



研究課題名 プログラム可能な動的微粒子群「オートマター」の創成と展開

東北大学・大学院工学研究科・准教授

のむら しんいちろう

野村 慎一郎

研究課題番号： 20H05701 研究者番号：50372446

キーワード： オートマター、人工細胞、自己複製、大量生産、電子-分子インタフェース

【研究の背景・目的】

人工細胞構築の研究は、生命が物質からいかに誕生しうなのか、という謎に実証例を与えることと、生物に学んだ新しい物質生産システムの基盤となるキーテクノロジーとして近年非常に注目を集めている。天然細胞の再構成が挑戦的な課題である一方で、細胞のコピーとして自己複製を目指す人工細胞はその限界もまた生物と同様である。一方近年、分子の自己集合体ソフトマター、エネルギー流の中で自発的な運動を示す自己組織体アクティブマターの研究が盛んに行われている。新たな材料が自己複製し、その運動が分子的・電子的に制御可能となったなら、分子スケールからマクロな仕事までを自在に行わせられるようになると期待される。そこで本課題では、天然細胞の模倣とは異なる原理・原則も活用し、プログラム可能・制御可能な自動微粒子群「オートマター」の実現に向けた要素技術の開発と統合を目的とする。

【研究の方法】

本課題の要素技術として4つのサブテーマ1)自己複製能、2)分子制御、3)自動大量生産、4)電子制御-分子インタフェースを挙げ、その実現を目指す。これまでに研究チームが独自に示してきた人工細胞の構築/制御技術、分子ロボット、人工遺伝子PURE(再構成

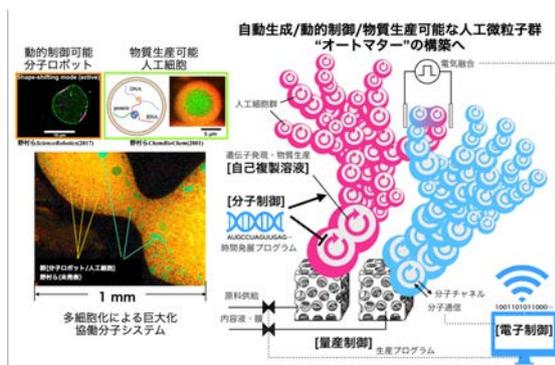


図1 本課題で研究を進める動的微粒子群の概念図。

転写・翻訳システム)発現系、人工分子による細胞機能の制御等の知見を統合して上記の課題に取り組む。サブテーマ1)PUREsystemを用いた翻訳系の諸因子など、100種類程度のタンパク質の同時発現系の構築を目指す。サブテーマ2)RNAプログラムの技術を用いて、外部から入力されるmiRNA信号にしたがい特定分子のPURE発現がON/OFF制御

される時空間制御システムの構築を目指す。サブテーマ3)人工多細胞体の材料分子の供給を制御することで、持続的に人工細胞構造を出力するジェネレータの構築を目指す。サブテーマ4)多細胞構造を構成する分子環境のデザインによって、構造そのものを走化性・走電性センサとして働かせることを目指す。これら要素技術の開発と統合(プロトタイプ構築)を行い、オートマター技術の核として育ててゆく。

【期待される成果と意義】

自己複製する人工細胞溶液の基礎セット、分子制御による遺伝子発現/抑制の自在化技術、電子-分子信号変換の基礎技術、人工細胞の大量生産制御技術等を開発・統合することで、物質科学と生命科学との融合分野における新たな情報科学的基盤の構築に挑戦する。その展開として、望まれる物質・構造を天然細胞に匹敵するような効率で生産し続ける分子システムをブラックボックスなしで利用可能とする応用研究や、既存の生命体とは異なる分子システムを有する生命モデルの基礎研究などへと広がるよう研究を進めたい。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Sato, Y., Hiratsuka, Y., Kawamata, I., Murata, S., Nomura, S.-i. M. 'Micrometer-sized molecular robot changes its shape in response to signal molecules', *Science Robotics*, 2(4), (2017), eaal3735.
- ・ Hayase, G., Nomura, S.-i. M., 'Large-Scale Preparation of Giant Vesicles by Squeezing a Lipid-Coated Marshmallow-Like Silicone Gel in a Buffer', *Langmuir*, 34 (37), (2018), 11021-11026.
- ・ 野村慎一郎, 森谷優貴, 秋吉一成, 'リボソーム/細胞間の分子通信' 日本ロボット学会誌, 28-10, (2010), 28-29.
- ・ Nomura, S.-i. M., Tsumoto, K., Hamada, T., Akiyoshi, K., Nakatani, Y., Yoshikawa, K.*, 'Gene Expression within Cell-Sized Lipid Vesicles' *ChemBioChem*, 4, (2003), 1172-1175.

【研究期間と研究経費】

令和2年度-6年度 150,300千円

【ホームページ等】

<https://sites.google.com/site/smnomuralaboratory/english>
shinichiro.nomura.b5@tohoku.ac.jp

【基盤研究(S)】 大区分J



研究課題名 多重反射による空中ディスプレイの薄型化と水中 CAVE への応用～魚に映像を見せる～

宇都宮大学・工学部・教授
やまもと ひろつぐ
山本 裕紹

研究課題番号： 20H05702 研究者番号：00284315

キーワード： 空中ディスプレイ、水中ディスプレイ、水中 CAVE、VR バイオロジー

【研究の背景・目的】

「釣り逃した魚は大きい」と言われる通り、水中のものは実際よりも大きく見える。我々は水中の世界を大気中の延長にあるかのように誤解するため、水中の大きさや奥行きを誤って認識する。このことは、水難事故において「浅瀬に見えたので川に入った」と言われることが多い背景でもある。我々は界面で光の屈折が生じることを知識として理解しているつもりであっても、見た目からの大きさや奥行きの推定は大気中で獲得された視覚機能であり、水中に対しては誤認識を補正できないのである。また、水族館において透明な水槽の壁は魚には見えずに、ぶつかることが原因で死に至る事例が問題となっている。そこで本研究では、何もない空中に映像を形成する「空中ディスプレイ」技術を水中に対して応用して、水の流れや魚の動きを妨げることのない世界初の「水中ディスプレイ」を開発する。そのためには光学系のコンパクト化が求められる。

本研究では空中ディスプレイの薄型化を実現する光学系を開発する。薄型化された空中ディスプレイを水槽の中に設置して、水中の没入型映像空間（水中 CAVE）を実現して、魚への水中映像提示の有効性を実験により明らかにすることが本課題の目的である。

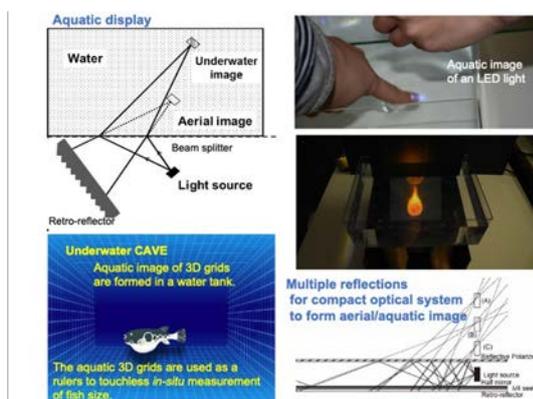


図1 本研究のアプローチ

【研究の方法】

空中ディスプレイの光学系の薄型化および水中ディスプレイを開発するとともに、水中に映像を形成する技術を用いた新しい課題について、光工学・生物学・水産学・感性メディア工学・情報工学の研究者による異分野融合により次の課題を解決する。

本研究のアプローチの概要を図1に示す。光学系の開発においては①再帰反射による空中結像(AIRR)

に偏光変調と多重反射を導入して薄型化を実現する。②水中に対して没入型の映像空間(CAVE)を世界で初めて実現する。

開発された水中映像技術を用いて新しい学術領域の創出に挑む。③水中の映像に対するヒトの奥行き知覚特性を明らかにする。④水中 CAVE システムを魚への刺激映像の提示に用いた行動生物学実験(VR生物学実験、図2)を行う。⑤養殖水槽のリモート監視システムを構築して⑥養殖魚の平均体長・平均体重を推定するシステムを構築する。

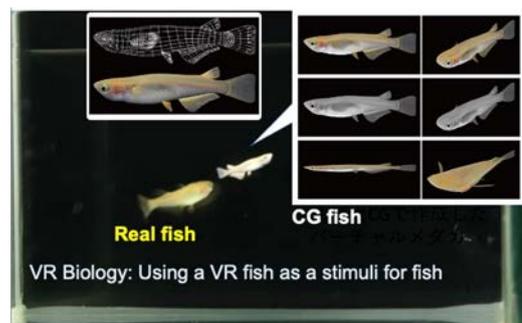


図2 水中ディスプレイを用いた
VR Biology 実験

【期待される成果と意義】

水中ディスプレイを用いることで、VR バイオロジーによる新しい生物学実験手法を開発する。また水産養殖において魚にストレスを与えることなく育成状況をモニタリングすることができる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Hirotsugu Yamamoto, Yuka Tomiyama, and Shiro Suyama, "Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR)," Optics Express, Vol.22, Issue 22, pp. 26919-26924 (2014).
- ・ 山本裕紹, 陶山史朗, 水科晴樹他: 空中ディスプレイの開発と応用展開, 山本裕紹(監修), シーエムシー出版, ISBN978-4-7813-1335-1, 2018.

【研究期間と研究経費】

令和2年度～6年度 144,900千円

【ホームページ等】

<http://www.yamamotolab.science/kibans2020-2024@yamamotolab.science>



研究課題名 AI時代を見据えたプログラム検証技術

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

こばやし なおき

小林 直樹

研究課題番号： 20H05703 研究者番号：00262155

キーワード： 高階モデル検査、プログラム検証、機械学習

【研究の背景・目的】

ソフトウェアの高信頼性を保証するためのプログラム検証技術は従来から重要であるが、近年のAI技術の台頭によって以下の観点から大きな変革を迫られつつある。(1) コンピュータによる社会システムの制御がますます進み、ソフトウェアの欠陥が従来以上に重要な影響を及ぼすため、ソフトウェアの信頼性保証のためのプログラム検証技術の重要性が増している。(2) 一方で、プログラム検証は究極には定理証明の一種であり、その一部にAI技術を活用することによって大きな進展が望める可能性がある。

(3) 人間に代わってAIによってソフトウェアが生成される時代が来ると、ソフトウェアの質および規模に大きな変化がもたらされ、これまでの検証技術では太刀打ちできなくなる可能性がある。そこで、本研究では研究代表者らがこれまで世界をリードして研究してきた高階モデル検査などのプログラム検証技術をさらに発展させつつ、そのボトルネックであった不変条件の発見などに機械学習を導入することによって上記(3)の「規模」の問題に対処するとともに、(3)の「質」の問題に対処するため、確率付きプログラムなど、これまで十分に扱ってこなかったプログラム検証技術の研究に取り組む。

【研究の方法】

次の3つの項目について並行して研究を進める。

(A) 高階モデル検査をはじめとするプログラム検証技術のさらなる発展。

高階モデル検査とは、有用なシステム検証手法としてチューリング賞の対象にもなった「モデル検査」の拡張であり、高レベル言語で記述されたプログラムの有効な検証手法として、本課題の代表者らが10年来、世界をリードして進展させてきたものである。高階モデル検査にはHORSモデル検査とHFLモデル検査の2種類があり、当初は前者に基づいて研究を進めてきたが、最近になってHFLモデル検査に基づく手法がより有効であることが判明した。そこで本項目では、HFLモデル検査に基づくプログラム検証手法の確立・発展および他のプログラム検証手法との融合を進める。また、高階モデル検査の理論に関する重要な未解決問題にも取り組む。

(B) 機械学習技術のプログラム検証への応用。

高階モデル検査は理論上の最悪の計算コストが極めて高い検証手法であるが、これまでの高階モデル検査に関する研究の進展の結果、現在ではプログラム検証器の主なボトルネックは、高階モデル検査自

体よりも検証対象のプログラムの近似に用いる述語の発見などの、ヒューリスティクスが関わる部分になっている。この部分に機械学習の技術を取り入れることでプログラム検証器の性能向上を目指す。

(C) 質の変化したプログラムの検証技術：

機械学習コンポーネントを組み込んだソフトウェアは、これまでのような人間が書いたソフトウェアとは質が異なる。例えば、機械学習コンポーネントが常に正しい答えを出力するわけではなく、確率的に振る舞うシステムとしてモデル化、検証する必要がある。そこで高階モデル検査の拡張として確率付き高階モデル検査の理論を構築するなどの研究を行う。また、実際に機械学習コンポーネントを組み込んだシステムの検証実験を通して新たな課題の洗い出しおよび対処を行う。

【期待される成果と意義】

本研究の推進によって、代表者らのグループが世界をリードして進めてきた高階モデル検査等に基づくプログラムの検証理論・技術の一層の発展につながる。特に機械学習技術の取り込みによってプログラム自動検証の実用性の大幅な進展が期待できる。AI技術の発展に伴ってコンピュータへの依存度が増す社会において、プログラム検証技術への発展を通じたソフトウェアの高信頼化の意義は大きい。

学術的には、高階モデル検査は、プログラム理論、形式言語理論、計算量理論などの多岐にわたる研究テーマであり、それへの取り組みを通して理論計算機科学全体への波及効果が期待できる。また、プログラム検証という機械学習にとつての新しい応用を通して、機械学習技術の発展にも貢献できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Naoki Kobayashi, Étienne Lozes, Florian Bruse, “On the relationship between higher-order recursion schemes and higher-order fixpoint logic”, Proceedings of POPL 2017, pp. 246-259, 2017
- ・ Naoki Kobayashi, “Model Checking Higher-Order Programs”, Journal of the ACM, 60(3), 20:1-20:63, 2013.

【研究期間と研究経費】

令和2年度～6年度 146,400千円

【ホームページ等】

<https://www.kb.is.s.u-tokyo.ac.jp/~koba/hmcai/>

【基盤研究(S)】 大区分J



研究課題名 心的イメージの脳情報表現の可視化

京都大学・大学院情報学研究科・教授

かみたに ゆきやす

神谷 之康

研究課題番号： 20H05705 研究者番号：50418513

キーワード： 認知科学、神経科学、視覚、ブレイン・デコーディング

【研究の背景・目的】

イメージは心の状態を構成する重要な要素である。刺激に誘発される知覚のほか、刺激によらない想起や睡眠中の夢、幻覚もイメージを伴う。錯視のように、刺激の物理的な特徴とは異なるイメージが形成されることもある。これらの多様なイメージは脳内でどのように生成されるのであろうか？従来の心理学や認知神経科学では、心的イメージは間接的な行動指標によって計測され、具体的なイメージ内容を可視化して解析することは困難であった。申請者らは、深層ニューラルネットワークの情報表現を用いた脳情報デコーディングという独自の技術の世界に先駆けて開発し、知覚・想起イメージの一部の可視化に成功している（図1）。本研究では、イメージの階層的信息処理という視点から上述の可視化アプローチを拡張し、錯視や幻覚を含む多様なイメージが生成される脳部位や情報処理方式を解明する。



図1 深層イメージ再構成

【研究の方法】

本研究課題では、感覚野の複数の脳部位にイメージ特徴の階層的表現が存在すると仮定し、多様な心的イメージが、階層的脳情報表現のどのような処理にもとづいて生成されるかを明らかにする。とくに、イメージが表現される階層やボトムアップ/トップダウン処理の違い、リカレントな情報処理の貢献、頭頂葉や前頭前野からの影響に注目する。

イメージは主観的な現象であり、そのことが科学的探求の妨げとなってきた。本研究課題では、研究代表者が開発してきたブレイン・デコーディング技術と深層ニューラルネットワーク（deep neural network, DNN）を融合した脳情報表現可視化技術によって、この問題を克服する。ヒトの脳活動パターンを同じイメージ内容に対応する DNN 階層特徴量として数値化し、DNN 階層特徴量をもとづいて画像を生成することによって、多様な心的イメージの生成プロセ

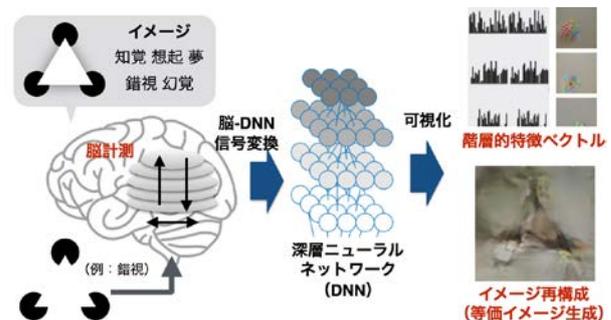


図2 本研究課題のアプローチ

スを可視化する（図2）。

【期待される成果と意義】

本研究課題のアプローチにより、主観的イメージ内容を具現化し、内容や特徴のレベルの詳細な解析が可能となり、心理学、認知神経科学にパラダイムシフトをもたらす可能性がある。また、解読した心的イメージを用いた情報通信やブレイン-マシン・インターフェースの開発、精神疾患患者の心理状態の診断、新たな芸術表現の創出等に寄与することが期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Shen, G., Horikawa, T., Majima, K., Kamitani, Y., 2019. Deep image reconstruction from human brain activity. PLOS Computational Biology 15, 1006633. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1006633>
- Horikawa, T., Kamitani, Y., 2017. Generic decoding of seen and imagined objects using hierarchical visual features. Nature Communications 8, 15037. <https://doi.org/10.1038/ncomms15037>

【研究期間と研究経費】

令和2年度～6年度 151,300千円

【ホームページ等】

<https://kamitani-lab.ist.i.kyoto-u.ac.jp/>



研究課題名 次世代ソフトウェアエコシステムのための基盤・展開技術

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授

まつもと けんいち

松本 健一

研究課題番号： 20H05706 研究者番号：70219492

キーワード： ソフトウェア再利用、マイクロサービス、AI 技術応用、ブロックチェーン技術

【研究の背景・目的】

IoT や AI 等の新たなデジタル技術の進展は、ソフトウェアの重要性と多様性をますます高めている。より高い品質のソフトウェアを社会全体で蓄積、共有、循環するための、より一層の技術革新が求められている。

本研究では、AI、自然言語処理、サービス化、ブロックチェーン等の最新デジタル技術を積極的に活用、連携させることで、ソフトウェア開発運用の今日的な技術的課題を解決し、これからのソフトウェアエコシステムを支える技術へと展開する。具体的には、「技術的負債の増加」、「人的資源の不足」、および、「技術情報の多様化」といった技術的課題の詳細な解析とその解決に向けた基盤・展開技術の開発を行う。ソフトウェア開発運用に係る無駄を極力排除することで高い経済性と持続可能性を実現し、より一層の技術革新と新たな技術体系の構築にもつながる創造性の高い成果を目指す。

【研究の方法】

ソフトウェア開発運用の技術的課題を次に示す3つの「学術的問い (Research Question)」として明確に示し、「アップサイクリング」、「適格性」、「外部技術情報とのリンク」といった独自の着想・アプローチに基づく研究開発でその答えに迫る (図1参照)。

RQ1: プロダクト、特に、プログラムコードのアップサイクリングは可能か?

プログラムコードに内在する技術的負債の様態を解明することを通じて、負債とされるコードを価値あるソフトウェア資産 (マイクロサービス等) に転換 (アップサイクリング) することは可能か?

RQ2: 人と AI を適材適所に配置することで人的資源の不足解消は可能か?

ソフトウェア開発運用における人的資源の様態の解明を通じて、開発運用における人と AI の適格性評価 (Competency Evaluation) を実現し、開発運用の生産性向上と開発運用者のスキル転換を促進することは可能か?

RQ3: 外部技術情報ともリンクする堅牢で持続可能な品質管理は可能か?

ナレッジコミュニティや学術論文誌等から得られる外部技術情報を、ソフトウェアプロダクトと紐づけ、改ざんが不可能で第三者検証も可能な形式で保持することで、技術的負債の抑止・低減することは可能か?

研究開発項目	独自技術・アプローチ
プロダクトのアップサイクリング	コードクローン解析 レガシーソフトウェアからのサービス抽出 品質属性に基づくAPI価値考察 ソフトウェアライブラリ間の依存度評価
人とAIの適材適所配置	貢献度等に基づく適格性評価 スキル指標とベンチマーキング ソフトウェアエコシステムのモデル化・可視化
外部技術情報ともリンクする品質管理	ブロックチェーンを用いたソフトウェアビルドプロセス記録・監視法 (特許第6692013号)

図1 研究開発の概要

【期待される成果と意義】

本研究の成果は、ソフトウェア開発運用における3つの概念「再利用」、「人的資源」、および、「品質管理」を拡張し、新たな技術体系の構築につながる。例えば、プログラムコードのアップサイクリングは、ソフトウェア開発運用作業の大半を、「作る、修正する」から「選ぶ」にシフトする。人とAIの適材適所配置は、ソフトウェア開発運用の組織や体制づくりを変革し、より創造的な取り組みとスキルアップを可能にする。そして、外部技術情報ともリンクする品質管理は、学術情報の更なる活用やデジタルトランスフォーメーションの進展にも資することになる。

本研究の意義は、ソフトウェア開発運用者を煩雑な作業から開放すると共に、広範な最新デジタル技術がソフトウェアを核として結ばれる「次世代のソフトウェアエコシステム」を実現することにある。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ C. Tantithamthavorn, S. McIntosh, A. E. Hassan, and K. Matsumoto, "The Impact of Automated Parameter Optimization on Defect Prediction Models," *IEEE Transactions on Software Engineering*, Vol.45, No.7, pp.683-711 July 2018.
- ・ H. Hata, C. Treude, R. G. Kula, and T. Ishio, "9.6 Million Links in Source Code Comments: Purpose, Evolution, and Decay," *Proc. of 41st International Conference on Software Engineering (ICSE 2019)*, pp.1211-1221, May 2019.

【研究期間と研究経費】

令和2年度～6年度 145,400千円

【ホームページ等】

<https://naist-se.github.io/FIT4NXSE>
fit4nxse@is.naist.jp