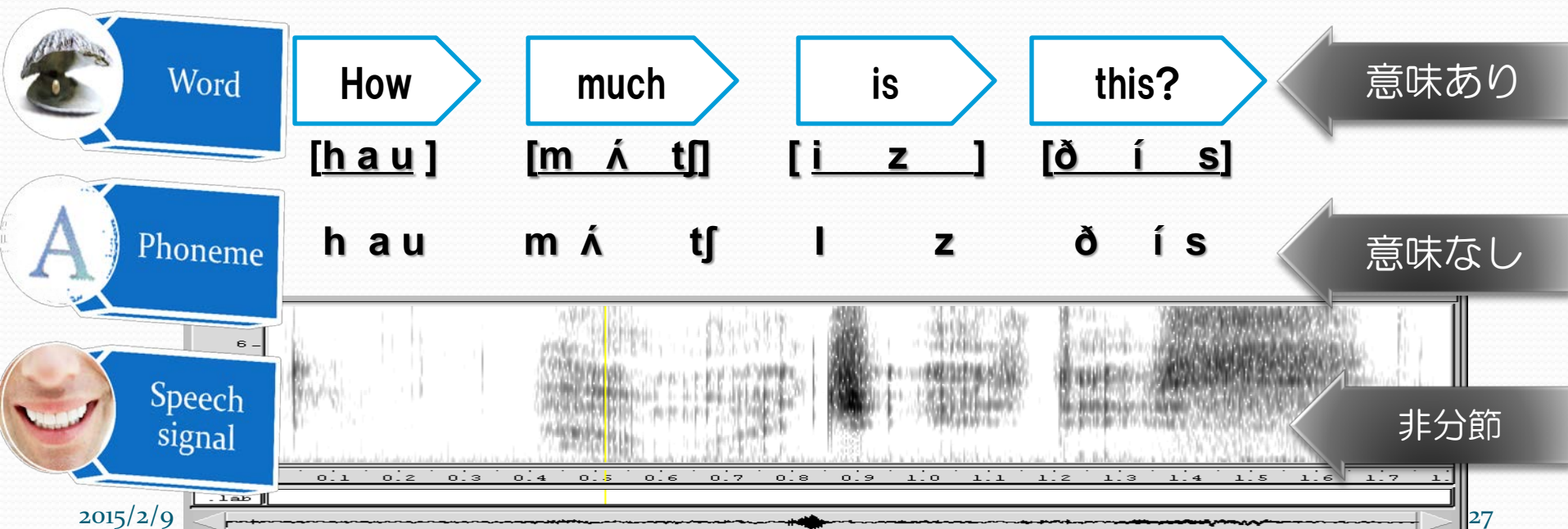


記号論における二重分節構造概念

(音声言語に含まれている構造)

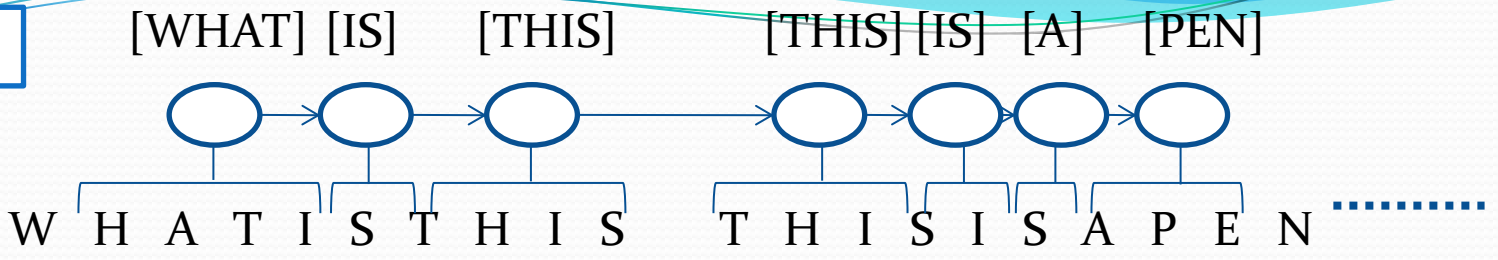
● 二重分節と意味のある分節

- 音声信号は高次の連続した時系列情報である。
- 音声信号は音素(phoneme)の系列として捉えられる。
- 人々は通常、音素には意味を与えず、ひとまとまりの音素列である単語(word)に意味を与える。

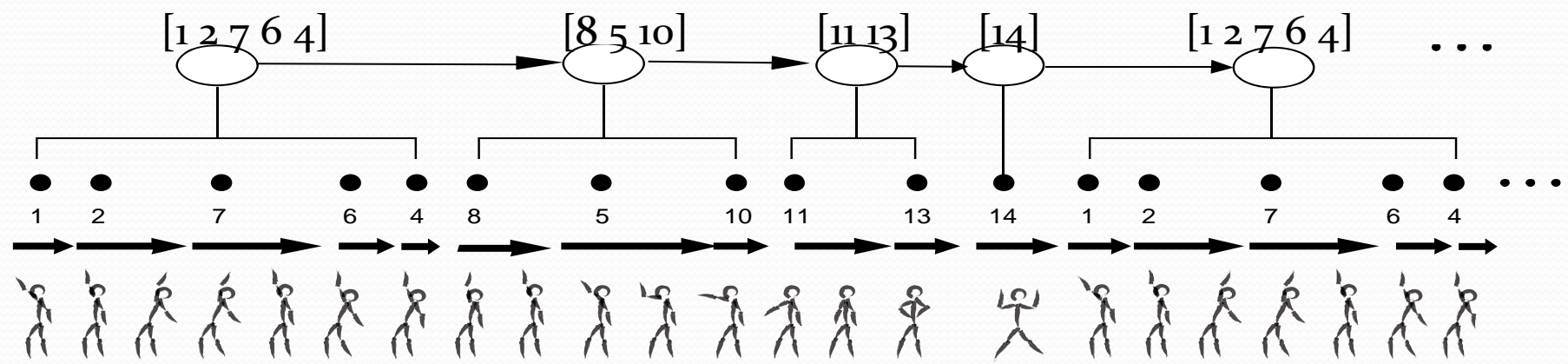
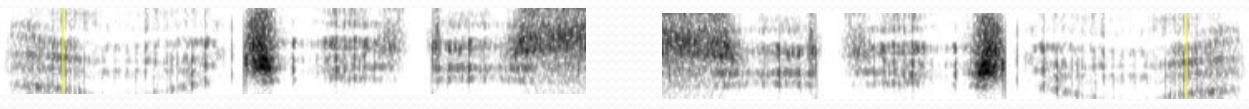


さまざまな隠れた二重分節構造

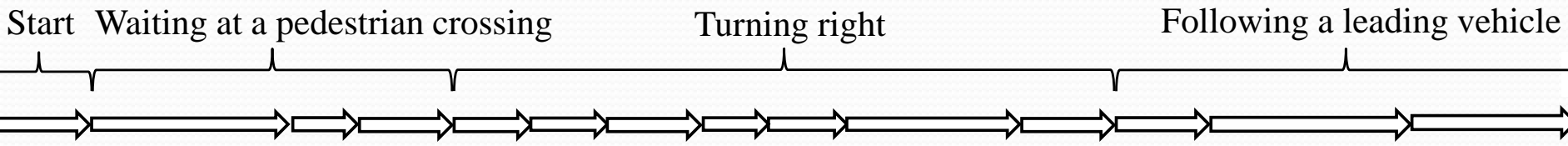
音声言語



身体動作



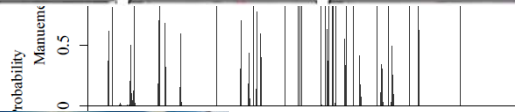
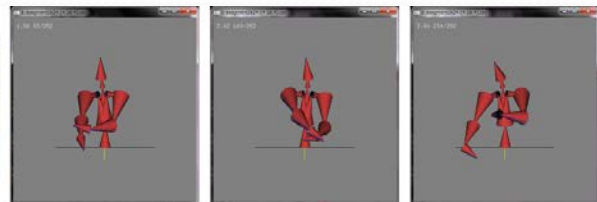
自動車運転挙動



二重分節解析器の応用

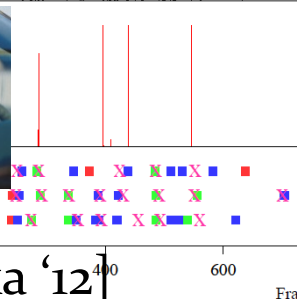
身体動作データ

- Imitation learning [Taniguchi '11]
- Motion segmentation [Taniguchi'11]

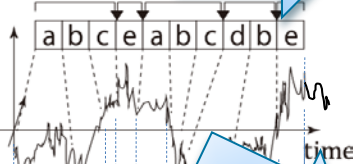


自動車運転挙動データ

- Extracting driving chunk [Nagasaka '12]
- Detecting intentional changing points [Takenaka '12]
- Prediction [Taniguchi '12]
- Video summarization [Takenaka '12]
- For topic modeling [Bando '13]



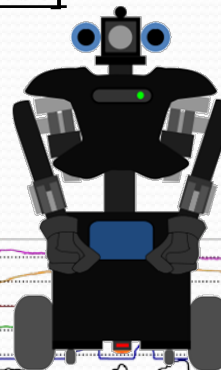
Language M



DAA

音声発話データ*

- Language acquisition [Araki '12][Nakamura '14]



collaborative work with DENSO co.

bottle !!

collaborative work with Nagai lab

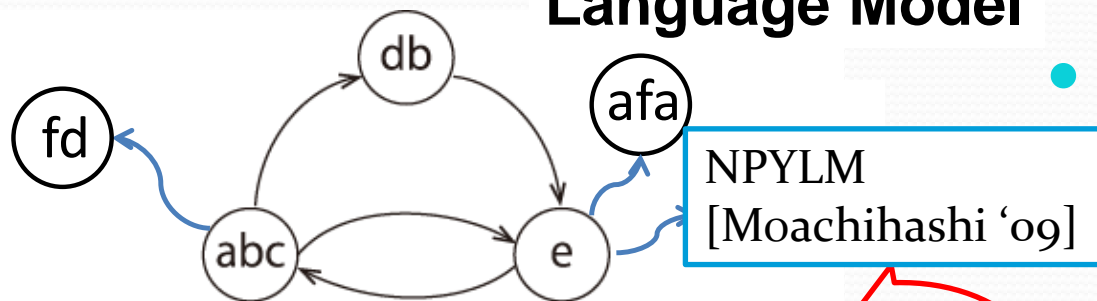


*Only NPYLM was used.
2015/2/9

二重分節解析器

Double Articulation Analyzer (DAA)

Language Model



教師なし学習

推定対象

- 言語モデル
- 出力分布
- 分節点とチャンク

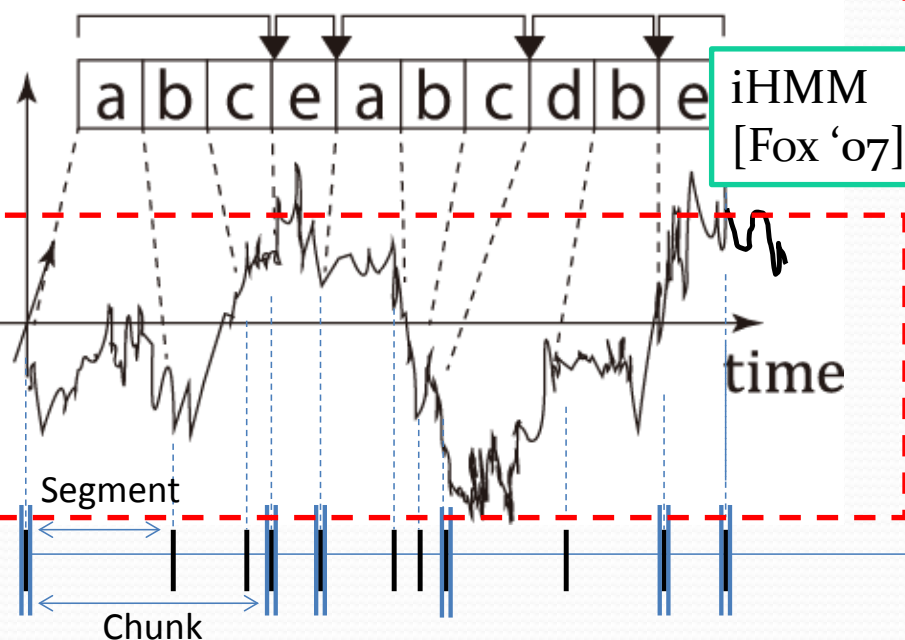
条件

- 単語数と文字数未知
- 出力分布パラメータ未知

推論

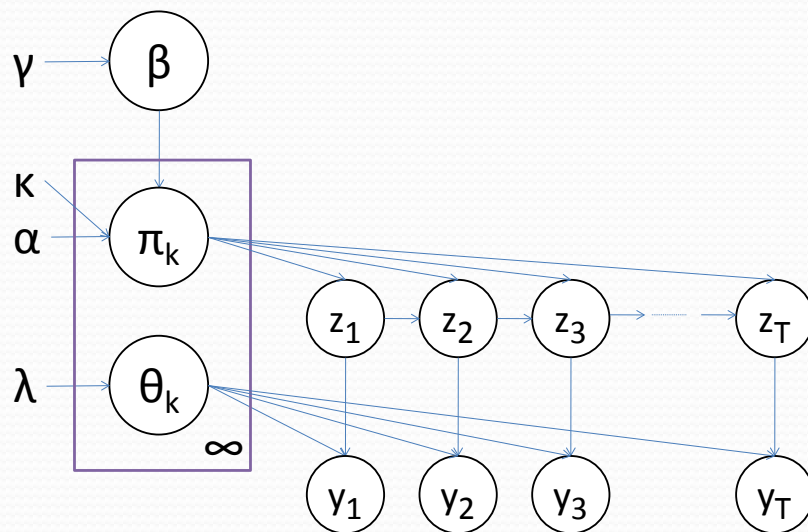
- 段階的な近似推論手法
[Taniguchi '11]

Nonparametric Bayesian approach



sticky HDP-HMM [Fox '07]

- 可変個(潜在的に無限個)の隠れ状態を持つHMM [Teh '06]
- 遷移行列を複数の多項分布と見なしてモデル化
- 基本的にergodic HMMとなる。
- 自己遷移確率を高くなるようにバイアスしたSticky Hierarchical Dirichlet Process-HMM (sticky HDP-HMM) を用いる。 [Fox '08]
- 出力分布に多次元ガウス分布を仮定する。



教師無し形態素解析

- 形態素解析

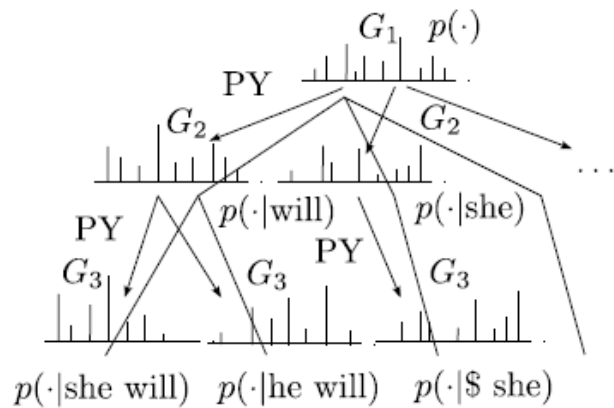
- 日本語のような単語間の区切りのない言語では、単語の切れ目を解析することが重要になる。「分かち書き」
- 離散文字列から言語モデルを作るためには、この形態素解析ができる必要がある。
- しかし、通常、形態素解析自体が「辞書」の存在を前提とする。鶏が先か卵が先か・・・

- 教師無し形態素解析

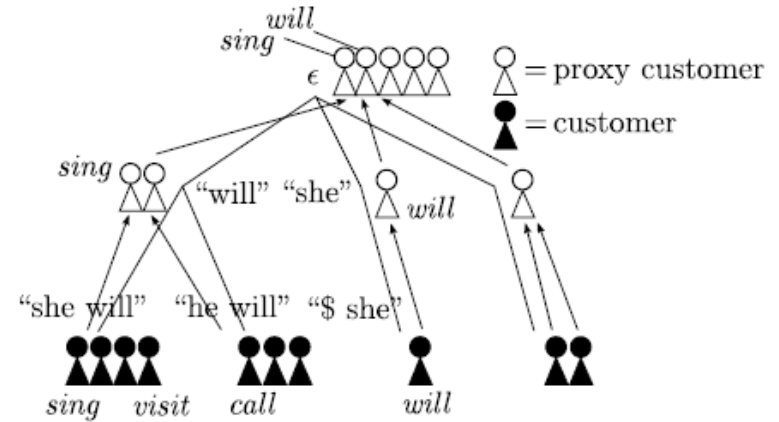
- 辞書を使わずN-gram統計量のみを用いて、未知のテキストから単語・キーワードを抽出する手法が開発されてきている。
 - 多くはヒューリスティック、もしくはMDLを基準にして計算量が重い。
- ンパラメトリックベイズ理論に基づく教師無し形態素解析 [Mochihashi '09]

NPYLM (Nested Pitman-Yor Language Model)

- 階層ディリクレ過程の拡張であるPitman-Yor過程によりスムージングを行い，単語Ngramモデル，文字Ngramモデルをiterativeに推論することで，教師無し形態素解析を実現した。
[Mochihashi '09]
- 完全にベイズ理論的な教師無し形態素解析



(a) Pitman-Yor 過程による， n グラム分布 G_n の階層的な生成.



(b) 等価なCRPを用いた表現. 学習データの各単語を「客」とみて，対応する文脈ノードに一つずつ追加していく.

“Alice in Wonderland”の解析



first, she dreamed of little Alice herself, and once again the tiny hands were clasped up on her knee, and the bright eager eyes were looking up into hers -- she could hear the very tones of her voice, and see that queer little toss of her head to keep back the wandering hair that would always get into her eyes -- and still as she listened, or seemed to listen, the whole place around her became alive the strange creatures of her little sister's dream. the long grass rustled at her feet as the white rabbit hurried by -- the frightened mouse splashed his way through the neighbouring pool -- she could hear the rattle of the tea cups as the March hare and his friends shared their never-ending meal, and the shrill voice of the queen...



first, she dream ed of little Alice herself ,and once again the tiny hand s were clasped upon her knee ,and the bright eager eyes were looking up into hers -- she could hear the very tone s of her voice , and see that queer little toss of her head to keep back the wandering hair that would always get into her eyes -- and still as she listened , or seemed to listen , the whole place a round her became alive the strange creatures of her little sister 's dream. the long grass rustled at her feet as the white rabbit hurried by -- the frightened mouse splashed his way through the neighbour ing pool -- she could hear the rattle of the tea cups as the March hare and his friends shared their never -ending me a l ,and the ...

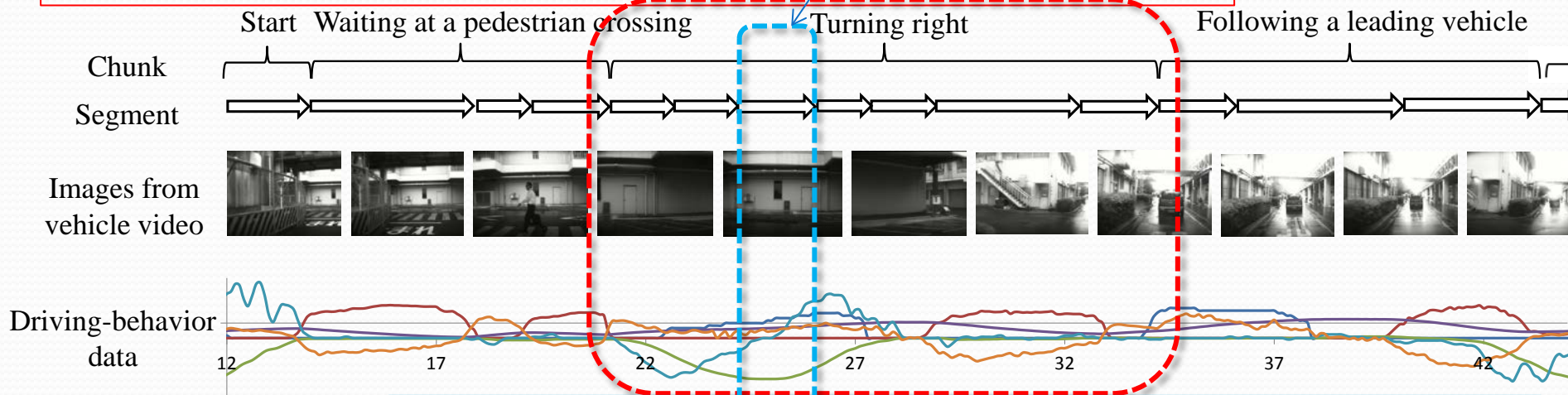
運転挙動データの二重分節解析



□ 二重分節構造

- ✓ 「交差点での右折」は単純に「ステアリングを右に回す」操作ではなく、複雑な操作の系列になっている。

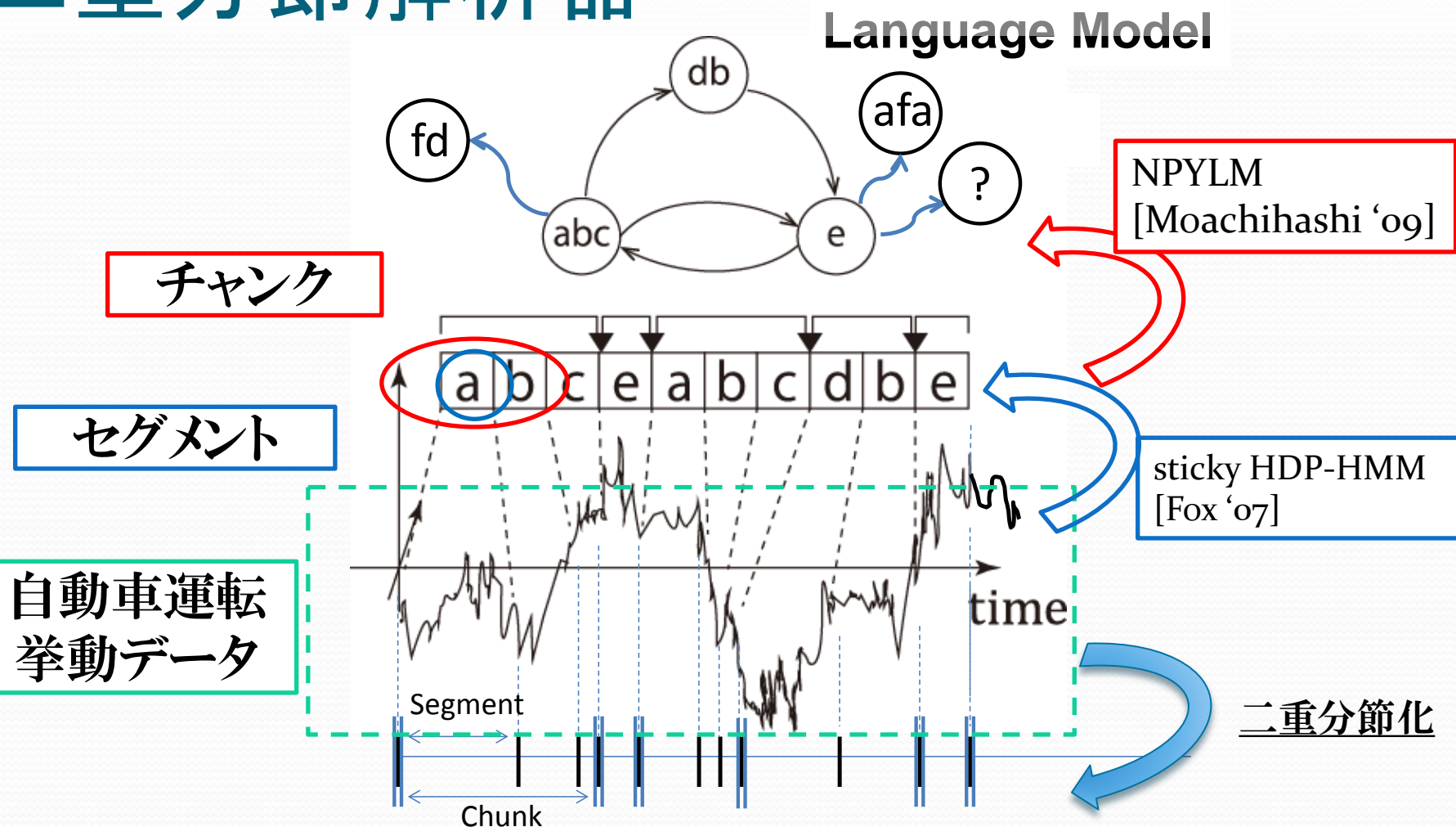
チャンク(Chunk): (セグメントの系列)
文脈的な情報としてまとまりのある運転行動の単位



セグメント(Segment):
物理的な情報としてまとまりのある運転行動の単位

潜在的な二重分節構造の推定

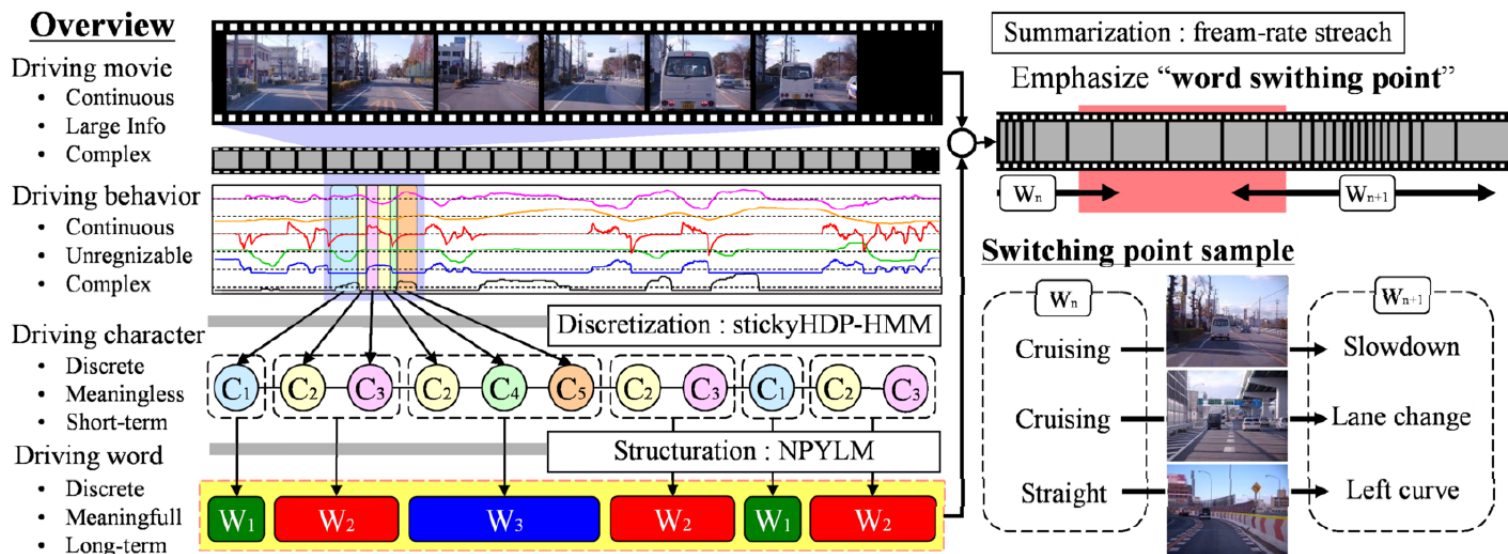
二重分節解析器



ランパラメトリックベイズ法に基づく教師なし学習手法

二重分節解析器を用いた ドライバ意図変化点の自動抽出

- 二重分節解析器により推定されたチャンクの切れ目が、人間により認識される運転行動文脈の変化点を上手く推定できることを示した[Takenaka '12a].
- また、ドライブレコーダーにより記録された運転動画の自動要約手法を提案した[Takenaka '12b].

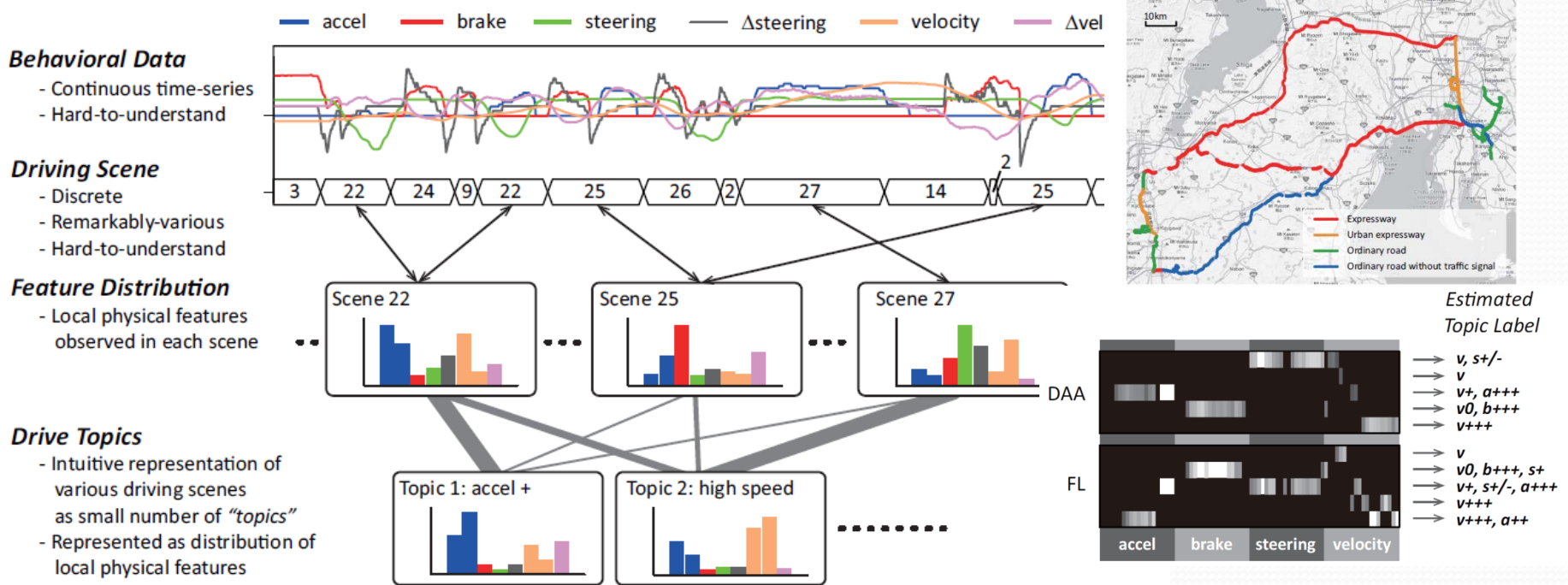


a) Kazuhito Takenaka, Takashi Bando, Shogo Nagasaka, **Tadahiro Taniguchi**, Kentarou Hitomi, Contextual Scene Segmentation of Driving Behavior based on Double Articulation Analyzer, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2012 (IROS 2012), 4847-4852 .(2012)

b) Kazuhito Takenaka, Takashi Bando, Shogo Nagasaka, **Tadahiro Taniguchi**, "Drive Video Summarization based on Double Articulation Structure of Driving Behavior", ACM multimedia 2012, [特許出願済み]

運転挙動データからのトピック抽出 [Bando '13]

- 二重分節解析器により分節化された運転行動のチャンクが運転行動について良いトピックのまとまりを持っていることを示した。

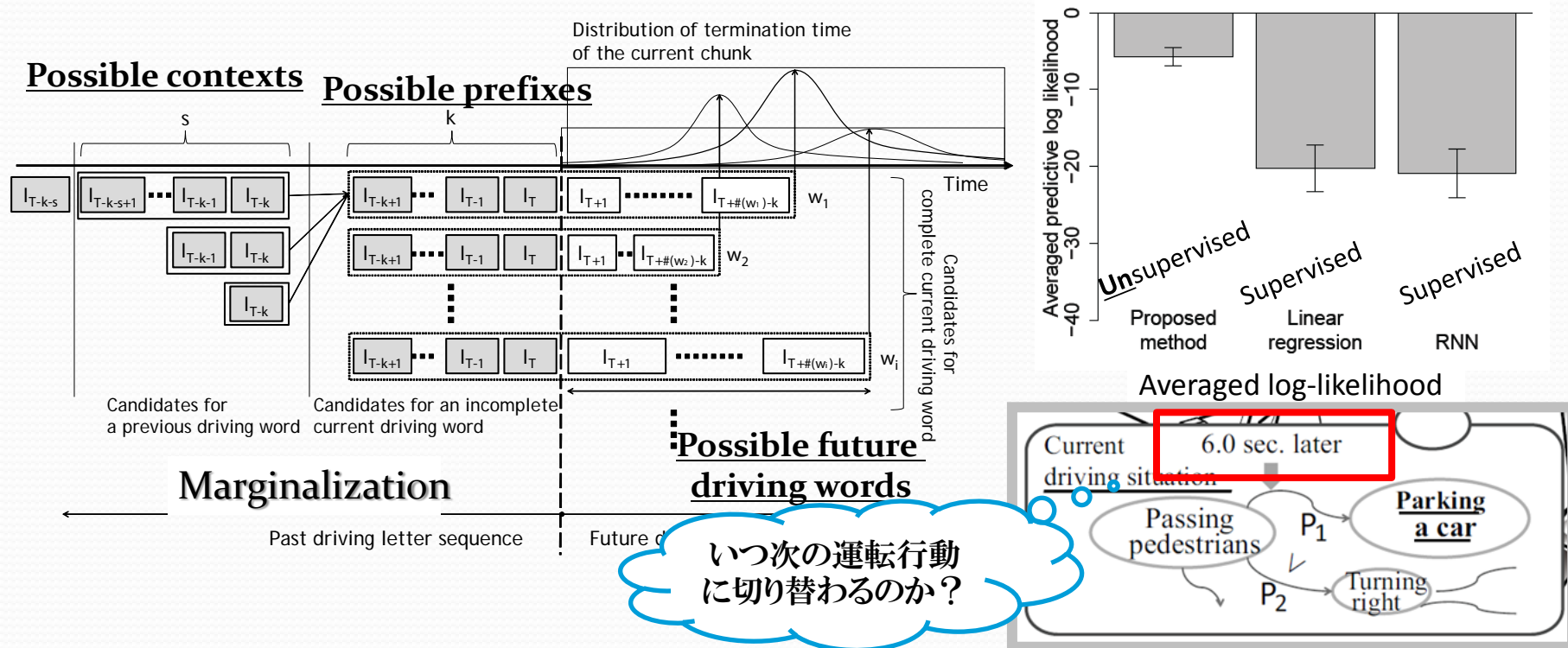


Takashi Bando, Kazuhito Takenaka, Shogo Nagasaka, Tadahiro Taniguchi,
 Unsupervised drive topic finding from driving behavioral data, 2013 IEEE Intelligent
 Vehicles Symposium, (2013) **IEEE-IV'13 Best poster paper award 1st prize**

運転行動変化タイミングの予測

[Nagasaka '14][Taniguchi '15]

- 今後の運転行動の可能性を確率的に考慮した上で現在の運転行動チャンクの終了時間を予測する手法を提案



S. Nagasaka, **T. Taniguchi**, K. Hitomi, K. Takenaka and T. Bando, "Prediction of Next Contextual Changing Point of Driving Behavior Using Unsupervised Bayesian Double Articulation Analyzer", IEEE Intelligent Vehicles Symposium. (2014) (**oral: acceptance ratio 6%**).

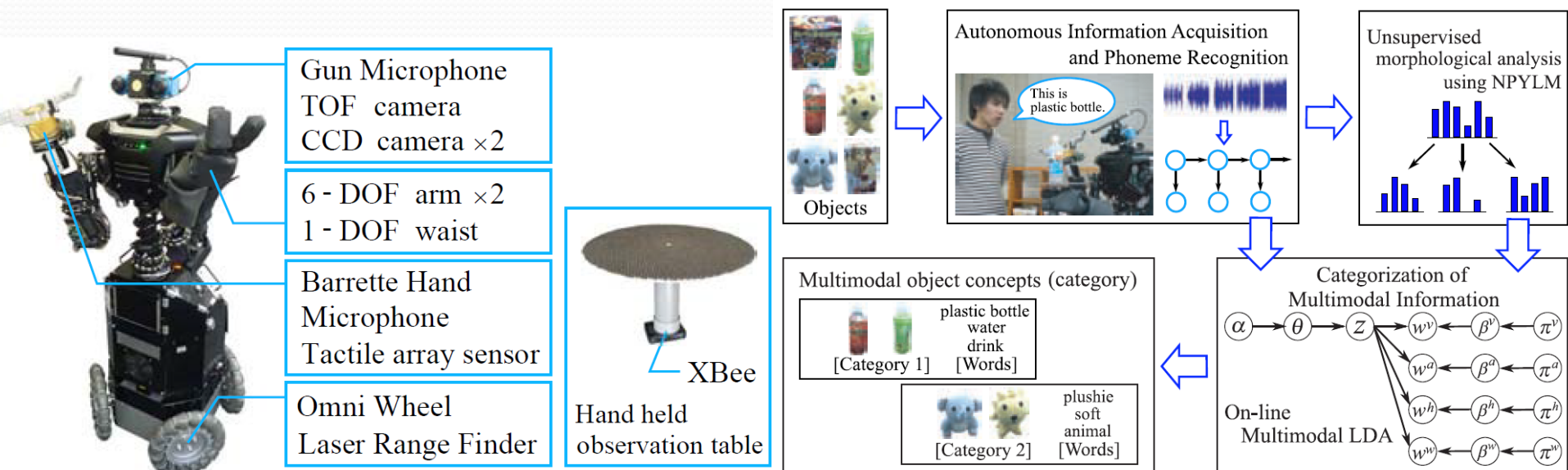
Tadahiro Taniguchi, Shogo Nagasaka, Kentaro Hitomi, Kazuhito Takenaka, and Takashi Bando
 Unsupervised Hierarchical Modeling of Driving Behavior and Prediction of Contextual Changing Points, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. (to appear)

Contents

1. はじめに
2. 記号創発ロボティクス
3. マルチモーダルカテゴリ形成
4. 二重分節解析器
5. 教師なし語彙獲得
6. まとめ

Online Learning of Concepts and Words Using Multimodal LDA and Hierarchical Pitman-Yor Language Model [Araki '12]

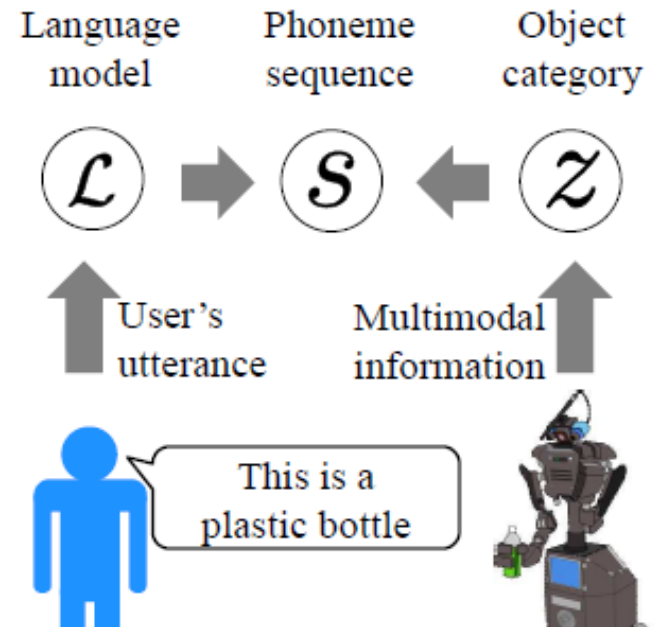
- マルチモーダルカテゴリゼーションにより形成した物体概念と教師なし形態素解析を結合した言語獲得



MLDAとNPYLMを用いた物体概念と言語モデルの相互学習 [Nakamura '14]

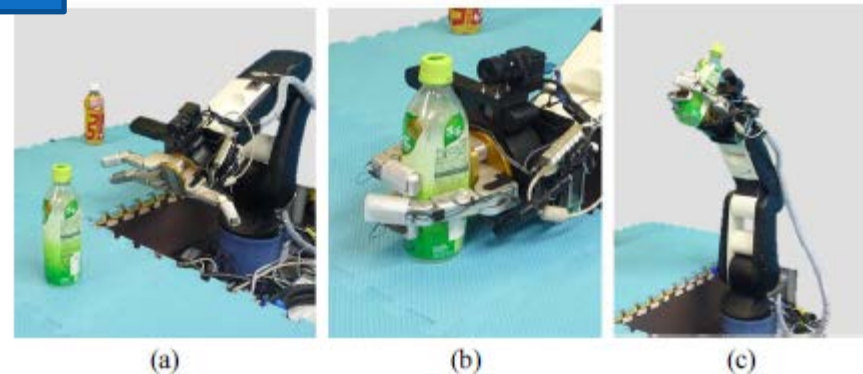
- マルチモーダルカテゴリの情報を用いて教師なし形態素解析(言語モデル学習)の精度向上
- 語彙学習による物体カテゴリ形成の高精度化

語彙と概念の相互学習(教師なし学習)による非分節連続音声とマルチモーダル情報からの実世界に接地された語彙獲得



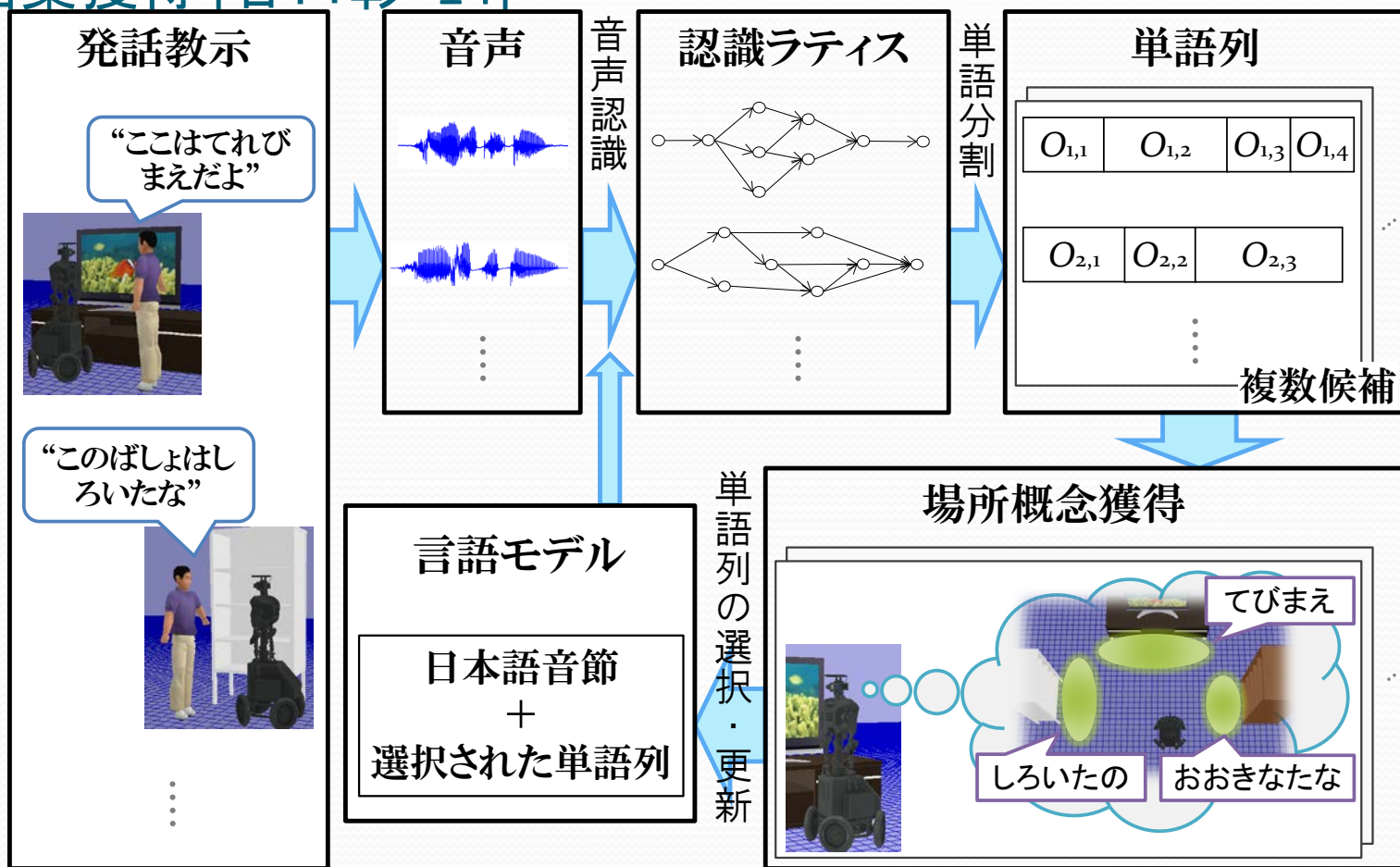
Tomoaki Nakamura, Takayuki Nagai, Kotaro Funakoshi, Shogo Nagasaka, Tadahiro Taniguchi and Naoto Iwahashi, Mutual Learning of an Object Concept and Language Model Based on MLDA and NPYLM, 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'14), 600 - 607 .(2014)

2015/2/9



自己位置推定と語彙獲得の統合

場所概念と言語モデルの相互推定によるロボットの場所に関する語彙獲得 [谷口彰 '14]



谷口彰, 吉崎陽紀, 稲邑哲也, 谷口忠大, 自己位置と場所概念の同時推定に関する研究, システム制御情報学会論文誌, Vol.27 (4), pp.166-177 .(2014)

谷口彰, 稲邑哲也, 谷口忠大, 場所概念と言語モデルの相互推定によるロボットの場所に関する語彙獲得, 第32回 日本ロボット学会学術講演会 .(2014)

Contents

1. はじめに
2. 記号創発ロボティクス
3. マルチモーダルカテゴリ形成
4. 二重分節解析器
5. 教師なし語彙獲得
6. まとめ

記号創発ロボティクスは・・・

× 記号を創発させる研究をする。

○ 記号系が創発的な存在であることを認めた上で、それを支える認知・運動・言語の学習機構について研究を行う。

Keywords for Symbol Emergence in Robotics

- マルチモーダル対話 相互信念モデル / コンテキストに依存した意味処理 / 言語・運動・画像の統一的処理
- 概念獲得 予測モデルと概念分化 / 身体性依存の概念形成 / マルチモーダル概念獲得 / 概念獲得とバイアス
- 言語獲得と発達 教師なし形態素解析 / 教師なし音韻獲得 / 未知語の学習
- 対話戦略 対話戦略の能動学習 / ターンテイクの学習 / 発話生成 / 自然文生成
- 動作や行為の学習 非分節動作からの模倣学習 / 行為の汎化 / 運動と言語の相互変換 / 大規模の動作データの学習
- コミュニケーション・記号過程の創発 サインの自己組織化 / コミュニケーションの創発 / 言語の超越性 / 比喩・オノマトペ

記号創発システムの 計算知能による表現可能性

- 20世紀： 不確実性，言語を操る情報技術の不足
 - '90年代までの人工知能と認知科学の歴史は足りない道具と共に歩んだ道。
- 21世紀： 革命の素地
 - 現実の知能が扱う程度に複雑な大量データ，リッチな計算資源
 - WEB, クラウド, 安価なセンサ, 広大なメモリ空間, 計算資源
 - 確率的情報処理の進化：
 - ベイズ理論 (グラフィカルモデル, ノンパラメトリックベイズ理論), マルコフ連鎖モンテカルロ法, など
 - 安価で統合的なオープンソース知能情報処理環境の充実
 - OPEN-CV, JULIUS, 各種Google API, ROS, など

記号創発ロボティクスは、もはや極めて現実的な研究分野

記号創発ロボティクスの狙い

- 言語獲得を始め不確実性を含んだ環境下での知能発達のダイナミクスの記述のためには「自然言語」では不足。
- 確率モデル, ダイナミカルシステムを含んだ数理的・計算論的な「実際に動作する」記述様式が必要。
 - ✓ 種々の実験結果を統一的に議論する際にも。
- 「実際に言語が獲得できる」, 「実世界で活動できる」モデルを提供することは, 知能理解への大きな示唆となる。

「形式的な言語」を操れるだけでは「現実世界の言語」(接地された言語)の理解としては片手落ち

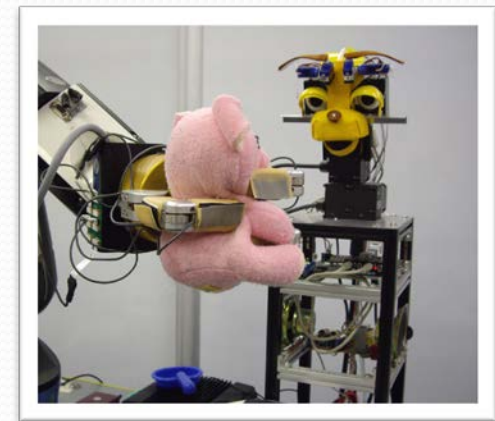
記号創発ロボティクス

- 記号を操る知能への2つの「構成」
- 構成論的アプローチ (constructive approach)
 - 知能を構成することによって理解する。
- 構成主義 (constructivism)
 - 世界を構成する知能を理解する。

モデルを通じた理解

構成論的アプローチの役割

1. 不可能性の反証 (可能性の証明)
2. 理解するためのモデルの提供
3. 科学的実験のための仮説の示唆

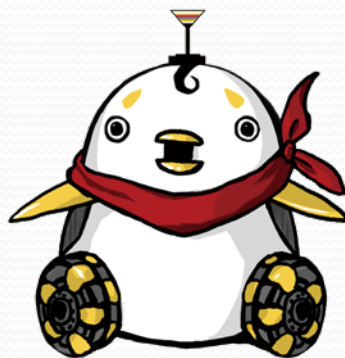


(c) 電通大 長井研究室

まとめ

- 記号創発システムについて説明した。
- 記号創発ロボティクスという研究分野について紹介した。
- 研究事例として、マルチモーダルカテゴリーゼーション、二重分節解析、教師なし語彙獲得に関する研究について紹介した。

We still have a long way to go....



Information



Special Thanks

- 立命館大学
 - 長坂翔吾, 谷口彰, 濱畑慶太
- 電気通信大学
 - 長井隆行, 中村友昭, 荒木孝弥, 安藤美記
- DENSO
 - 坂東誉司, 竹中一仁, 人見謙太郎
- 岡山県立大学
 - 岩橋直人
- 京都大学
 - 榎木哲夫 ※学生は在学時の所属
- その他
 - 肩に乗らせてくれた巨人の皆様
 - 研究費を支援いただいた各団体

twitter: @tanichu

mail: taniguchi@ci.ritsumeai.ac.jp

- 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「イラストで学ぶ人工知能概論」(講談社)2014



谷口研では以下を募集しています。

- 博士前期・後期課程学生
- 研究員

詳しくはメールでご相談。