

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：38005

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2016～2020

課題番号：16H06563

研究課題名（和文）多階層表現学習の数理基盤と神経機構の解明

研究課題名（英文）Elucidation of the Mathematical Basis and Neural Mechanisms of Multi-layer Representation Learning

研究代表者

銅谷 賢治（Doya, Kenji）

沖縄科学技術大学院大学・神経計算ユニット・教授

研究者番号：80188846

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 69,110,000円

研究成果の概要（和文）：脳にならった新たな人工知能の開発と、人工知能の理論や手法による脳科学の進展という領域のねらいに沿って研究を進めた。よりデータ効率の良い強化学習アルゴリズムの開発と、深層強化学習アルゴリズムのデータ効率の理論解析を行った。知覚推論や強化学習に関わる大脳皮質と大脳基底核の情報表現の解明を進めた。セロトニンニューロンの活性化による遅延報酬に対する意欲の亢進は、報酬獲得の確実性とそのタイミングの不確実性に依存することを明らかにし、その特性を再現する新たなベイズ意思決定モデルの提案を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脳にならった新たな人工知能の開発と、人工知能の理論や手法による脳科学の進展という領域のねらいの具現化をめざし、限られた経験から効率よく行動学習を行う強化学習アルゴリズムの開発と、その性能を予測する理論の構築を行った。また、知覚推論や強化学習に関わる情報の大脳皮質と大脳基底核における表現を明らかにするとともに、セロトニンが将来報酬の予測に基づく行動を制御するしくみの解明を進めた。

研究成果の概要（英文）：In accordance with the aims of the project, we developed brain inspired algorithms for artificial intelligence and utilized the theories and methods of artificial intelligence for advancing brain science. We developed data-efficient model-based reinforcement algorithms and analyzed the data-efficiency of deep reinforcement learning algorithms. We clarified representations of different variables for sensory inference and reinforcement learning in the cerebral cortex and the basal ganglia. We also revealed that the enhancement of the patience for delayed rewards by serotonin neuron stimulation is dependent on the certainty of reward delivery and the uncertainty of delivery timing, and proposed a novel Bayesian decision model to reproduce animal behaviors.

研究分野：計算神経科学

キーワード：強化学習 深層学習 データ効率 モデルベース 大脳皮質 大脳基底核 セロトニン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

パターン識別や強化学習において、高次元の感覚運動情報を縮約した内部表現を学習することがその成功の鍵である。多階層ニューラルネットの学習手法(**Deep Learning**)の進歩とともに、その原理を情報理論や統計力学の観点から解明しようという研究が進んでいる。また **Deep Learning** により得られた視覚の高次表現を視覚野のニューロン活動データの解析に用いる試みも行われている(**Yamins et al., 2014**)。

これらの数理手法や実験的知見をもとに、階層的な情報表現の学習とそれによるデータ効率の高い強化学習アルゴリズムの開発、また脳の柔軟かつロバストな学習を支える仕組みの解明が待たれている。

2. 研究の目的

本研究は感覚運動情報を統合した多階層の表現学習と、それによる効率良い状態予測や強化学習手法の開発と解析を進める。また、脳における多階層の学習機構と、全脳レベルでの自己組織的な調整機能を、光学神経活動計測や光遺伝学操作実験的により解明をすることをめざす。

3. 研究の方法

1) 多階層表現学習の数理基盤

ディープラーニングによる感覚入力を行動出力や報酬予測につなぐ内部表現の学習と、それによるデータ効率の高い強化学習のアルゴリズム開発、数理解析と計算機シミュレーションによる性能検証を行う。

2) 多階層表現学習の神経機構

脳における行動や報酬を指向した多階層表現学習機構の解明に向け、大脳皮質や大脳基底核など脳の各部の情報表現の違いを、光学神経活動計測などにより明らかにする。

3) 全脳レベルの自己組織化

学習したモジュールの柔軟な選択や重みづけを可能にしている脳機構を、ドーパミン、セロトニンなどの神経修飾物質による制御などを候補に、多面的に探索する。

4. 研究成果

脳にならった新たな人工知能の開発と、人工知能の理論や手法による脳科学の進展という領域のねらいに沿って、以下のように研究を進めた。

1) 多階層表現学習の数理基盤

ディープラーニングをモデルベース強化学習に用いる場合の数理的な問題点を解析し、安定に効率よく学習するためのアルゴリズム **Total Propagation** 法を提案し、国際会議論文として発表し(**Parmas et al. ICML 2018; Parmas, NeurIPS 2019**)、国際特許を取得した。

ディープラーニングを強化学習に用いる場合に、学習の安定性を保証しながらデータ効率を改善する **Conservative Value Iteration** アルゴリズムを導出し、その収束速度の数理解析とシミュレーション実験結果を、国際会議投論文として発表した(**Kozuno et al., AISTATS 2019; Viellard et al., NeurIPS 2020**)。

多階層のリカレントニューラルネットワークを強化学習に適用することにより、行動要素とその系列の学習が行えることを示した(**Han et al., Neural Networks, 2020**)。また、隠れ状態を含む強化学習課題に対して、変分リカレントニューラルネットを用いた新たな学習手法を開発し、国際会議論文として発表した(**Han et al., ICLR 2020, 2022**)。

2) 多階層表現学習の神経機構

強化学習課題中のラットの神経活動計測データに対してタスクレベル、空間レベル、身体運動レベルの変数による回帰分析を進め、前頭前野と線条体背内側部ではタスクイベントを表現するニューロンが、運動野と線条体背外側部には運動情報を表現するニューロンが多いことを明らかにした。

大脳基底核での情報表現の獲得機構を明らかにするため、線条体の異なるコンパートメントの細胞を区別した新たな光学神経活動計測実験を行い、行動学習の初期と後期の異なるフェーズで報酬予測に関わるニューロン群が存在することを新たに発見した(**Yoshizawa et al., eNeuro, 2018**)。

また、大脳皮質の神経回路において、ボトムアップの感覚情報とトップダウンの予測情報が統合されるメカニズムを明らかにするため、レバーの微小な動きを識別し操作する行動課題を実行中のマウス大脳皮質の異なる層の神経活動をプリズム内視鏡を用いて同時計測する実験を進め、ニューロン集団のダイナミクスの解析結果を国際会議で発表した(**Li et al., AP-CNN 2020**)。

これらの知見と、推定と制御の双対性の理論をもとに、感覚野と運動野の神経回路の包括的な理解を目指す展望論文を出版した(**Doya, Curr. Opin. Beh. Sci., 2021**)。

3) 全脳レベルの自己組織化

セロトニンニューロンの光遺伝学刺激による報酬待機行動の促進は、報酬の確実さ待機時間

の不確かさに依存するという知見に対して、セロトニンが報酬獲得の事前確率を制御するという仮説に基づくベイズ意思決定モデルを提案し、シミュレーションにより実験データを再現することに成功した(Miyazaki et al., *Nature Communications*, 2018)。

さらに、セロトニンニューロンの神経末端の光遺伝学刺激によって、前頭眼窩野 (OFC) では背側縫線核と同様の効果が得られるのに対し、内側前頭皮質 (mPFC) では報酬のタイミングが不確かな時に限って効果が得られることを明らかにした。その特性を、OFC と mPFC が報酬提示時間の異なる内部モデルを持つという複合モデルにより再現することに成功した(Miyazaki et al., *Science Advances*, 2020)。

これらの知見をもとに、セロトニンは学習と意思決定に使える時間を伝達するという新たな仮説を提示した(Doya et al., *Curr. Opin. Beh. Sci.*, 2021)。

4) その他

うつ病患者と対照群の安静時 fMRI を含む多種のデータに、新たに開発した教師なし学習手法を適用することにより、抗うつ薬の有効性に関わるうつ病のサブタイプを同定することに成功した(Tokuda et al., *Scientific Reports*, 2018)。

領域内共同研究の成果として、進化発達型 AI(Doya & Taniguchi, *Curr. Opin. Beh. Sci.* 2019)、人工知能と脳科学(銅谷, 松尾, *Brain and Nerve*, 2019)、計算精神医学(高橋他, *Clinical Neuroscience*, 2020)、全脳確率生成モデル(Taniguchi et al., *Neural Networks*, 2022)などの展望論文を出版した。また 2020 年に開催した *International Symposium on Artificial Intelligence and Brain Science* でのセッションをもとにした国際共著展望論文を出版した(Doya et al., *Neural Networks*, 2022)。

< 主要文献 >

Doya K, Ema A, Kitano H, Sakagami M, Russell S (2022). Social impact and governance of AI and neurotechnologies. *Neural Networks*, 152, 542-554.

<https://doi.org/10.1016/j.neunet.2022.05.012>

Han D, Kozuno T, Luo X, Chen Z-Y, Doya K, Yang Y, Li D (2022). Variational oracle guiding for reinforcement learning. *International Conference on Learning Representations (ICLR2022)*. <https://openreview.net/forum?id=pjqxepwoMy>

Taniguchi T, Yamakawa H, Nagai T, Doya K, Sakagami M, Suzuki M, Nakamura T, Taniguchi A (2022). A whole brain probabilistic generative model: Toward realizing cognitive architectures for developmental robots. *Neural Networks*, 150, 293-312.

<https://doi.org/10.1016/j.neunet.2022.02.026>

Doya K (2021). Canonical cortical circuits and the duality of Bayesian inference and optimal control. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 41, 160-167.

<https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2021.07.003>

Doya K, Miyazaki KW, Miyazaki K (2021). Serotonergic modulation of cognitive computations. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 38, 116-123.

<https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2021.02.003>

Han D, Doya K, Tani J (2021). Goal-directed planning by reinforcement learning and active inference. *arXiv*, 2106.09938. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.09938>

Uchibe E, Doya K (2021). Forward and inverse reinforcement learning sharing network weights and hyperparameters. *Neural Networks*, 144, 138-153.

<https://doi.org/10.1016/j.neunet.2021.08.017>

Han D, Doya K, Tani J (2020). Self-organization of action hierarchy and compositionality by reinforcement learning with recurrent neural networks. *Neural Networks*, 129, 149-162.

<https://doi.org/10.1016/j.neunet.2020.06.002>

Han D, Doya K, Tani J (2020). Variational recurrent models for solving partially observable control tasks. *International Conference on Learning Representations (ICLR 2020)*,

https://iclr.cc/virtual_2020/poster_r1l4a4tDB.html.

Miyazaki K, Miyazaki KW, Sivori G, Yamanaka A, Tanaka KF, Doya K (2020). Serotonergic projections to the orbitofrontal and medial prefrontal cortices differentially modulate waiting for future rewards. *Science Advances*, 6, eabc7246.

<https://doi.org/10.1126/sciadv.abc7246>

Vieillard N, Kozuno T, Scherrer B, Pietquin O, Munos R, Geist M (2020). Leverage the Average: an Analysis of Regularization in RL. *NeurIPS 2020*.

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.14089>

高橋英彦, 山下祐一, 銅谷賢治 (2020). AI と脳神経科学—精神神経疾患へのデータ駆動と理論駆動のアプローチ. *Clinical Neuroscience*, 38, 1358-1363.

Doya K, Taniguchi T (2019). Toward evolutionary and developmental intelligence. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 29, 91-96. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2019.04.006>

Kozuno T, Uchibe E, Doya K (2019). Theoretical analysis of efficiency and robustness of softmax and gap-increasing operators in reinforcement learning. *22nd International*

- Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS 2019).
<http://proceedings.mlr.press/v89/kozuno19a.html>
- 銅谷賢治監訳 (2019). ディープラーニング革命 (Terrence J. Sejnowski 著: The Deep Learning Revolution). ニュートンプレス.
<https://www.newtonpress.co.jp/book/other/deeplearning.html>
- 銅谷賢治, 松尾豊 (2019). 人工知能と脳科学の現在とこれから. *Brain and Nerve*, 71, 649-655.
<https://doi.org/10.11477/mf.1416201337>
- Elfving S, Uchibe E, Doya K (2018). Sigmoid-weighted linear units for neural network function approximation in reinforcement learning. *Neural Networks*, 107, 3-11.
<https://doi.org/10.1016/j.neunet.2017.12.012>
- Magrans de Abril I, Yoshimoto J, Doya K (2018). Connectivity inference from neural recording data: Challenges, mathematical bases and research directions. *Neural Networks*, 102, 120-137. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2018.02.016>
- Miyazaki K, Miyazaki KW, Yamanaka A, Tokuda T, Tanaka KF, Doya K (2018). Reward probability and timing uncertainty alter the effect of dorsal raphe serotonin neurons on patience. *Nature Communications*, 9, 2048. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04496-y>
- Tokuda T, Yoshimoto J, Shimizu Y, Okada G, Takamura M, Okamoto Y, Yamawaki S, Doya K (2018). Identification of depression subtypes and relevant brain regions using a data-driven approach. *Scientific Reports*, 8, 14082. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32521-z>
- Parmas P (2018). Total stochastic gradient algorithms and applications in reinforcement learning. *NeurIPS 2018*, 10204-10214. <http://papers.nips.cc/paper/8223-total-stochastic-gradient-algorithms-and-applications-in-reinforcement-learning>
- Parmas P, Rasmussen CE, Peters J, Doya K (2018). PIPPS: Flexible model-based policy search robust to the curse of chaos. 35th International Conference on Machine Learning (ICML 2018), <http://proceedings.mlr.press/v80/parmas18a/parmas18a.pdf>
- Yoshizawa T, Ito M, Doya K (2018). Reward-predictive neural activities in striatal striosome compartments. *eneuro*, 5, e0367-17.2018. <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0367-17.2018>
- Wang J, Uchibe E, Doya K (2017). Adaptive baseline enhances EM-based policy search: Validation in a view-based positioning task of a smartphone balancer. *Frontiers in Neurorobotics*, 11, 1. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2017.00001>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計26件（うち査読付論文 25件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 23件）

1. 著者名 Han D, Kozuno T, Luo X, Chen Z-Y, Doya K, Yang Y, Li D	4. 巻 ICLR2022
2. 論文標題 Variational oracle guiding for reinforcement learning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Conference on Learning Representations	6. 最初と最後の頁 135
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 -
1. 著者名 Doya K, Ema A, Kitano H, Sakagami M, Russell S	4. 巻 152
2. 論文標題 Social impact and governance of AI and neurotechnologies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 542-554
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2022.05.012	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 該当する
1. 著者名 Taniguchi T, Yamakawa H, Nagai T, Doya K, Sakagami M, Suzuki M, Nakamura T, Taniguchi A	4. 巻 150
2. 論文標題 A whole brain probabilistic generative model: Toward realizing cognitive architectures for developmental robots	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 293-312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2022.02.026	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 Doya K	4. 巻 41
2. 論文標題 Canonical cortical circuits and the duality of Bayesian inference and optimal control	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Current Opinion in Behavioral Sciences	6. 最初と最後の頁 160-167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cobeha.2021.07.003	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 Doya K, Miyazaki KW, Miyazaki K	4. 巻 38
2. 論文標題 Serotonergic modulation of cognitive computations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Current Opinion in Behavioral Sciences	6. 最初と最後の頁 116-123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cobeha.2021.02.003	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 Han D, Doya K, Tani J	4. 巻 2106
2. 論文標題 Goal-directed planning by reinforcement learning and active inference	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 9938
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2106.09938	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 Uchibe E, Doya K	4. 巻 144
2. 論文標題 Forward and inverse reinforcement learning sharing network weights and hyperparameters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 138-153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2021.08.017	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 Han D, Doya K, Tani J	4. 巻 ICLR 2020
2. 論文標題 Variational recurrent models for solving partially observable control tasks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Conference on Learning Representations	6. 最初と最後の頁 486
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 -

1. 著者名 Han Dongqi, Doya Kenji, Tani Jun	4. 巻 129
2. 論文標題 Self-organization of action hierarchy and compositionality by reinforcement learning with recurrent neural networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 149 ~ 162
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2020.06.002	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 Miyazaki K, Miyazaki KW, Sivori G, Yamanaka A, Tanaka KF, Doya K	4. 巻 6
2. 論文標題 Serotonergic projections to the orbitofrontal and medial prefrontal cortices differentially modulate waiting for future rewards	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabc7246.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abc7246	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 Vieillard N, Kozuno T, Scherrer B, Pietquin O, Munos R, Geist M	4. 巻 Neur IPS 2020
2. 論文標題 Leverage the Average: an Analysis of Regularization in RL	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 14089
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2003.14089	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 高橋英彦, 山下祐一, 銅谷賢治	4. 巻 38
2. 論文標題 AIと脳神経科学 精神神経疾患へのデータ駆動と理論駆動のアプローチ	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Clinical Neuroscience	6. 最初と最後の頁 1358-1363
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 Kozuno T, Han D, Doya K	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Gap-Increasing Policy Evaluation for Efficient and Noise-Tolerant Reinforcement Learning.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 arXiv.	6. 最初と最後の頁 1906.07586.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.1906.07586	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 Parmas P, Sugiyama M	4. 巻 N/A
2. 論文標題 A unified view of likelihood ratio and reparameterization gradients and an optimal importance sampling scheme.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 arXiv.	6. 最初と最後の頁 1910.06419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.1910.06419	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 Doya K, Taniguchi T	4. 巻 29
2. 論文標題 Toward evolutionary and developmental intelligence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Current Opinion in Behavioral Sciences	6. 最初と最後の頁 91-96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cobeha.2019.04.006	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 銅谷賢治, 松尾豊	4. 巻 71(7)
2. 論文標題 人工知能と脳科学の現在とこれから	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 BRAIN and NERVE 増大特集 人工知能と神経科学	6. 最初と最後の頁 649-655
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11477/mf.1416201337.	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 Kozuno T, Uchibe E, Doya K	4. 巻 89
2. 論文標題 Theoretical analysis of efficiency and robustness of softmax and gap-increasing operators in reinforcement learning	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Machine Learning Research (PMLR)	6. 最初と最後の頁 2995-3003
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 -

1. 著者名 Parmas P, Rasmussen CE, Peters J, Doya K	4. 巻 ICML 2018
2. 論文標題 PIPPS: Flexible model-based policy search robust to the curse of chaos	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 35th International Conference on Machine Learning	6. 最初と最後の頁 N/A
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 Parmas P	4. 巻 NeurIPS 2018
2. 論文標題 Total stochastic gradient algorithms and applications in reinforcement learning	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 NeurIPS Proceedings	6. 最初と最後の頁 10204-10214
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 -

1. 著者名 Miyazaki Katsuhiko, Miyazaki Kayoko W., Yamanaka Akihiro, Tokuda Tomoki, Tanaka Kenji F., Doya Kenji	4. 巻 9
2. 論文標題 Reward probability and timing uncertainty alter the effect of dorsal raphe serotonin neurons on patience	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2048
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-04496-y	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 Tokuda Tomoki, Yoshimoto Junichiro, Shimizu Yu, Okada Go, Takamura Masahiro, Okamoto Yasumasa, Yamawaki Shigeto, Doya Kenji	4. 巻 8
2. 論文標題 Identification of depression subtypes and relevant brain regions using a data-driven approach	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 14082
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-32521-z	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 Magrans de Abril I, Yoshimoto J, Doya K	4. 巻 102
2. 論文標題 Connectivity inference from neural recording data: Challenges, mathematical bases and research directions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 120-137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2018.02.016	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 Yoshizawa T, Ito M, Doya K	4. 巻 5
2. 論文標題 Reward-predictive neural activities in striatal striosome compartments	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 eNeuro	6. 最初と最後の頁 e0367-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1523/ENEURO.0367-17.2018.	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 Elfwing S, Uchibe E, Doya K	4. 巻 107
2. 論文標題 Sigmoid-weighted linear units for neural network function approximation in reinforcement learning	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 3-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2017.12.012.	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 Tokuda T, Yoshimoto J, Shimizu Y Okada G, Takamura M, Okamoto Y, Yamawaki S, Doya K	4. 巻 12
2. 論文標題 Multiple co-clustering based on nonparametric mixture models with heterogeneous marginal distributions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 PLoS One	6. 最初と最後の頁 e0186566
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0186566	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 Jiexin Wang, Eiji Uchibe, Kenji Doya	4. 巻 11
2. 論文標題 Adaptive Baseline Enhances EM-based Policy Search: Validation in a View-based Positioning Task of a Smartphone Balancer	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Frontiers in Neurorobotics	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fnbot.2017.00001	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78件(うち招待講演 41件/うち国際学会 44件)

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 How Can the Brain Connect Predictors and Actors on the Fly?
3. 学会等名 Workshop on Learning for flexible, context-sensitive behavior (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Rahman F, Doya K, Mickheyev A
2. 発表標題 Identifying the Evolutionary Conditions for the Emergence of Alternative Reproductive Tactics in Simulated Robot Colonies
3. 学会等名 AROB 25th 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 What can we further learn from the brain for artificial intelligence?
3. 学会等名 脳と心のメカニズム第20回冬のワークショップ（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Chiu HC, Doya K
2. 発表標題 Representation and grounding of abstract concepts: a preliminary investigation. Mechanism of Mind and Brain
3. 学会等名 脳と心のメカニズム第20回冬のワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮崎勝彦
2. 発表標題 セロトニンによる報酬待機行動の制御機構
3. 学会等名 第254回つくばブレインサイエンス・セミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 What Can We Learn from the Brain for Next AI?
3. 学会等名 The 3rd Ryudai-OIST Symposium: Basic Medical Science to Clinical Medicine
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ota S, Doya K
2. 発表標題 Intrinsic motivation in creative activity: A human behavioral experiment for identifying the factors that influence intrinsic motivation.
3. 学会等名 WIML, NeurIPS (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Parmas P, Sugiyama M
2. 発表標題 A unified view of likelihood ratio and reparameterization gradients and an optimal importance sampling scheme
3. 学会等名 Deep Reinforcement Learning Workshop, NeurIPS (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 銅谷賢治
2. 発表標題 マウスの脳内シミュレーションとロボットの報酬進化
3. 学会等名 第12回日本人間行動進化学会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Consciousness as Data Assimilation
3. 学会等名 Consciousness Club. ARAYA (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Toward whole-brain multi-scale modeling
3. 学会等名 NBNI: Neurobiology and Neuroinformatics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Patience, Confidence and Serotonin
3. 学会等名 Blue Brain Seminar (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 What Can We Further Learn from the Brain for Cognitive Robotics?
3. 学会等名 IROS 2019 Workshop: Deep Probabilistic Generative Models for Cognitive Architecture in Robotics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Systems Biology of Reinforcement Learning
3. 学会等名 International Conference on Systems Biology (ICSB 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Doya K
2 . 発表標題 Reinforcement Learning in Machines and the Brain
3 . 学会等名 Conference on Robot Learning (CoRL 2019) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Miyazaki KW, Miyazaki K, Yamanaka A, Tanaka KF, Doya K
2 . 発表標題 Stimulation of serotonergic terminals in the orbitofrontal and medial prefrontal cortices differentially affects waiting for the future rewards
3 . 学会等名 Society for Neuroscience (SfN 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Doya K
2 . 発表標題 Artificial Intelligence and Brain Science
3 . 学会等名 The Joint Symposium of WPI-IIIS, Ph.D. Program in Humanics, and 36th Takamine Conference (招待講演)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Doya K
2 . 発表標題 Neural Circuits for Reinforcement Learning and Mental Simulation
3 . 学会等名 IBRO 2019 Symposium: Valence and Reward Encoding (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 銅谷賢治
2. 発表標題 ベジアンブレインの今日
3. 学会等名 日本認知科学会第36回大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ota S, Doya K
2. 発表標題 Intrinsic motivation in play: Preliminary experiment for analyzing how learning environmental condition influences intrinsic motivation
3. 学会等名 International Conference on Cognitive Science (ICCS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Neural circuits for mental simulation
3. 学会等名 International Conference on Cognitive Science (ICCS2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 What can we further learn from the brain for AI and robotics?
3. 学会等名 Global AI Summit: Cognitive AI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Big Data Challenges in Neuroscience
3. 学会等名 IEEE CIS Summer School: Big Data Analytics and Stream Processing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Neural Circuits for Mental Simulation
3. 学会等名 CNS*2019, 28th Annual Computational Neuroscience Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Possible roles of dopamine in model-free and model-based decision and learning
3. 学会等名 CNS*2019, Dopaminergic Signaling Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Ethologically Grounded Motivation and Neural Implementation of Mental Simulation
3. 学会等名 The 4th International Workshop on Intrinsically Motivated Open-ended Learning (IMOL2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 銅谷賢治
2. 発表標題 人工知能と脳科学
3. 学会等名 第58回日本生体医工学会大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Learning to Communicate for Ecological Fitness
3. 学会等名 Shonan Meeting No. 141. Language as Goal-Directed Sequential Behavior: Computational Theories, Brain Mechanisms, Evolutionary Roots
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Neural circuit for mental simulation
3. 学会等名 Computational and Systems Neuroscience 2019 (COSYNE2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Patience and beyond
3. 学会等名 COSYNE 2019 Workshop -Advances and Convergences in 5-HT Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Neural circuits for reinforcement learning and mental simulation
3. 学会等名 5th Coreto Core International Symposium "3D LabExchange Program" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 銅谷賢治
2. 発表標題 人工知能は脳から何を学べるか
3. 学会等名 第26回脳の世紀シンポジウム「AIと脳」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 銅谷賢治
2. 発表標題 想像力と知能の脳回路を可視化する
3. 学会等名 第58回日本核医学会学術総会-合同特別講演(県民公開講座を兼ねる)(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Introductory talk: Building autonomous robots to understand what brains do
3. 学会等名 Satellite workshop of The 8th International Symposium on Biology of Decision Making (SBDM2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 銅谷賢治
2. 発表標題 ロボットと人工知能から行動障害と脳機能へのアプローチ
3. 学会等名 第22回日本摂食障害学会学術集会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Neural circuits for reinforcement learning and mental simulation
3. 学会等名 OIST-KAIST Symposium: Intelligence in Biological Systems and Its Application to Machines（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 銅谷賢治
2. 発表標題 脳の回路モジュールはなぜうまく繋がれるのか
3. 学会等名 第3回 全脳アーキテクチャシンポジウム 「脳に学んで良き汎用知能に至る道筋」（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kozuno T, Doya K
2. 発表標題 Theoretical analysis of Non-exact retrace algorithm
3. 学会等名 The 28th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society (JNNS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Paramas P
2 . 発表標題 Total stochastic gradient algorithms and applications in reinforcement learning
3 . 学会等名 The 32nd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Paramas P
2 . 発表標題 Total stochastic gradient algorithms with application to model-based reinforcement learning
3 . 学会等名 The 21st Information -based induction science workshop (IBIS2018)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Paramas P, Rasmussen Carl E, Peters Jan, Doya, Kenji
2 . 発表標題 PIPPS: Flexible model-based policy search robust to the curse of chaos
3 . 学会等名 The 35th International Conference on Machine Learning (ICML2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Yamane Y, Ito J, Joana C, Fujita I, Tamura H, Maldonado P, Doya K, Grun S
2 . 発表標題 Representation of fixated objects by multiple single unit activity in visual cortices of freely viewing macaque monkeys
3 . 学会等名 11th FENS Forum of Neuroscience (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 Yamane Y, Ito J, Joana C, Fujita I, Tamura H, Maldonado P, Doya K, Grun S
2. 発表標題 Inferring fixated objects in free viewing from parallel neuronal spiking activities in macaque monkeys
3. 学会等名 The 41st Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yamane Y, Ito J, Joana C, Fujita I, Tamura H, Maldonado P, Doya K, Grun S
2. 発表標題 Neuronal activity of macaque visual cortices during free viewing
3. 学会等名 The 19th winter workshop Mechanism of Brain and Mind
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshizawa T, Ito M, Doya K
2. 発表標題 Cell-type specific calcium imaging of striatal neurons in the striosome compartments during an odor-conditioning task
3. 学会等名 Gordon Research Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Zobnin S, Li Yuzhe, Doya K
2. 発表標題 Experimental investigation of hierarchical Bayesian inference in sensory and motor cortices
3. 学会等名 脳と心のメカニズム第18回冬のワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮崎勝彦
2. 発表標題 報酬待機行動を制御するセロトニンの役割—optogeneticsによる検証—
3. 学会等名 セロトニン研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Imaging the neural circuit for mental simulation
3. 学会等名 COSYNE 2018 Workshop Session: Concepts, attention, and consciousness in (reinforcement) learning 3.5 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Neural circuits for reinforcement learning and mental simulation
3. 学会等名 Canonical Computation in Brains and Machines, New York University (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 What should we further learn from the brain?
3. 学会等名 Joint Workshop of Korean AI flagship Project and Japanese AI and Brain Science Project
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Neural circuits for reinforcement learning and mental simulation
3. 学会等名 Brain and AI Symposium Korea (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Neural circuits for reinforcement learning and mental simulation
3. 学会等名 Seminar at Cold Spring Harbor Laboratory
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 How does the brain wire up itself on the fly?
3. 学会等名 Seminar at Institute for Advanced Study, Princeton (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Neural Circuit for Mental Simulation
3. 学会等名 The Neuroscience and Social Decision Making Talk Series
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kozuno T, Uchibe E, Doya K
2. 発表標題 Robust and Efficient Off-Policy Policy Evaluation via Enhanced Action-Gap
3. 学会等名 The 20th Information-Based Induction Sciences Workshop
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Parmas P, Peters J, Doya, K
2. 発表標題 The optimal-baseline estimator is not the optimal baseline-estimator
3. 学会等名 Information-based induction sciences workshop (IBIS)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Reinke C, Doya K
2. 発表標題 Adaptation of Optimization Algorithms to Problem Domains by Transfer Learning
3. 学会等名 2017 International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences (ICIIBMS) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Reinke C, Uchibe E, Doya K
2. 発表標題 Average Reward Optimization with Multiple Discounting Reinforcement Learners
3. 学会等名 ICONIP (Lecture Notes in Computer Science) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Reinke C, Uchibe E, Doya K
2. 発表標題 Fast Adaptation of Behavior to Changing Goals with a Gamma Ensemble
3. 学会等名 3rd Multidisciplinary conference on reinforcement learning and decision making (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshizawa T, Ito M, Doya K
2. 発表標題 Coding of value information in the striatal striosome compartment
3. 学会等名 44th Naito Conference
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshizawa T, Ito M, Doya K
2. 発表標題 Neural representation of sensory-state value in the striatal striosome compartment
3. 学会等名 Society for Neuroscience 47th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Zobnin S, Li Yuzhe, Doya K
2. 発表標題 Experimental investigation of hierarchical Bayesian inference in sensory and motor cortices
3. 学会等名 新学術領域研究「人工知能と脳科学」第3回領域会議
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Neural coding, brain imaging and information extraction by circuit modeling
3. 学会等名 Neuroscience 2017 Sattelite Symposium / CREST Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Reinforcement learning: basic concepts and recent advances
3. 学会等名 Workshop on "Human & Machine Learning" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Neural mechanisms of reinforcement learning and mental simulation
3. 学会等名 Workshop on "Human & Machine Learning" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 What should we further learn from the brain?
3. 学会等名 Korean AI Flagship Project Workshop (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Exploring the deep brain network for reinforcement learning
3. 学会等名 Neuroscience 2017, 40th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Societ,Luncheon Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Decoding the contents of mental simulation
3. 学会等名 Neuroscience 2017 Sattelite Symposium: Computational Principles of the Nervous System (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 What should We further Learn from the Brain?
3. 学会等名 Brain-AI Workshop, NYU Shanghai (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 銅谷賢治
2. 発表標題 BRAIN x Bayes
3. 学会等名 新学術領域研究「人工知能と脳科学」若手サマースクール
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 大脳基底核の機能モデル・病態モデルと実験的検証
3. 学会等名 第32回 日本大脳基底核研究会 (JBAGS2017) (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 銅谷賢治
2. 発表標題 「脳内シミュレーション」の神経回路を可視化する
3. 学会等名 新適塾「脳はおもしろい」第18回会合
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Artificial Intelligence and Brain Science
3. 学会等名 Seminar at Kyungpook National University
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 What can we further learn from the brain?
3. 学会等名 24th International Conference on Neural Information Processing ICONIP2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Doya K
2. 発表標題 Neural circuits for reinforcement learning and mental simulation
3. 学会等名 SCiNDU: Systems & Computational Neuroscience Down Under (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 銅谷賢治
2. 発表標題 脳内シミュレーションの神経機構
3. 学会等名 第32回日本整形外科学会基礎学術集会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Chris Reinke, Eiji Uchibe, Kenji Doya
2. 発表標題 Fast Adaptation of Behavior to Changing Goals with a Gamma Ensemble
3. 学会等名 The 3rd Multidisciplinary Conference on Reinforcement Learning and Decision Making (RLDM2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kenji Doya
2. 発表標題 Coding of action and state values in the striatal compartments
3. 学会等名 12th International Basal Ganglia Society Meeting (IBAGS-XII 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計3件

産業財産権の名称 Total stochastic gradient method	発明者 Paavo Parmas	権利者 沖縄科学技術大学院大学
産業財産権の種類、番号 特許、US 62/749,908	取得年 2018年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 Direct inverse reinforcement learning with density ratio estimation	発明者 Eiji Ichibe, Kenji Doya	権利者 沖縄科学技術大学院大学
産業財産権の種類、番号 特許、2018-546050	取得年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 Inverse reinforcement learning with density ratio estimation	発明者 Eiji Ichibe, Kenji Doya	権利者 沖縄科学技術大学院大学
産業財産権の種類、番号 特許、US-CIP 15/425,924	取得年 2017年	国内・外国の別 外国

〔その他〕

人工知能と脳科学の対照と融合 http://www.brain-ai.jp/jp/ International Symposium on Artificial Intelligence and Brain Science http://www.brain-ai.jp/symposium2020/ Neural Networks Special Issue on Artificial Intelligence and Brain Science https://www.sciencedirect.com/journal/neural-networks/special-issue/1017VB2Z2R5 沖縄科学技術大学院大学 神経計算ユニット https://groups.oist.jp/ncu
--

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
---------------------------	-----------------------	----

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2件

国際研究集会 第40回日本神経科学大会シンポジウム	開催年 2017年～2017年
国際研究集会 International Symposium on Artificial Intelligence and Brain Science	開催年 2020年～2020年

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
---------	---------

米国	University of California			
フランス	Sorbonne University			