

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：82401

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2017～2021

課題番号：17H06315

研究課題名（和文）脳情報動態に学んだ非同期並列情報処理アーキテクチャの提案と実証

研究課題名（英文）Proposal and Demonstration of Asynchronous Parallel Information Processing Architecture Inspired by Brain Information Dynamics

研究代表者

高橋 恒一（Takahashi, Koichi）

国立研究開発法人理化学研究所・生命機能科学研究センター・チームリーダー

研究者番号：20514508

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 85,150,000円

研究成果の概要（和文）：脳の領野間結合様式に注目し、脳の時空間的に階層的な情報動態にヒントを得た非同期並列の情報処理アーキテクチャを提案、実装、実証することを目的に研究を行った。脳型の参照アーキテクチャに関しては、新皮質を対象とした(1)新皮質マスターアルゴリズムフレームワーク(MAF)の定義を試みた。また、脳領野間の結合アーキテクチャを参照しながら脳型AIの開発を行うための(2)脳型AI開発方法論と脳型参照アーキテクチャの整備を行った。また、脳型非同期並列計算の実行基盤を整備するために、(3)脳型計算基盤ソフトウェアBriCAの開発を行い、この実証に向けて(4)脳型非同期並列計算モデルの検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脳情報動態の時空間的階層性は現代の計算アーキテクチャのプロセッサ、メモリ、ネットワーク階層における局所性との共通点も多く、分散並列アーキテクチャの観点から脳に学べる点が多い。本研究は将来的にはエネルギー効率が飛躍的に高い情報処理技術やIoTなどの情報通信ネットワークの効率化、高信頼性などに結びつく可能性がある。

研究成果の概要（英文）：Focusing on the interdomain coupling patterns of the brain, our research aimed to propose, implement, and demonstrate an asynchronous parallel information processing architecture inspired by the spatiotemporal hierarchical information dynamics of the brain. Regarding the brain-type reference architecture, we attempted to define (1) a neocortical master algorithm framework (MAF) for the neocortex. We also developed (2) a methodology for developing brain-type AI and a brain-type reference architecture for developing brain-type AI with reference to the coupled architecture among brain regions. In addition, to develop an execution infrastructure for brain-based asynchronous parallel computation, we developed (3) brain-based computation infrastructure software, BriCA, and examined (4) brain-based asynchronous parallel computation models for this demonstration.

研究分野：人工知能、計算システム生物学

キーワード：脳型人工知能 全脳アーキテクチャ 並列計算 高性能計算

### 1. 研究開始当初の背景

脳は低速、低精度、低信頼性の情報処理素子である神経細胞が多数集合し、大局的な調停者なしに非同期で結合する、超並列の情報処理装置である。これらの神経細胞素子は、さらに集合してコラム構造、新皮質の領野、あるいは海馬や大脳基底核といった器官などを形成し、空間的な階層構造を成している。その一方で、単一の神経細胞の発火頻度の上限は概ね 1kHz であるが、一方で領野内や海馬 = 嗅内皮質のような比較的近隣の部位間では数十 Hz 程度の波での同期が観察され、また数 Hz 程度の波は領野間あるいは視床を介した領野間相互作用により関連すると考えられており [Varela01]、時間的な階層性も存在する。ひるがえって現状の人工知能研究で主流である人工神経回路では、ネットワーク全体に誤差逆伝播法を適用することに起因する同期ボトルネックのために並列処理が困難であり、その拡張性を著しく阻害している。本研究では、脳の領野間結合様式に注目し、脳の時空間的に階層的な情報動態にヒントを得た、非同期並列の情報処理アーキテクチャを提案、実装、実証する。

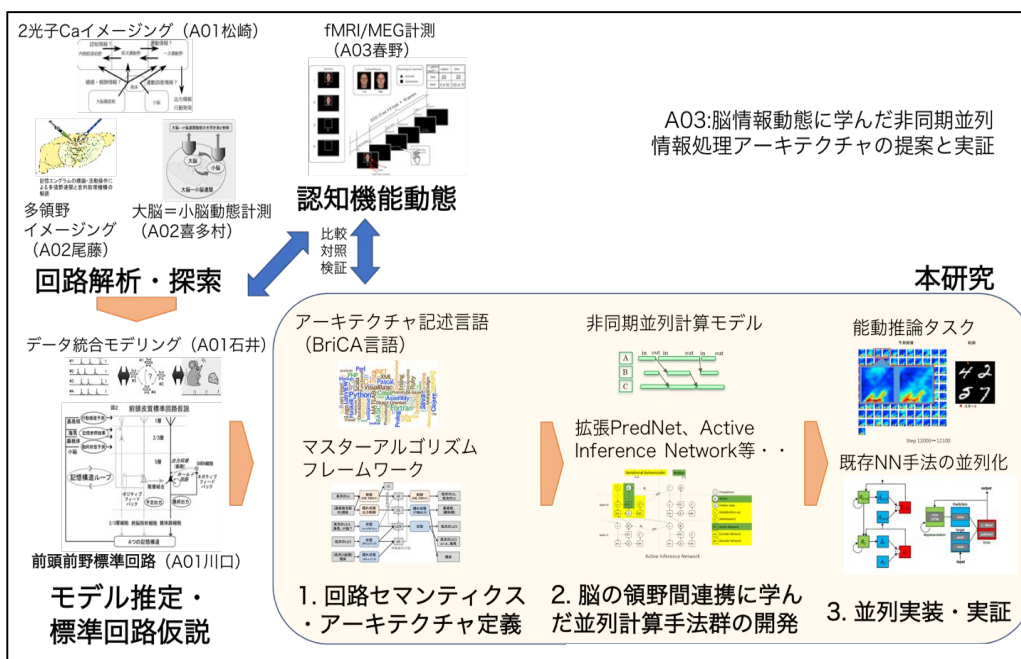


図1 本研究の範囲と流れ、他班

### 2. 研究の目的

本研究では、脳の領野間結合様式に注目し、脳の時空間的に階層的な情報動態にヒントを得た非同期並列の情報処理アーキテクチャを提案、実装、実証する。

具体的には、A01 班および A02 班が行う領野間回路解析・探索とモデル推定を統合した標準回路仮説に対し、本研究で (1) 領野内の入出力回路セマンティクスとアーキテクチャ定義を付与したマスターアルゴリズムフレームワーク (MAF) さらには領野間の結合を規定する脳参照アーキテクチャとして整備する。この手段として、脳型アーキテクチャ記述言語 (BriCA 言語) とその処理系を開発する。次に、(2) 提案者らの研究グループが開発する基盤ソフトウェア BriCA を拡張し、多階層非同期並列計算モデル (あるモジュールが他のサブモジュールを包含する形で、全体として多数のモジュールが非同期的に矛盾なく並行実行されるような計算モデル) に対応させる。これを用いて、いくつかの既存および新規の計算手法の設計と実装を試行する。

脳情報動態の時空間的階層性は現代の計算アーキテクチャのプロセッサ、メモリ、ネットワーク階層における局所性との共通点も多く、分散並列アーキテクチャの観点から脳に学べる点は多い。本研究は将来的にはエネルギー効率が飛躍的に高い情報処理技術や IoT などの情報通信ネットワークの効率化、高信頼性などに結びつく可能性がある。

### 3. 研究の方法

本研究では、脳型の参照アーキテクチャに関しては、新皮質を対象とした (1) 新皮質マスターアルゴリズムフレームワーク (MAF) の定義を試みた。また、脳領野間の結合アーキテクチャを参照しながら脳型 AI の開発を行うための (2) 脳型 AI 開発方法論と脳型参照アーキテクチャの整備を行った。また、脳型非同期並列計算の実行基盤を整備するために、(3) 脳型計算基盤ソフト

ウェア BriCA の開発を行い、この実証に向けて（４）脳型非同期並列計算モデルの検討を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 新皮質マスターアルゴリズムフレームワーク (MAF) の定義

研究の前半では、新皮質マスターアルゴリズムフレームワーク(MAF)の定義を重点的に行った。このための新皮質標準回路の入出力ポートとセマンティクス要件として5入力（うち制御系2、状態系3）と3出力（制御系1、状態系2）が定義し、それぞれ低次あるいは高次の領野または基底核、視床、海馬などの他器官へ接続するものとした。次に、機能要件として次のような項目を定義した。1 離散化：連続値のデータを離散化する能力は行動選択、記号的な概念の生成やその使用にも必要である。離散化の方法には分類器（教師あり学習）、クラスタリング（教師なし学習）、ランダムな選択と強化学習などがある。また、スパース表現や直交化なども関連する。2 動的情報選択：新皮質深部の抽象的な表現からセンサ側の具象的な表現にむけてトップダウン信号を利用する能力。3 時系列予測：時系列を入力とし、次の入力を予測または時系列の背後にある内部状態を推定する機能。4 モデル並列性：1つの大きな学習器をN個の並列に動作する計算単位に分割して実行した際に、Nが増えるに従って1ステップの計算の入力が与えられてから出力を行うまでの遅延時間を減少させられること。これらの入出力関係および機能要件が神経科学的知見と矛盾しないことを A01 班の川口らと直接意見交換した。

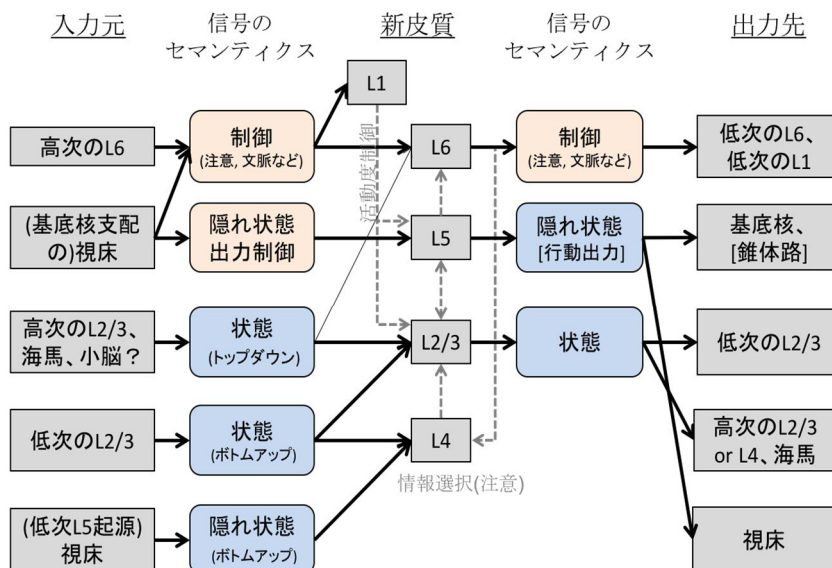


図2. 新皮質マスターアルゴリズムの入出力セマンティクス(2017年版)

さらに、大脳新皮質のマスターアルゴリズムフレームワーク(MAF)の完成度を高めるため、視床-皮質経路における2種類の経路(Core/Matrix)についての特徴を整理し、領野間で交換される信号の意味づけを行った。次に多領野連携と並列処理におけるMAFの要件として時系列予測があるが、その既存モデルであるPredictive Codingにおいて高次の階層での予測の対象が下位の状態となっており、近年の神経科学実験の結果によって示された下位の予測誤差を予測の対象とする説明と反することが明らかとなっている。大脳新皮質の局所回路内部の神経科学的妥当性を高めるために樹状突起での情報処理を細胞体の情報処理として扱うDendritic BackpropagationモデルをMAFにおける時系列情報処理へ拡張する取り組みに着手した。更に、注意を活用した自然言語処理の仕組みを大脳基底核と視床の回路に対応付けることでその理解を深めた。

##### (2) 脳型AI開発方法論と脳型参照アーキテクチャの整備

脳型AIアーキテクチャの効率的な開発のために、解剖学的構造を制約として付与する手法であるStructure-constrained Interface Decomposition Method (SCID法)を提案した。SCID法は脳の広範囲において機能仮説を構築するための手法である。SCID法では、脳領野間の解剖学的



あるいは神経科学的なデータから情報フローを記述する脳情報フロー図(BIF)と、それぞれのコンポーネントに対して機能と信号のセマンティクスを仮説として付与する仮説コンポーネント図 Hypothetical Component Diagram(HCD)を用いて脳参照アーキテクチャ(BRA)を整備する。

BRA における解剖学的構造の記述である脳情報フロー(BIF)については、まずヒトの脳内のメゾスコピックレベルでの領野間における接続の情報について最も蓋然性の高い仮説を得るために、ヒトとそれ以外の哺乳類のコネクトーム情報を収集する基礎的な調査を行った。さらに BIF の信憑性を論文で裏付けるデータの試作をすすめ、その作業に必要な工数を見積もった。BRA データの開発および公開する環境については、データ記述環境として BRA の作成者が記述した BRA 形式データの検証スクリプトを作成し、BIF 形式の一元化にむけた検討を行った。また今後との公開に適したデータ形式として Google Spreadsheet を主に用いつつ、GitHub 上で公開する方法が動作速度の点などから可能であることを確認した。さらに大脳新皮質・基底核回路の基本的な構造を反映した複合学習器を、BRA データ上の HCD データとして記述し、次項で説明する脳型計算基盤ソフトウェア BriCA を用いて実装し、動作確認を行った。

個別のモデルに関しては、新皮質に関して MAF の提案と改善を行うとともに、大脳基底核を題材として BIF 形式によるデータ形式の策定が進んだ。具体的には、1.新皮質、視床、基底核が連携した大規模回路等の BRA を構築した。2.眼球を進めて NC に発表した、HPF の BRA を論文投稿した。3.コネクトーム分析を脳全体に拡大して、優良領域は 38 個であり、そこからは信頼性の高い接続がえられうることを確認した。5.全脳規模のアーキテクチャの全体像について整理し、論文投稿した。

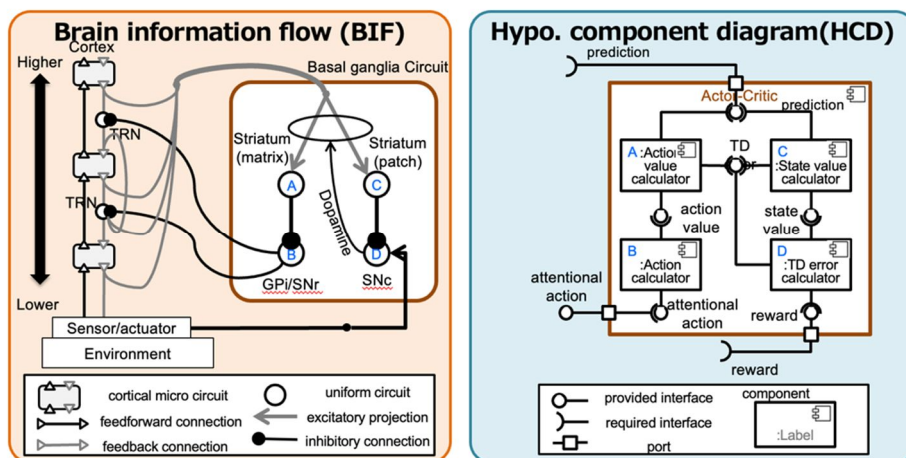


図3 大脳基底核と Actor-Critic モデルを例とした BIF と HCD の対応関係

### (3) 脳型計算基盤ソフトウェア BriCA の開発

BriCA(Brain-inspired Computing Architecture)は、離散事象法にもとづき、多数の階層的なコンポーネントから構成される計算モデルの時間進行と計算実行、およびコンポーネント間のメッセージ交換を調停し、マルチ GPU や並列計算機などの高性能計算環境においても並列非同期的かつ効率的に計算を実行するためのソフトウェアフレームワークである。本研究では、BriCA 本体と、BriCA が実行するモデルのアーキテクチャを記述するための BriCA 言語とを開発した。

また、環境シミュレータとして、仮想 3 次元空間上でロボットモデルを読み込み、頭部カメラ位置からのカラー画像および深度画像の取得・車輪による移動・他のオブジェクトとの衝突判定を容易に可能にするためのソフトウェアライブラリを開発し、これを使って、深層強化学習を行うサンプル環境とサンプルエージェントを作成した。また、脳型人工知能の学習を支援するための 3 次元空間内を動作するロボットのモデルを開発した。本モデルは空間内を移動するための車輪と物体を操作するためのマニピュレータを備えており、環境とのインタラクションを通じた学習が可能となっている。

### (4)脳型非同期計算モデルの検討

2017 年度から 2018 年度にかけて、階層化 VRNN に対し実験と評価を行った。階層化 HVRNN は潜在変数においてスパース性の高い Disentangle された表現を得、潜在変数の予測により表現の各階層間での表現するファクターの分離が可能モデルである。簡単な動画の認識課題にお

いて、潜在変数においてスパース性の高いDisentangleされた表現が得られ、潜在変数の予測により、表現の各階層間での表現するファクターの分離が可能であることを示した。また眼球運動課題において視覚時系列情報から運動パラメータのデコードができることを示した。VRNNにより新皮質の局所回路を外部からみた挙動としては、MAFにおける単純状態保持およびプッシュダウンオートマトン機能を除いて再現できたが、新皮質としては内部構造が複雑すぎるため、生物学的妥当性を向上には限界が見えてきた。自由エネルギー原理ベースモデルに関しては、まず変分オートエンコーダを応用したモデルを高次元の入出力に対応させようとしたが、この方法では状態の観測と、生成モデルが分離されてしまい、自由エネルギー原理のコンセプトから離れることが判明した。そこで、非負値行列因子分解など既存の確率モデルをベースにモデルを作成し直し、モデルの改善を行っている。

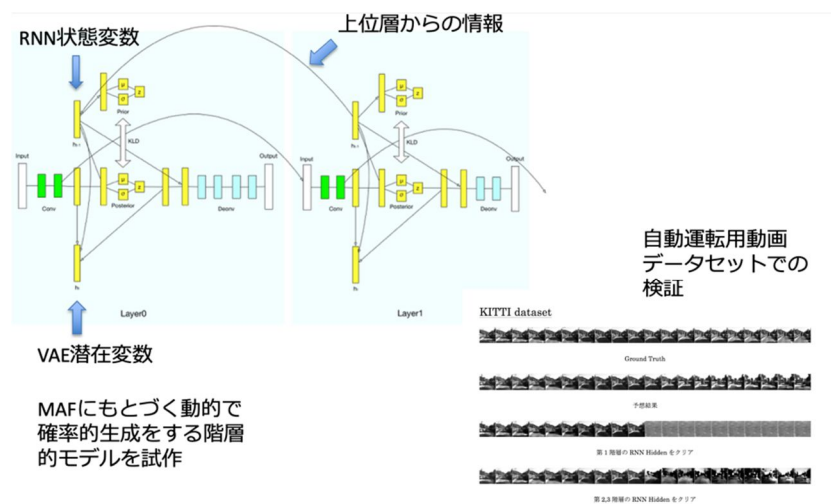


図4 階層化VRNNと自動運転用動画データでの検証

また、2019年度以降は、ネットワーク全体の更新が同期的に行われる誤差逆伝播法に変わり、局所的にGreedyなパラメータ更新を行うことでネットワーク全体を最適化するLocalError法を発展させ、SupervisedContrastiveLearning(SCL)を用いた新たな局所最適化手法GreedyLayerwiseSCL(GL-SCL)を考案した。本手法を用いたCIFAR-10の学習では非常に高い並列化効率と従来手法に迫る分類精度が示された。更に、マルチGPUマシンや富岳での並列実行の検証を行い、非常に高い並列化性能が得られることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Arakawa, Naoya	4. 巻 1
2. 論文標題 Planning with Brain-Inspired AI	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 arXiv	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） なし	査読の有無 無
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 Yamakawa Hiroshi	4. 巻 38
2. 論文標題 Attentional Reinforcement Learning in the Brain	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 New Generation Computing	6. 最初と最後の頁 49～64
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00354-019-00081-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 三好康祐, 山川宏, 高橋恒一	4. 巻 119
2. 論文標題 ESNによる階層的予測誤差モデルを用いた音声Local-Global課題の再現シミュレーション	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 信学技法	6. 最初と最後の頁 61-65
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 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 荒川直哉,	4. 巻 1
2. 論文標題 脳における行動決定の機序のサーベイ	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 こころの科学とエピステモロジー	6. 最初と最後の頁 65-73
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17件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Hiroshi Yamakawa
2. 発表標題 Imagination Architecture and Consciousness in the Brain
3. 学会等名 IJCAI-PRICAI 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒川 直哉
2. 発表標題 流動性知能実現の最初の里程碑としての見本合わせ課題
3. 学会等名 第16回汎用人工知能研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Yamakawa
2. 発表標題 Understanding the computational meaning of the neocortical interarea signals
3. 学会等名 From Neuroscience to Artificially Intelligent Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Yamakawa
2. 発表標題 Towards a qualitative evaluation of biological plausibility for brain-inspired software
3. 学会等名 2020 AP-CCN (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荒川直哉
2. 発表標題 脳型人工知能におけるプランニング
3. 学会等名 SIG-AGI
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Yamakawa
2. 発表標題 The matrix/core path of the thalamocortical circuit viewing from the predicitive coding hypothesis
3. 学会等名 The Eighth International Neural Microcircuit Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Yamakawa
2. 発表標題 Consciousness Boundary: Claustrum defines the imaginary area of the cortex
3. 学会等名 The 20th Mechanism of Brain and Mind (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Yamakawa
2. 発表標題 Consciousness for realize general intelligence in the brain - Modal information is needed for episode
3. 学会等名 FUTURAS IN RES Conference: What's the IQ of AI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 板谷 琴音、坂井 尚行、高橋 恒一、山川 宏
2. 発表標題 分散システムにおける疑似同時化の検討: 遅延があっても機械学習を使うために
3. 学会等名 2019年度 人工知能学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三好康祐, 荒川直哉, 山川宏, 高橋恒一
2. 発表標題 Hierarchical dendritic error model for the local-global oddball paradigm
3. 学会等名 第3回脳情報動態領域会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kosuke Miyoshi, Naoya Arakawa, Hiroshi Yamakawa
2. 発表標題 Do top-down predictions of time series lead to sparse disentanglement?
3. 学会等名 The 28th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kosuke Miyoshi, Naoya Arakawa, Hiroshi Yamakawa
2. 発表標題 Hierarchical Variational Recurrent Autoencoder with Top-Down prediction
3. 学会等名 第10回光操作研究会・第2回脳情報動態合同国際シンポジウム(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Itaya H, Yamakawa H, Tomita M, Takahashi K
2. 発表標題 BriCA Kernel: Cognitive Computing Platform for Large-scale Distributed Memory Environments
3. 学会等名 The 28th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋恒一
2. 発表標題 将来の機械知性に関するシナリオと分岐点
3. 学会等名 人工知能学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大澤正彦, 大森隆司, 高橋恒一, 荒川直哉, 坂井尚行, 上野道彦, 今井倫太, 山川宏
2. 発表標題 AGI開発をナビゲートするための能力マップ
3. 学会等名 人工知能学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yamakawa H, Arakawa N, Takahashi K
2. 発表標題 Reinterpreting the cortical circuit
3. 学会等名 IJCAI-17 Architectures for Generality & Autonomy Workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山川宏, 荒川直哉, 高橋恒一
2. 発表標題 全脳アーキテクチャに必要な新皮質マスターアルゴリズムの検討
3. 学会等名 人工知能学会全国大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 高橋恒一	4. 発行年 2019年
2. 出版社 人工知能美学芸術研究会	5. 総ページ数 176
3. 書名 人工知能美学芸術展 記録集	

〔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	山川 宏  (Yamakawa Hiroshi)  (00417495)	東京大学・大学院医学系研究科(医学部)・客員研究員   (12601)	

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