

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：62603

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03295

研究課題名（和文）運動の統計的理解と動力学に基づく適応的確率ロボティクス

研究課題名（英文）Adaptive Probabilistic Robotics through Statistical Motion Analysis and Kinematics

研究代表者

持橋 大地（Mochihashi, Daichi）

統計数理研究所・数理・推論研究系・准教授

研究者番号：80418508

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,700,000円

研究成果の概要（和文）：ロボットの動作のモデル化、および自然言語処理との接続の二つを大きな柱として研究を行った。ロボットの動作については、隠れセミマルコフモデルとガウス過程による動作の分節化を、高次元の観測値に対して行うためにVAEで潜在空間に圧縮して行うHVGHを開発し、分節化に基づくインタラクションのモデル化や、動物学への応用などの研究展開を行った。

自然言語処理の面では、従来適切なモデル化が難しかった副詞をモデル化する、カーネルで定義される関数空間でのトピックモデルを開発した。これらを背景に、講談社から教科書『ガウス過程と機械学習』を出版し、1万部を超える読者を獲得してガウス過程の普及にも貢献することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発した技術は、ロボットや人間の動作の「形態素解析」にあたる基礎的な研究であり、これにより連続的な動作時系列を単語を数えるように統計的に分析することが可能になった。特に、観測値が各関節角で高次元な場合でも扱えるHVGHを開発したことで、潜在空間での分節化が行えるようになったことは、統計モデルとしても重要な進歩であるといえる。

また、副詞はロボットとのインタラクションで重要な働きをすると予想されるが、従来の自然言語処理では適切に扱うことが難しかった。本研究により関数空間のトピックモデルとして統計モデル化できたことで、「慎重に運んで」「さっと拭いて」などの、より適切な動作が可能なロボットに繋がる。

研究成果の概要（英文）：We conducted research with (a) statistical modeling of motions, and (b) statistical connection to natural language processing. As to (a), we extended motion segmentation with Gaussian processes for high-dimensional observations by conducting segmentation in a latent space induced by VAE, named HVGH. This research appeared at an international top conference of robotics (IROS) and an international journal.

As to (b), we developed a statistical model to explain adverbs that have been difficult to deal with in ordinary natural language processing. By learning a topic model on the space of functions induced by kernels, we succeeded to connect adverbs with associated motions toward adverb-driven motion generation.

During this research, the principal investigator authored a textbook "Gaussian processes and Machine Learning" from Kodansha, which sold over 10K copies to make Gaussian processes reachable to general audiences in machine learning.

研究分野：自然言語処理・機械学習

キーワード：ロボティクス 自然言語処理 分節化 ガウス過程 微分方程式

1. 研究開始当初の背景

これまでロボティクスの分野では、用途が限定された産業用ロボットの技術が進んできた。しかし、人工知能の技術革新に伴って、家庭や施設など人間のそばで共生し、生活を支援するホームロボティクスの重要性が高まっている。こうしたロボットは産業用ロボットのように一定の環境の下で決まった課題を遂行するのではなく、その場や文脈に応じて、また女性や子供、老人、被介護者のような対象者に応じて、適応的で柔軟な動作を行えることが必要となる。

ロボティクス分野では今まで、人間が事前に設計した「取る」「置く」といった有限の動作のみが対象となっており、複数の動作を文脈に応じて柔軟に変える方法は考慮されていなかった。これは主に、人間やロボットが持つ連続的な運動データから「動作」を抽出する技術がなかったことに起因している。しかし、われわれは、H26-28 年度科研費基盤 (B) において、図 1・図 2 のように数次元の角度の時系列を教師なしで「動作」に分割することに成功した [Nakamura+2016]。これは動作の前後関係も考慮した、動的計画法とベイズ推定による高精度な確率モデルである。こうして運動データから「動作」が認識できるとき、上述の適応的なロボティクスのためには、

1. 人間には実際にどのような「動作」があるのか、

2. 「動作」にはどのような個人差や、文脈による違いがあるのか

を俯瞰的・統計的に把握し、ロボットに適切に反映させることが必要となる。

またこの際、物理世界においてその動作を実現するためには、幾何学や力学といったこれまでの機械工学に基づくロボティクスの成果を踏まえ、また実世界からのフィードバックを反映しなければならぬ。すなわち、

3. 情報としての知能ロボティクスと、物理的なロボティクス理論を架橋する

必要がある。

これらにより、ロボットが想定外の動作をすることを未然に防ぎ、ロボットに行うべき「振る舞い」を学習させることができる。さらに、人間はこうした動作の構造を言葉によって把握している。たとえば「サクサクと」切る、「のびのびと」動くといった場合、我々はある一定の性質を持った動作を想像することができる。

こうした言葉と動作の間の関係を統計モデルとして表せば、「もっと慎重に運んで」というように、ロボットの動作を言葉で制御することができる。また逆に、自然言語処理の観点からは今まで、上記の「のびのびと」といった言葉が実際に何を意味しているのかを表すことが不可能であった。ロボティクスと結びつくことでこれが初めて可能となり、動作を言葉で表すだけでなく、言葉から動作を生成することが可能になる。このための統計モデルを、ガウス過程による角度ベクトルのモデル化を拡張することなどによって実現する。

2. 研究の目的

本研究は、人間が無意識に行っている「動作」の全容を明らかにし、ロボティクスへとフィードバックする世界で初めての試みである。技術的には、谷口らの二重分節解析器 [Taniguchi+2012] のように離散化を経由せず、ガウス過程から生成される連続的な関数によって動作を分節化することが特色である。これにより、逆に動作を生成することも可能になる。このとき、真の自由度は観測次元よりはるかに低いため、次元圧縮された潜在空間で分節化を行うよう、次元圧縮との同時学習を行う。このとき、動力学的制約も同時に考慮する。また、ロボティクスに方向統計学を初めて導入することにより、高次元の角度時系列をより適切に扱える新たな方法論を開拓する。こうして得られた「動作」を無限次元確率モデルで構造化することで、「動作」の認識もさらに高精度になる。さらに、言語と動作の間の変換と制御を可能にする統計モデルを開発する。これはニューラルネットのようなブラックボックスではなく、ガウス過程やモンテカルロ木探索 (MCTS) 法といった確率モデルによる点、教師なし学習された自然な「動作」に基づいている点が従来と異なる。これらを個人化・文脈化することは確率的な手法なしでは不可能である。また例えば舞踊芸術学においては、身体動作が多数データ化されているものの、「動作」への分解ができずに研究の進展が阻まれている。本申請はロボティクスだけでなく、芸術学や身体運動科学、動物学等においてもブレークスルーとなる基礎技術となる。

3. 研究の方法

上記の認識に基づき、主に次の二つの分野を中心に研究を行った。

(A) 高次元角度時系列を分節化する新しい統計モデル (H30-32 年度) [持橋・中村が担当] 上でみたように、われわれは [Nakamura+2016] において、低次元の場合について角度時系列を分節化し、角度の時系列のみから、統計的に「動作」を学習する方法を開発した。ただし、実際の間人間的なロボットの関節角ベクトルは数十次元を容易に超え、これらを独立に扱うことは困難で

ある。そこで本研究では、角度ベクトルの分節化を真の自由度を持つ潜在変数の次元で行う、すなわち次元圧縮と分節化を同時に学習する統計モデルを開発する。主に統計面を持橋、ロボティクス面を中村・長井が分担して研究を進める。

(D) 動作と言葉の相互写像による、言葉による動作の表現と制御 (H30-31 年度)[小林・持橋] 人間は動作を文で表現することができ、二者の関係をとらえる多数の研究がある。しかし、これまで「動作」の単位が明確でなかったために、どの言葉が観測値のどの部分と対応するかは曖昧であり、対象は人間が準備した短い運動データに限られていた。より自然な、長い時系列について教師なし学習された「動作」と言葉を対応付ける本研究では、ロボティクスの学習データを劇的に増やすことができ、大きなインパクトがある。具体的には、本研究では

- ・ 教師なし学習された「動作」をベースにした、教師なしアライメント
- ・ 再帰的ニューラルネット LSTM とアテンション機構を用いた、角度時系列の直接生成モデルの両方を検討する。これにより、各文のそれぞれの言葉がどの動作にあたるのかが統計的に結びつけられることになる。本研究は小林のこれまでの研究の継続・高度化であり、持橋がアドバイスをを行う。また、言葉に対応する動作がわかれば、(C) で述べた動作を変調する確率モデルを言葉と結びつけられる。これにより、ロボットへの指示として“もっと慎重に運んで”、“ざっくり切って”のように動作が言葉で制御可能となる。

4. 研究成果

主な研究成果の一部を、簡潔に紹介する。詳しくは、発表文献を参照されたい。図1のように、潜在空間で動作の分節化を行う HVGH は、複雑で高次元の分節化を可能にした。図2に示したように、このモデルは通常の HMM やデータ工学分野で提案された Autoplait 等に比べ、真の分割を教師なしで非常に正確に学習することができる。

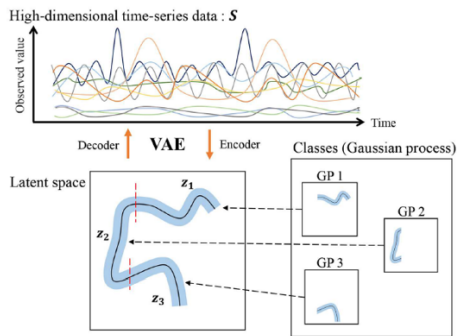


図 1

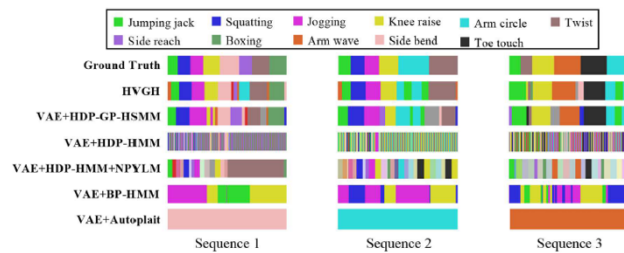


図 2

また、ガウス過程に基づく副詞の学習においては、図3のようにスペクトル混合 LDA とよぶ統計モデルを開発し、これにより図3右のように、関数空間での潜在的な周波数の分布と副詞を結び付けることで、動作からそれに適した副詞を生成することが可能になった。今後は、この逆の過程を行うことを計画している。

4. Spectral Mixture LDA

X ... 周波数情報
 W ... 副詞情報
 Q ... 周波数情報の次元
 M ... 周波数情報数
 N ... 副詞情報数
 K ... トピック数
 μ ... ガウス分布の平均
 Σ ... ガウス分布の分散
 D ... 動画数

副詞についてのサンプリング式

$$p(z_{dm} = k | W, X, Z, Y, \alpha, \beta, \gamma) \propto (Q * N_{dk} + \sum_{q=1}^Q M_{dk}^q + \alpha) \frac{N_{kw} + \beta}{N_{k, dn} + \beta V}$$

周波数についてのサンプリング式

$$p(y_{dm}^q = k | W, X, Z, Y, \alpha, \beta, \gamma) \propto \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_k^q}} \exp\left(-\frac{(x_{dm} - \mu_k^q)^2}{2(\sigma_k^q)^2}\right) \frac{N_{dk} + M_{dk}^q + \alpha}{N_d + M_d^q - 1 + \alpha K}$$

α の更新式

$$\alpha^{new} = \alpha \frac{\sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K \Psi(Q * N_{dk} + \sum_{q=1}^Q M_{dk}^q) - DK \Psi(\alpha)}{K \sum_{d=1}^D \Psi(Q * N_d + \sum_{q=1}^Q M_d^q + \alpha K) - DK \Psi(\alpha K)}$$

学習した $\mu_{(k \times q)}$ と $\sigma_{(k \times q)}$ を用いて描画したガウス分布

周波数を用いて副詞を生成

副詞	予測確率
ごちなく	0.056
痛そうに	0.054
不自然に	0.048
ゆっくり	0.036
ふざけて	0.035

評価用動画 推定された θ

6. まとめと今後の課題

まとめ SMLDAにより人の動作特徴から、副詞の意味を捉えることができた

課題 SMLDAを用いた副詞からの動作生成の実現

図 3

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 木村大河, 長野匡隼, 中村友昭	4. 巻 -
2. 論文標題 MC-GP-HSMMを用いたマルチモーダル情報の分節化によるインタラクションのルール学習	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 (採録決定)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Masatoshi Nagano, Tomoaki Nakamura, Takayuki Nagai, Daichi Mochihashi, Ichiro Kobayashi, Wataru Takano	4. 巻 6
2. 論文標題 HVGH: Unsupervised Segmentation for High-dimensional Time Series Using Deep Neural Compression and Statistical Generative Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Robotics and AI	6. 最初と最後の頁 115-115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/frobt.2019.00115	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 T. Taniguchi, D. Mochihashi, T. Nagai, S. Uchida, N. Inoue, I. Kobayashi, T. Nakamura, Y. Hagiwara, N. Iwahashi, T. Inamura	4. 巻 33
2. 論文標題 Survey on frontiers on language and robotics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 700-730
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2019.1632223	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 濱園侑美, 小林一郎, 麻生英樹, 中村友昭, 長井隆行, 持橋大地	4. 巻 32
2. 論文標題 ヒューマノイドロボットを用いた言語理解による動作生成	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 知能と情報 (日本知能情報ファジィ学会誌)	6. 最初と最後の頁 632-642
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3156/jssoft.32.1_632	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wataru Takano, Taro Takahashi, Yoshihiko Nakamura	4. 巻 -
2. 論文標題 Sequential Monte Carlo Controller that Integrates Physical Consistency and Motion Knowledge	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Autonomous Robots	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10514-018-9815-1	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masatoshi Nagano, Tomoaki Nakamura, Takayuki Nagai, Daichi Mochihashi, Ichiro Kobayashi, Masahide Kaneko	4. 巻 0
2. 論文標題 Sequence Pattern Extraction by Segmenting Time Series Data Using GP-HSMM with Hierarchical Dirichlet Process	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IROS 2018	6. 最初と最後の頁 4067-4074
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 谷口巴, 持橋大地, 長野匡隼, 中村友昭, 長井隆行, 高野渉, 小林一郎
2. 発表標題 スペクトル混合カーネルとガウス過程に基づく動画からの副詞の意味理解
3. 学会等名 言語処理学会2021 P6-17
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長野匡隼, 中村友昭, 長井隆行, 持橋大地, 小林一郎, 高野渉
2. 発表標題 畳み込み変分オートエンコーダとガウス過程に基づく動画画像の分節化
3. 学会等名 人工知能学会全国大会 2J3-GS-8b-01
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村大河, 長野匡隼, 中村友昭
2. 発表標題 MC-GP-HSMMを用いたマルチモーダル情報の分節化によるインタラクションのルール学習
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会, 1C2-04
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷口巴, 長野匡隼, 持橋大地, 中村友昭, 高野渉, 長井隆行, 小林一郎
2. 発表標題 Spectral Mixture Kernelを用いた動作を表す副詞の意味理解へ向けた取り組み
3. 学会等名 人工知能学会全国大会, 1Q5-GS-11-02
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 持橋大地
2. 発表標題 ガウス過程と自然言語処理
3. 学会等名 言語処理学会2021 チュートリアルT1 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masatoshi Nagano, Tomoaki Nakamura, Takayuki Nagai, Daichi Mochihashi, Ichiro Kobayashi, Wataru Takano
2. 発表標題 High-dimensional Motion Segmentation by Variational Autoencoder and Gaussian Processes
3. 学会等名 IROS 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長野匡隼, 中村友昭, 長井隆行, 持橋大地, 小林一郎, 高野渉
2. 発表標題 HVGH: 高次元時系列データの深層圧縮と教師なし分節化
3. 学会等名 2019年度人工知能学会全国大会 1L3-J-11-01
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三村喬生, 中村友昭 松本惇平, 西条寿夫, 須原哲也, 持橋大地, 南本敬史
2. 発表標題 壺長類における身体動作時系列の分節推移構造推定
3. 学会等名 2019年度人工知能学会全国大会 1C4-J-3-01
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daichi Mochihashi
2. 発表標題 High-dimensional motion segmentation with semi-Markov Latent Gaussian Processes
3. 学会等名 ISBA East Asian Chapter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daichi Mochihashi
2. 発表標題 Gaussian processes for recognizing Motions in robots
3. 学会等名 計測自動制御学会 SICE 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daichi Mochihashi
2. 発表標題 Gaussian Process Generative Models for Language and Robotics
3. 学会等名 CoRL 2019 Tutorial (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daichi Mochihashi
2. 発表標題 High-dimensional motion segmentation with semi-Markov Latent Gaussian processes
3. 学会等名 University of Bristol, Jean Golding Institute, "High Dimensional and Bayesian Inference toward Quantifying Real-World Uncertainties" Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長野匡隼, 中村友昭, 長井隆行, 持橋大地, 小林一郎, 高野渉, 金子正秀
2. 発表標題 VAEとガウス過程による高次元データの圧縮と同時分節化
3. 学会等名 情報論的学習理論ワークショップ, D1-24
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長野匡隼, 中村友昭, 長井隆行, 持橋大地, 小林一郎, 金子 正秀
2. 発表標題 ノンパラメトリックベイズ法に基づく時系列データの分節化
3. 学会等名 人工知能学会全国大会, 2G4-04
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長野匡隼, 中村友昭, 長井隆行, 持橋大地, 小林一郎, 金子正秀
2. 発表標題 階層ディリクレ過程による動作クラス数推定を導入したGP-HSMMによる連続動作からの基本動作抽出
3. 学会等名 情報処理学会全国大会, 6M-03
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 持橋大地, 大羽成征	4. 発行年 2019年
2. 出版社 講談社サイエンティフィク	5. 総ページ数 256
3. 書名 ガウス過程と機械学習	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高野 渉 (Takano Wataru) (30512090)	大阪大学・数理・データ科学教育研究センター・特任教授 (常勤) (14401)	
研究分担者	中村 友昭 (Nakamura Tomoaki) (50723623)	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授 (12612)	
研究分担者	小林 一郎 (Kobayashi Ichiro) (60281440)	お茶の水女子大学・基幹研究院・教授 (12611)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------