

穴田 啓晃
Hiroaki Anada

阿部 香澄
Kasumi Abe

今井 浩
Hiroshi Imai

太田 和俊
Kazutoshi Ohta

小串 典子
Fumiko Ogushi

加堂 大輔
Daisuke Kadoh

亀田 達也
Tatsuya Kameda

川島 誠
Makoto Kawashima

酒井 一博
Kazuhiro Sakai

佐々木 博昭
Hiroaki Sasaki

永田 毅
Takeshi Nagata

宮寺 隆之
Takayuki Miyadera

山田 敏史
Toshifumi Yamada

田中 豪太
Gota Tanaka

INSTITUTE FOR MATHEMATICAL INFORMATICS

FACULTY OF MATHEMATICAL INFORMATICS
MEIJI GAKUIN UNIVERSITY

ANNUAL REPORT
No.1, 2024



An abstract graphic consisting of numerous small white dots connected by thin white lines, forming a complex, interconnected network that resembles a molecular structure or a data network. The dots are distributed across the entire page, with some clusters being denser than others.

INSTITUTE FOR MATHEMATICAL INFORMATICS

**ANNUAL REPORT
No.1, 2024**

目 次

巻頭言	1
研究報告	
A Note on Group-Dependent Languages of Simultaneous Equations	Hiroaki Anada 5
ロボットシステムを介した人と人のつながりの研究	阿 部 香 澄 9
TCSセミナーとAI黎明期のいくつかの論文について	今 井 浩 13
Derived Graph and Lattice Gauge Theory	Kazutoshi Ohta 15
A Theory of Voluntary Cooperation in Public Goods Provision	Tatsuya Kameda 17
E_8 格子の数理	酒 井 一 博 21
2つの潜在変数に関する統計モデルの同定可能性	佐々木 博 昭 23
生成AIを活用した顔表情からの表情コピーと感情マップ生成	永 田 毅 25
量子論における合成系の構造と両立不可能性	宮 寺 隆 之 31
研究プロジェクト	
「データ駆動型社会物理」研究会 開催報告	小 串 典 子 37
第23回高性能計算物理勉強会の報告	加 堂 大 輔 41
テンソルネットワーク法を用いた量子もつれに関する共同研究の報告	加 堂 大 輔 43
	田 中 豪 太
研究集会および特別講演会の報告	川 島 誠 45
研究集会, 特別講演会および共同研究の報告	川 島 誠 47
素粒子現象論に対する数値的アプローチ	山 田 敏 史 49
研究所イベント一覧	51
所員・助手・専門研究員紹介	52
編集後記	53
年報執筆要項	54

巻頭言

明治学院大学情報数理学部は2024年4月に設置されました。明治学院大学がそれまでの文系総合大学であったところを、新たに理系学部を設置して理系も有する総合大学へと展開するものです。その中で、教員を主体に学部内に情報数理科学研究所を、情報数理科学に関する研究推進を行う組織として同時に配置しました。

学部の教員は本研究所の所員となり、研究所の運営の核となり、そこに所員により学部の中で研究を行う専門研究員を本研究所所属とし、さらに所員によって提案された学内外の研究者を、研究所会議で承認を通して研究員として活動して頂いています。この2024年度年報が発刊される2025年6月現在で、所員16名、助手の研究員1名、学内他学部より研究員1名、学外より研究員4名より構成されています。

研究所では、発足時より月に1度程度の頻度で所員・研究員のセミナーを行っており、本研究所構成員が互いの研究について理解を深め、この研究所の活動として共同研究等を推進する土台を構築しています。また、所員よりプロジェクトの申請を受け、研究所規程に従って研究費を提供するなど、所員・研究員の研究を支援することも行っています。2024年度はそのようなプロジェクトから、国際ワークショップの開催も行っており、また学外講師を招いたセミナーも開催しています。

情報数理科学研究所は、情報数理学部内の組織として活動していますが、明治学院大学の中で人文・社会科学系の諸学部と情報数理学部が有機的に連携する組織として、大学附置研究所として情報科学融合領域センター (<https://mgu-fusion.jp/>) が設置されています。情報数理学部教員はこのセンターの研究員として参画しており、文理を融合した学際的な研究推進を行っているところです。

情報数理科学研究所では、産学協創活動にも取り組んでいます。2024年度でも複数の企業との共同研究を立ち上げており、企業に学術指導的な活動を提供しています。2024年度の理系学部が初めてできたところで、関連規程についても整備に取り組み、これからの社会での活動を推進する基盤を構築したところです。

研究所の活動を年報として発行することにも取り組んでおり、本年報はその創刊号となります。研究所主任の穴田教授と研究所事務担当の柴田さんに発刊に向けて企画・運営を行って頂いた成果となっています。

今後とも情報数理科学の分野において、広く社会に貢献する活動を推進していきますので、どうぞよろしくお願いいたします。

情報数理科学研究所 所長 今井 浩

The background of the entire page is a complex, abstract network of white dots connected by thin white lines on a light gray background. The dots are distributed across the page, with some acting as central hubs from which many lines radiate outwards, creating a sense of interconnectedness and data flow. The lines vary in length and density, contributing to a dynamic and modern aesthetic.

RESEARCH REPORT

研究報告

A Note on Group-Dependent Languages of Simultaneous Equations

Hiroaki Anada*

Abstract

We note that a type of group-dependent language which consists of simultaneous equations in bilinear groups are suitable to attain security against collusion attacks. Actually the Groth-Sahai proof system is capable of generating proofs of knowledge of witnesses of such language.

1 Introduction

A zero-knowledge proof system Π [5] is an interactive proof system between a prover P and a verifier V , where P has unbounded computational power, while the verifier V has only polynomialtime power. On input a statement x that belongs, or does not belong, to a language L , P and V interact with each other by sending and receiving messages, for polynomially many times, then V returns 1 or 0, which means “ x is accepted” or “rejected”, respectively. Π should satisfy three properties. The first is completeness, which means that, when x is in L , x is accepted by V with overwhelming probability. The second is soundness, which means that, when x is not in L , x is accepted by V with only negligible probability. The third is zero-knowledge, which means that there is a polynomial-time algorithm Sim called a simulator that takes $x \in L$ as input and generates data that cannot be distinguished from transcripts of honestly generated messages, by any given polynomial-time algorithm D called a distinguisher. A weaker variant of zero-knowledge property is witnessindistinguishability [3], which means that, when there are two

witnesses of $x \in L$, it is computationally difficult for V to tell which witness was used. A non-interactive proof system is also defined for completeness, soundness and zero-knowledge, or witness-indistinguishability. The Groth-Sahai proof system [6, 7] is a noninteractive witness-indistinguishable proof system for group-dependent languages of bilinear groups [6, 2].

Collusion attacks are a strong threat in cryptography. That is, an adversary brings together witnesses which are issued to different identifiers, then the adversary tries to make the verifier accept statements each of which is on the different identifiers *as if those witnesses are for a single identity*.

In this note, we remark that the collusion resistance can be attained in the case of a groupdependent language of bilinear groups. By making “pairing-product equations” a simultaneous equation system, the corresponding statement is a proposition claiming a single identity in the witness-indistinguishable way [1]. More generally, the simultaneous equation system can be captured as a statement claiming existence of a set of legitimate identities. A proof of such a statement is generated in the standard way by using the Groth-Sahai proof system.

2 Preliminaries

\mathbb{N} denotes the set of natural numbers. $[n]$ denotes the subset $\{1, \dots, n\} \subset \mathbb{N}$. \mathbb{Z}_p denotes the residue class ring of integers modulo a prime number p . λ denotes the security parameter, where $\lambda \in \mathbb{N}$. A function $P(\lambda)$ is said to be negligible in λ if for any given positive polynomial $\text{poly}(\lambda)$ $P(\lambda) < 1/\text{poly}(\lambda)$ for

* hiroaki.anada@mi.meijigakuin.ac.jp

Let L denote the set of coefficients of the equation system (11) and $W(x)$ denote the set of solutions for $x \in L$:

$$L := \{x \in (\prod_i \hat{\mathbb{G}} \times \prod_j \check{\mathbb{G}} \times \prod_i \prod_j \mathbb{Z}_p)^n \mid x = ((\hat{B}_{ki})_i, (\hat{A}_{kj})_j, (\gamma_{kij})_{i,j})_{k=1}^n\}, \quad (12)$$

$$W(x) := \{w \in \prod_i \hat{\mathbb{G}} \times \prod_j \check{\mathbb{G}} \mid w = ((\hat{W}_i)_i, (\check{W}_j)_j) \text{ satisfies (11) for } x\}, \quad (13)$$

$$R := \{(x, w) \in (\prod_i \hat{\mathbb{G}} \times \prod_j \check{\mathbb{G}} \times \prod_i \prod_j \mathbb{Z}_p)^n \times \prod_i \hat{\mathbb{G}} \times \prod_j \check{\mathbb{G}} \mid (x, w) = (((\hat{B}_{ki})_i, (\hat{A}_{kj})_j, (\gamma_{kij})_{i,j})_{k=1}^n, ((\hat{W}_i)_i, (\check{W}_j)_j)) \text{ satisfies (11)}\}. \quad (14)$$

For a fixed parameter set pp , we call L , $W(x)$ and R the group-dependent language with pp , the witness space of x with pp and the relation with pp , respectively.

Intuitively, our language would be the set of coefficients of *simultaneous* equation systems. We define the language in the case of the above groupdependent language of bilinear groups. For a polynomially bounded integer q , we first prepare for q independent copies of an equation system (11) by introducing variables $(\hat{X}_i^a)_i$ and $(\check{Y}_j^a)_j$, as follows, where each a denotes an index. For $a \in [q]$,

$$\begin{cases} \sum_i X_i^a \cdot B_{1i}^a + \sum_j A_{1j}^a \cdot Y_j^a + \sum_i \sum_j X_i^a \gamma_{1ij} Y_j^a = t_{T1}^a, \\ \vdots \\ \sum_i \hat{X}_i^a \cdot \check{B}_{ni}^a + \sum_j \hat{A}_{nj}^a \cdot \check{Y}_j^a + \sum_i \sum_j \hat{X}_i^a \cdot \check{Y}_j^a = t_{Tn}^a. \end{cases} \quad (15)$$

Now we impose a constraint that the above q equation systems have common variables. Formally, we prepare for subsets of indices as

$$\text{For each } i \in I, \text{ fix an } M_i \subset [q], \quad (16)$$

$$\text{For each } j \in J, \text{ fix an } N_j \subset [q]. \quad (17)$$

Then we introduce the following constraints.

$$\begin{cases} \text{For } \forall i \in I, (\hat{X}_i^a)_{i \in M_i}^a \text{ are common,} \\ \text{For } \forall j \in J, (\check{Y}_j^a)_{j \in N_j}^a \text{ are common.} \end{cases} \quad (18)$$

Definition 1 Let L be the language (12). The subset of the q -Cartesian product of L with the constraint (18) is our language of a simultaneous equation system.

How useful is our language? An example in cryptography is the following case.

$$M_1 = [q], M_2 = \dots = M_{|I|} = \emptyset, \quad (19)$$

$$N_1 = \dots = N_{|J|} = \emptyset. \quad (20)$$

In the case the following holds.

$$\hat{X}_1^1 = \dots = \hat{X}_1^q. \quad (21)$$

So, we are able to put (21) as a single variable \hat{X}_1 . In a real case, the value of \hat{X}_1 can be an *anonymous identifier*. The Groth-Sahai proof system is able to generate a proof of knowledge of the identifier in witness-indistinguishable (and noninteractive) way. (See [1] for more details.)

References

- [1] Hiroaki Anada. Decentralized multi-authority anonymous credential system with bundled languages on identifiers in bilinear groups. *Journal of Surveillance, Security and Safety*, 5(3), 2024.
- [2] Alex Escala and Jens Groth. Fine-tuning Groth-Sahai proofs. In *Public-Key Cryptography - PKC 2014-17th International Conference on Practice and Theory in Public-Key Cryptography, Buenos Aires, Argentina, March 26-28, 2014. Proceedings*, pages 630-649, 2014.
- [3] Uriel Feige and Adi Shamir. Witness indistinguishable and witness hiding protocols. In *Proceedings of the 22nd Annual ACM Symposium on Theory of Computing, May 13-17, 1990, Baltimore, Maryland, USA*, pages 416-426, 1990.
- [4] Steven D. Galbraith, Kenneth G. Paterson, and Nigel P. Smart. Pairings for cryptographers. *Discrete Applied Mathematics*, 156(16):3113-3121, 2008.

- [5] S Goldwasser, S Micali, and C Rackoff. The knowledge complexity of interactive proof-systems. In *Proceedings of the Seventeenth Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, STOC '85, pages 291-304, New York, NY, USA, 1985. ACM.
- [6] Jens Groth and Amit Sahai. Efficient non-interactive proof systems for bilinear groups. In *Proceedings of the Theory and Applications of Cryptographic Techniques 27th Annual International Conference on Advances in Cryptology*, EUROCRYPT'08, pages 415-432, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer-Verlag.
- [7] Jens Groth and Amit Sahai. Efficient noninteractive proof systems for bilinear groups. *SIAM J. Comput.*, 41(5):1193-1232, 2012.

ロボットシステムを介した人と人のつながりの研究

阿部 香澄*

Abstract

人はどのように他者と関係を築き、その過程で個々の性質はどう影響するのだろうか。Human-Robot Interaction (HRI) 研究は、ロボットとの関わりを通して、人間理解と、より良いシステム設計を目指す分野である。著者はその中でも特に子どもとのやりとりに焦点を当てた Child-Robot Interaction (CRI) に関心を持つ。例えば、保育者が操作するロボットを介した子どもとの関わりを観察することで、ロボットを介すことで生まれる特殊な対話環境により、普段は捉えにくい関係構築のメカニズムや、パーソナリティの与える影響が見えてくる。本稿では、著者が取り組んでいる CRI 研究とその魅力について紹介する。

1 はじめに

「人の心を理解したい」「人を支援したい」という根幹の思いを持つ著者にとって、大変魅力的な研究分野がある。それが Human-Robot Interaction (HRI) である。中でも子どもとのコミュニケーションに焦点を当てた Child-Robot Interaction (CRI) の魅力は、修士課程の頃より著者の心を捉えて離さない。情報数理科学研究所に参画して初年度の年報となる本稿では、CRI 研究の魅力を異なる専門分野の方々にも伝えるべく、研究の立ち位置から具体的な研究事例まで紹介する。

2 Child-Robot Interaction

人間情報学という分野の Human-Robot Interaction (HRI) は、人間とロボットの相互作用に関する学際的な研究分野で、ロボットが人間とどのようにコミュニケーションを取り、

協力し、共存するかを探究する学問である。ただし、著者の研究は HRI の主流とは少し異なる方向を向いている。著者は、ロボットとの関わりを通じて人間理解、特に心理的な理解を深め、人の助けになるロボット技術や支援システムの開発を重視している。この点では、感性情報学や認知ロボティクス、人間工学と近い。

具体的には、ロボットとのインタラクション（相互作用、コミュニケーション）を通じて、以下のような問いを探究している。

- 人はどのように他者とやり取りし、関係を築くのか
- その過程で個々の性格や特性がどのように影響するのか
- どのような支援が求められるのか

著者は特に子どもとのインタラクション (Child-Robot Interaction, CRI) に焦点を当てている。CRI の魅力は、人やコミュニケーションの理解に繋がること（例：どうすれば子どもと仲良くなれるか）、人の支援に貢献できること（コミュニケーション支援や育児支援のシステムに応用できる点）、子どもの特性が人間理解に適すること（子どもは内的状態が行動に直結して現れるため、本質が見えやすい）にある。

このように CRI は魅力的な分野であるが、一方で子ども実験の実施の難しさもあり、海外では研究会などが存在するが、日本国内では研究者が少ない。そこで、この分野への参入障壁を下げ、盛り上げたいと考え、インタラクション研究の先生方とともに、2023年に日本ロボット学会の「子ども中心のロボティクス研究専門委員会」を立ち上げた。これから多くの方に興味を持ってもらいたいと考えている。特に、CRIはロボット工学、人工知能、心理学、社会学、デザインなど、複数の学問領域が交差する分野であり、これらの学部や分野の研究者が集まる本学においては、相性が非常に高い。今後

* k.abe@mi.meijigakuin.ac.jp

の連携可能性を楽しみにしている。

3 子どもとのコミュニケーションの解明

著者の第一の研究テーマは、子どもとのコミュニケーションの解明である。ロボットを介した子どもとのコミュニケーションを観察し、遊びが成立する因子を研究するものである。

その一つとして、人見知りの子どもとの良好な関係の構築方法を明らかにしようと試みた [1]。実験は、子どもの専門家である幼稚園教諭にロボットを遠隔操作してもらい、ロボットと初対面の未就学児と遊んでもらうという形式で行った。この実験では、子どもとロボットのコミュニケーションを観察し、データを収集した。研究メソッドの肝は、ロボットを介することで場に制約を設けることである。例えば幼稚園教諭ごとに異なる声の高さや抑揚をロボットの合成音声で統一化するなど、コミュニケーションに関わる変動要素を少なくし、通常の対話環境では捉えにくいコミュニケーション要素を数値的に捉えやすくする。

分析結果から、人見知りの子どもとの関係構築には、親密さを高めるための方法と、不安を和らげるための方法が必要だということがわかった。直感的には、「どこから来たの?」といった質問で親密さを表現したくなるが、不安を取り除くには別のアプローチが必要であることが確認された。実際、会話を通じて親近感が増すのは人見知りでない子どもだった。

4 人と人のつながりを支援するシステムへの応用

第二の研究テーマは、人と人のつながりを支援するシステムへの応用である。最近では、このテーマに特に注力して研究を進めている。具体的には、家庭内育児支援システムの研究である。

よちよち歩き期 (Toddler期) の乳幼児を育てる家庭内で、単独育児 (いわゆるワンオペ) をしている親は、「Parenting Daily Hassles (PDH)」という育児に関するストレス要因にさらされる。PDHは、日常的な些細なことが積み重なることで大きな心理的負荷となり、ワンオペの場合はその負担が一人に集中する。こ

れによって親の負担や否定的な評価が増し、不適切な育児行動が増え、子どもは承認欲求が強まり、さらなるPDHが増加するという悪循環が生まれると仮定した。

そこで、ロボットシステムを使って単独育児を遠隔共同育てに転換し、現代版の社会全体での共同子育てを実現できると考えた。

まず、Toddler期の乳幼児と遠隔コミュニケーションを成立させるツールとして、身体レベルのプリミティブなやりとりができるアバターロボット ChiCaRo を開発した [2]。このロボットを使った家庭実験で、乳幼児と祖父母がロボットを介して交流する様子を観察し、親の変化を調査した。その結果、ロボットを介した交流が祖父母と孫の関係にポジティブな影響を与え、親からも食事作りの時間が楽になった、子どものイライラが減って自分のイライラも減った、といったことが確認された [3]。

この研究成果は、スピノフベンチャーを通じて社会実装を目指している。

5 チームで生み出すCRIの成果と展望

CRIの研究は、子どもの成長や発達、それを取り巻く周囲の支援がどのように機能するかを解明し、新たなサポートのアプローチを提供できる可能性を秘めている。CRI研究の魅力の一つは、多様な分野の協力による相乗効果によって成果を生み出せる点にある。ロボットの実現には、機械、電気、ソフトウェア、アルゴリズムなど多くの異なる専門領域が絡み合う総合格闘技のような分野であり、加えてそれをういた支援の実現には、心理学、保育学、社会学など、異なる専門知識を持つ研究者たちの協力が不可欠である。

そのため、心理的安全性を重視したチームビルディングが重要であり、学生や企業、外部のメンバーとの協力を強化している。こうした多様なメンバーとの協力によって相乗効果生まれ、一人では達成できない成果が得られることに大きな喜びを感じている。

最終的に、CRI研究の魅力は、子どもとの関わりを深めるロボット技術が育児や教育、発達支援における価値を創出する点にある。少子化が進んで市場が縮小しているという見方もあるが、子どもは未来の社会の担い手であり、この

分野へのアプローチは将来の日本に大きな影響を与えると信じている。

著者は今後も「人と人のつながり」を科学し、心のぬくもりのある社会の実現に貢献する技術を開発し続けることを目指している。人と人のつながりを支援する技術が、社会全体で広く活用され、より良い社会の実現に繋がると信じている。

References

- [1] 阿部香澄, 日永田智絵, アッタミムハンマド, 長井隆行, 岩崎安希子, 下斗米貴之, 大森隆司, 岡夏樹, “人見知りの子どもとロボットの良好な関係構築に向けた遊び行動の分析”, 情報処理学会論文誌, Vol.55, No.12, 2014
- [2] Kasumi Abe, Masahiro Shiomi, Yachao Pei, Tingyi Zhang, Narumitsu Ikeda, and Takayuki Nagai, “ChiCaRo: tele-presence robot for interacting with babies and toddlers,” Advanced Robotics, Volume.32, Issue 4, pp.176-190, Feb. 2018
- [3] 阿部香澄, 塩見昌裕, 日永田智絵, 長井隆行, “乳幼児と祖父母の交流を増やす遠隔共同育児の試み：核家族社会におけるテレプレゼンスロボットを介した育児スタイルの提案”, 日本赤ちゃん学会第18回学術集会, 2018

TCS セミナーとAI黎明期のいくつかの論文について

今 井 浩

1. TCS セミナー活動

情報数理科学研究所の活動の1つとして TCS セミナー (TCS は Theoretical Computer Science の略) 開催を10月に提案し、2024年度では2回のセミナーを行った。

第1回は、鈴木大慈先生 (東京大学情報理工学系研究科数理情報学専攻教授) に「2024年 Nobel 物理学賞の解説と深層学習理論の先端」という演題で、2025年1月16日15時から16時にオンラインで講演頂いた。講演の前半では、2024年 Nobel 物理学賞についての解説を行い、後半では深層学習に関する理論研究の最先端成果について説明された。最先端成果の中には、数学の特定分野等では、現在の生成AIは博士学位取得者以上の問題回答能力を持っていることなども触れられた。その後、深層学習の研究の歴史に関しての様々なことで、たとえば確率的勾配降下法は1950年代に統計分野で提案されていたことなど解説頂いた。それが動機ともなり、本稿のようにまとめる発想に至り、AI 研究黎明期のいくつかの論文について若干の私見を含めまとめている。

なお、第2回セミナーは、情報科学融合領域センター主催のセミナーとして講演者の依頼等を担当した。そのセミナーでは、横井優先生 (東京科学大学情報理工学院数理・計算機系准教授) に「マッチングの安定性とサイズ最大化」について1月17日に講演頂いている。

2. 第1期ニューラルネットワーク研究ブーム

2.1. AI

Artificial Intelligence (AI; 人工知能) は、1956年のDartmouth会議によって提唱されたとされている。その会議を組織した原動力となったのは、論理的な記号処理によるAIを1970年前後から推進したMcCarthy, MinskyとともにIBM 701の設計者のRochesterそして情報理論の創

設者のShannonである。この中で、Minskyは1950年代にはニューラルネットワーク関係の研究をしていた一方で、第1次ニューラルネットワーク研究ブームに終焉をもたらしたと象徴的に言われるMinsky, PapertのPerceptronsと題した1969年の本の著者でもある。

以下では、その題のパーセプトロンに関するいくつかの論文について、ほぼ知られていることであるが、現代的な観点から見たポイントを述べる。

2.2. 人工ニューロン

McCulloch, Pitts [2] は、1943年の論文で、人工ニューロンを導入し、人工ニューラルネットワークの基礎を与えた。人工ニューロンを論理計算の観点からまとめているという観点は、Wienerのサイバネティクスやなどで高く評価されていたところで、現代においても種々観点から再評価されるべきと思われる。

おおまかに書くと、人工ニューロンは0か1の値をとる複数の入力に対し、各入力に対する重みパラメータを用いた線形の閾値関数で0か1の値を出力するものになっている。それをネットワークで接続した際の計算について、数理論理の理論で考察している。その点、論理関数の研究をしているとも考えることができる。

論理設計の理論は、19世紀のBooleによって研究され、Dartmouth会議で名前も出たShannonが1937年のMITでの修士論文でBoole代数を用いて現在の論理回路設計の基礎を与えたと言われるが、それとは独立な論理関数構成に関する成果といえる。

McCulloch, Pittsの論文は、その後のオートマトン研究の基礎ともなっており、また論文ではTuringマシンとの計算可能性に関する能力が等価であることが触れられている。

2.3. パーセプトロン

パーセプトロンはRosenblatt 論文 [4, 5] に

よって提案され、実装までされた最初期のニューラルネットワークである。ときに、「単純パーセプトロン」という名で、入力層と出力層のみのニューラルネットワークを扱う場合があるが、Rosenblattの提案したものは[4]では4層(2層の中間層)のものを、[5]では3層(1層の中間層)のものを提案している。

パーセプトロンはこのように多層であるが、Rosenblattは当時の脳科学的知見から、出力層へ入る閾値関数の重みをパラメタ(変数)として学習し、その前段階のところではランダムな接続のみを考えていた(単純パーセプトロンと混同される一因かもしれない)。しかし、それだけでは線形分離できないデータから学習できないことがわかっていて、現代では線形分離できない例として、論理関数NANDの学習ができないことが顕著な例として喧伝される場合もあるが、NAND学習は中間層に1つニューロンを配置するだけで解ける簡単な事例である。それに対して、Minsky, Papert [3]では、Rosenblattのパーセプトロンが学習不可能な問題(線形分離できない2種データの識別問題)として、平面上で2つのギザギザを重ねる互い違いに近づけた入力の問題が、パーセプトロンでは学習できないことを指摘していた。

中間層に入るところの重みを学習対象とはしておらず、したがって中間層の重みをパラメタを含めた学習アルゴリズムは知られおらず、また数理的にも構築できていなかった。

2.4. 多層ニューラルネットワークの学習

甘利[1]は、3層のニューラルネットワークで、中間層に関する重みをパラメタとして、そのモデルでデータから学習する学習アルゴリズムを初めて与えている。それは現在の確率的勾配降下法の源流となっている。

甘利 [1] の本では、九州大学で指導した修士院生の修論の成果として、[3] で示されたギザギザのデータの問題を4層のニューラルネットワークでコンピュータで学習できた結果を示している。計算過程の図からその計算過程も見取れる。ただし、出力層に入るところは最大値関数になっており、それは容易に複数ニューロンで実現できると言及されている。

パーセプトロンは2種データでそれが線形分離されていない場合は学習できないことで第1

期のニューラルネットワークブームが終焉したという理解は、上記のような観点で表層的であり、実際にはそれを乗り越える学習アルゴリズムは計算実験とともに当時示されていた。

一方、当時のコンピュータの性能では、本当に小規模の問題しか解けず、当初ニューラルネットワークで期待された文字・画像認識等が有用なものを構築するのが難しい状況であり、並行して進んでいたコンピュータでは記号処理による汎用処理が適しているとされて、その方向にAI研究が進み、それも小規模問題しか解けないということで、第1期AIブームが終わったともいえる。それに伴い、米国では、ニューラルネットワークというキーワードを入れた申請は10年の間採択されなくなったという風に伝えられている。

3. 現在のニューラルネットワークへ

第1期ブームの終焉に伴ってニューラルネットワーク研究分野は冬の時代を迎え、再興には1980年代の第2次ブームを待つこととなる。そのブームも1990年代後半でしほみ、そしてついに第3次ニューラルネットワークの研究が深層学習として2012年頃からもたらされ、現在ではそれがさらに発展している。ここまでの半世紀以上にわたる研究を理解しておくことは、将来に資するものである。

参考文献

- [1] 甘利俊一：情報理論Ⅱ—情報の幾何学的理論—。共立出版、1968(発売月日1月5日)。
- [2] W. McCulloch, W. Pitts: A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. The Bulletin of Mathematical Biophysics. 5:4 (1943) 115-133.
- [3] M. Minsky, S. Papert. Perceptrons. MIT Press, 1969.
- [4] F. Rosenblatt: The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain". Psychological Review 65:6 (1958) 386-408.
- [5] F. Rosenblat, Principles of Neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms. Spartan Books, 1962.

Derived Graph and Lattice Gauge Theory

Kazutoshi Ohta^{*}

Abstract

In this note, we explain the relationship between the derived graph and gauge theory on the discrete space-time, aiming to clarify the discussions in a part of our recent paper [1].

1 Derived Graph

A graph $\Gamma = (V, E)$ is a mathematical structure that consists of a set of vertices (or nodes) V and a set of edges (or links) E that connect pairs of vertices.

We can also consider mathematical structures over the graphs. For example, we can assign a representation space \mathcal{H} of the group G to each vertex $v \in V$, which is called a voltage assignment of the graph. So the derived graph Γ^G of the voltage assignment graph has the pairs (v, f) as its vertices, where $v \in V$ and $f \in \mathcal{H}$. For each edge $e = (v, v') \in E$, there is a group element $g_e \in G$ and edges of the derived graph are given by the pairs (v, f) and $(v', \rho(g_e)f)$, where $\rho(g_e)$ is a d -dimensional representation of g_e and acts transitively on the representation space $f \in \mathcal{H}$.

The derived graph of the voltage assignment is analogous to the fiber bundle in the differential geometry, which forms the mathematical framework of gauge theory in physics. The derived graph can be regarded as a fiber bundle over a discrete base space (the graph), where \mathcal{H} becomes the fiber space.

In typical applications of the derived graph, the group G is a finite group, and the representation is chosen to be the regular representation. In this case, the derived graph

also becomes a finite graph, composed by copies of the original graph Γ derived by G . However, for applications gauge theory, the group G becomes a Lie group. In such cases, the derived graph is constructed over a continuous group manifold.

2 Artin-Ihara L -function

For the derived graph Γ^G , we can define the Artin-Ihara L -function [2] as follows. Let C be a prime cycle, which cannot be written as a concatenation of repeated cycles and does not contain the bumps. The Artin-Ihara L -function is given by an infinite product over the conjugacy class of prime cycles in the base graph Γ

$$L_\Gamma(q; \rho) = \prod_{[C]} \det(I_d - \rho(g_C)q^{\ell(C)})^{-1}, \quad (1)$$

where g_C is an ordered product of the group elements g_e along the cycle C , $\ell(C)$ is the length of the cycle C , and $\rho(g_C)$ is a d -dimensional representation of the group element g_C .

In physics terms, the Artin-Ihara L -function is a generating function of all possible Wilson loops along the cycles on the graph Γ . In fact, rewriting (1) using the identity $\log \det = \text{Tr} \log$, we obtain

$$L_\Gamma(q; \rho) = \prod_{[C]} \exp \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{q^{k\ell(C)}}{k} \text{Tr} \rho(g_C^k) \right\},$$

which generates gauge-invariant operators (the Wilson loops) along the cycles on the graph Γ , expressed through products of characters $\text{Tr} \rho(g_C^k)$.

3 Lattice Gauge Theory

Although the Artin-Ihara L -function (1) is

^{*} kazutoshi.ohta@mi.meijigakuin.ac.jp

generally an infinite product, Ihara showed that it can be expressed as a rational function in q

$$L_{\Gamma}(q; \rho) = (1 - q^2)^{d(n_V - n_E)} \times \det (I_{dn_V} - A(\rho(g))q + I_d \otimes (D - I_{n_V})q^2)^{-1}, \quad (2)$$

where n_V and n_E are the number of vertices and edges, respectively, $A(\rho(g))$ is the adjacency matrix with a gauge group assigned to each edge of the graph¹, and D is a diagonal matrix whose diagonal elements are the degrees of the vertices of the graph Γ .

Since (2) is given in the determinant form, it can be written in terms of the “functional determinant”

$$L_{\Gamma}(q; \rho) = \int \prod_{v \in V} d\Phi^v e^{-\beta S}, \quad (3)$$

where the action

$$S = \text{Tr} \left\{ \Phi^v \left(q\Delta(\rho(g)) - m(q)^2 \right)_{vv'} \Phi^{v'} \right\},$$

is given by the graph Laplacian $\Delta(\rho(g))$ of the derived graph associated with the group G , by choosing the mass $m(q)$ and the coupling β appropriately. The “scalar field” takes values in the representation space \mathcal{H} assigned to each vertex $v \in V$, i.e., Φ^v represents a section of the fiber bundle.

Furthermore, if we integrate (4) over the gauge group g_e on each edge (link variables), we can obtain the partition function of the gauge theory for the scalar field Φ^v

$$Z = \int \prod_{e \in E} dg_e \prod_{v \in V} d\Phi^v e^{-\beta S}, \quad (4)$$

where dg_e is the Haar measure on the gauge group G . Thus, the integral of the Artin-Ihara L -function over the gauge group G is equivalent to the partition function of the gauge theory on the graph Γ . The gauge theory on the graph (4) is a generalization of the so-called Kazakov-Migdal model [3] defined on the square lattice.

4 Summary

In this note, we have shown that the partition function of a certain class of the lattice gauge theory is expressed as an integral of the Artin-Ihara L -function of the derived graph over the group structure. This formulation allows physics in gauge theory on the graph can be analyzed using the rich mathematical framework of the L -function and zeta function associated with the graph. In particular, the spectrum of the graph Laplacian, which is important to consider the dynamics in gauge theory, is closely related to the analytic properties (distribution of poles or zeros) of the L -function. Moreover, physical observables in lattice gauge theory, such as the Wilson loops, can be derived from the L -function. We expect that the L -function of the derived graph will serve as a powerful tool in understanding non-perturbative aspects of gauge theory on the discrete space-time.

References

- [1] S. Matsuura and K. Ohta, “Fermions and Zeta Function on the Graph,” [arXiv:2501.08803 [hep-th]].
- [2] Yasutaka Ihara, J. Math. Soc. Japan **18**, 219-235 (1966).
- [3] V. A. Kazakov and A. A. Migdal, Nucl. Phys. B **397**, 214-238 (1993).

¹ In other words, this is the adjacency matrix of the derived graph associated with G .

A Theory of Voluntary Cooperation in Public Goods Provision

Tatsuya Kameda*

Collaboration is a powerful strategy for achieving goals that no individual can accomplish alone, whether in business or academic research. However, initiating successful collaborations is far from trivial. Each individual faces an incentive to benefit from the collective output without contributing effort, thereby discouraging participation. This free-rider problem has led scholars to model collaboration primarily as a public goods provision dilemma. In such models, individuals are placed within groups of fixed membership and must decide whether to cooperate.

Yet, these models often overlook the fact that many real-world collaborations are not constrained by pre-existing group boundaries or universal participation. In reality, people often possess viable individual alternatives outside of group arrangements and are free to opt in or out of collaborative settings.

To better understand group collaboration under such voluntary conditions, we extend previous models of public goods provision and coordination problems by employing a threshold public goods game. In this setup, each group member chooses either to contribute their endowment to the group or to retain it for themselves. The group succeeds in producing a public good—shared equally among members—only if a sufficient number of individuals (i.e., a threshold) cooperate. Crucially, this uncertain but potentially rewarding group collaboration is contrasted with a certain yet less profitable individual option outside the group. Participants may either pursue this individual path or voluntarily join group collaboration with others who have also opted in.

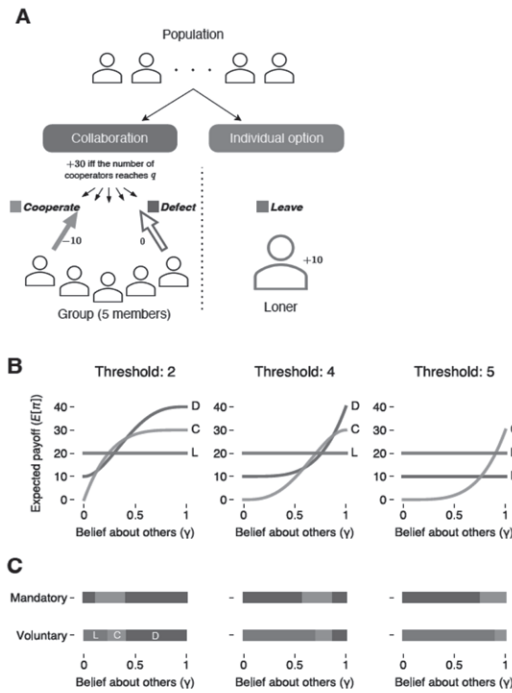
We first developed benchmark predictions to contrast collaborative success in the presence

or absence of an individual alternative. We formalized a model in which players form subjective beliefs about others' cooperativeness and choose actions based on these beliefs (Fig. 1). We then conducted a behavioral experiment. Consistent with the model's predictions, we found that compared to mandatory participation, voluntary participation increased individual cooperation within groups, such that most groups achieved successful collective outcomes (Fig. 2).

Moreover, two distinct behavioral mechanisms contributed to this outcome. First, pessimistic defectors were filtered out through self-selection, resulting in groups composed of more optimistic members. Second, some pessimists switched from defection to cooperation as their beliefs about others' cooperativeness improved. These processes together increased the proportion of cooperators and raised overall group optimism (Fig. 3).

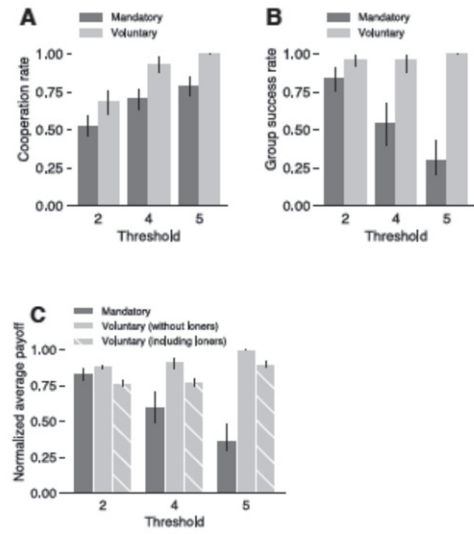
Finally, we addressed the apparent tension between the positive and negative effects of individual alternatives on collaboration. We argue that this divergence can be reconciled by considering the externality imposed by "loners"—those who opt out of collaboration. When public goods concern a fixed group, the externality imposed by loners can hinder collective action. However, when public goods involve flexible group membership under voluntary participation, the availability of an individual option can in fact facilitate successful collaboration (Fig. 4).

Figure 1. Modeling collaboration under voluntary participation.



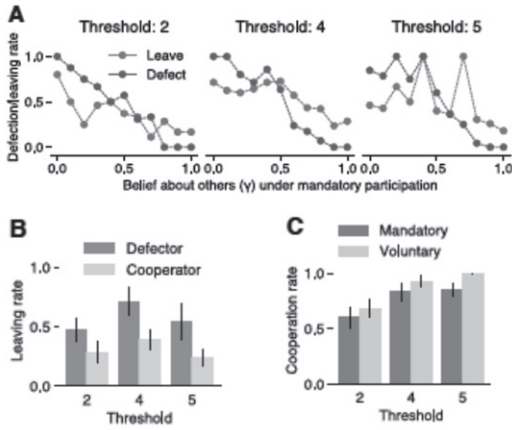
(A) Individuals can either opt in to group collaboration or choose an individual option outside of the group. Group members can choose whether to cooperate (incurring the private cost of 10 points) on the group project. If the number of cooperators is equal to or more than the predetermined threshold value, then all the group members earn 30 extra points. When choosing the individual option, players are guaranteed a smaller additional payoff of 10 points irrespective of other players' choices. (B, C) Expected payoff (B) and best response (C) as a function of subjective belief about how likely others are to cooperate within groups (i.e., γ). Each line represents a possible action under mandatory or voluntary participation: cooperate (C), defect (D), and leave (L).

Figure 2. Voluntary participation supports collaborative success.



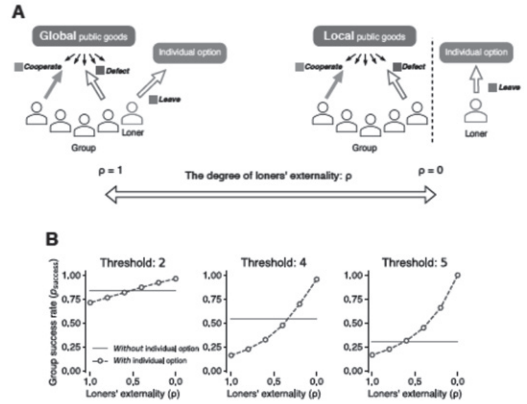
(A) Individual cooperation rate, (B) group success rate, and (C) normalized (i.e., ratio against the highest possible payoff for each threshold) average payoff in each condition. In each panel, the x axis indicates threshold values and the coding by brightness indicates whether participation in groups is mandatory or voluntary. Error bars in all panels indicate 95% bootstrap confidence intervals. In (C), plain bright bars show the average payoff under voluntary participation just within groups (excluding loners), and hatched bright bars show the average payoff for the entire population with loners included.

Figure 3. Voluntary participation filters out or encourages pessimistic defectors.



(A) Rates of participants who defected in the mandatory condition and those who chose to leave groups in the voluntary condition, as a function of their original beliefs about others' cooperativeness (γ in the mandatory conditions; grouped in 0.1 increments). (B) Proportions of participants who left groups in the voluntary condition as a function of their action in the mandatory condition with the same threshold values. Across the thresholds, defectors in the mandatory condition were more likely to leave groups compared to cooperators, under voluntary participation. (C) Nonloners' cooperation rates in the two conditions.

Figure 4. Synthesizing positive and negative effects of the individual option on collaborative success via the degree of loners' externality



(A) Left: Creating *global* public goods. Groups are fixed in advance (or the entire population is one group); thus, loners have full externality on the collective outcome and effectively function the same as defectors to the group. Right: Creating *local* public goods. Groups consist only of individuals who voluntarily opt in, and thus loners have no externality to the collective outcome. (B) Group success rate (computed from participants' choice data, r_C , r_D , and r_L , in our experiment) as a function of the degree of loners' externality, ρ . Dashed lines correspond to the situation with the individual option (voluntary participation) and solid lines to the situation without the individual option (mandatory participation).

References

Mori, R., Hanaki, N., & Kameda, T. An outside individual option increases optimism and facilitates collaboration when groups form flexibly. *Nature Communications*, 15: 5520 (2024).

E₈格子の数理

酒井 一 博

『E₈格子の数理—数学への「応用物理」—』の題目で、2024年12月4日に情報数理科学研究所の所内研究紹介を行った。本稿ではその概要を報告する。

「互いに重なり合わない同半径の超球を d 次元ユークリッド空間に詰め込むとき、密度の最大値、およびそれを実現する配置を求めよ。」この問題は、球充填問題 (sphere packing problem) として古くから知られる¹難問であり、現時点で (数学的に厳密な意味で) 解けているのは $d=1, 2, 3, 8, 24$ の場合のみである²。球充填問題の解を述べるには、超球の中心 (点) のなす集合を言えばよい。 $d=8$ の解が E_8 格子、 $d=24$ の解がLeech格子で与えられることは予想されていたが、その証明はごく最近になって与えられた [2]。この証明を $d=8$ の場合に単独で、また $d=24$ の場合に共同で行った Maryna Viazovska は2022年にFields Medalを受賞している。

d 次元ユークリッド空間 \mathbb{R}^d の基底 $\{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_d\}$ が与えられたとき、 \mathbb{R}^d 内の離散的な点の集合 $\{m_1\mathbf{u}_1 + \dots + m_d\mathbf{u}_d \mid m_i \in \mathbb{Z}\}$ を格子という³。 E_8 格子は、 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_8)$ として

$$\{\mathbf{x} \in \mathbb{Z}^8 \cup (\mathbb{Z} + \frac{1}{2})^8 \mid x_1 + \dots + x_8 = \text{even}\}$$

で与えられる8次元の格子である。 E_8 格子は E_8 型Lie代数のルート格子であり、その名前はLie代数あるいはルート系の分類に由来する。ルート格子 A_d, D_d, E_6, E_7, E_8 、およびそれらの直和は、格子の代表例である。格子の中でも偶およびユニモジュラーという二つの性質を併せ持つ格子は、次元 d が8の倍数の場合にのみ現れる。8次元の偶ユニモジュラー格子は E_8 格子ただ一つであり、16次元の偶ユニモジュラー格子は $E_8 \oplus E_8$ および D_{16}^+ の二つのみである。このことから分かるように、数ある格子の中でも E_8

格子は特別な位置を占めている。

格子と、情報科学分野における誤り訂正符号とは、密接な関連がある。誤り訂正符号は、ノイズが入る際のデータの通信や保存に用いられる。例えば、1011というデータを送る際に、そのまま送ったのではノイズの影響で1001などと、一部のビットが反転し、間違って届く恐れがある。そこで、データに冗長性を持たせて送ることを考える。例えば、各ビットのデータを三つずつ繰り返して111000111111と符号化して送れば、そのうち1ビットがノイズにより反転して111000101111と変わっても、元のデータが類推でき、高い確率で誤り訂正が可能である。誤り訂正符号とは、このようにデータを、冗長性を持たせた符号語に変換し (上の例では4ビットのデータを12ビットの符号語に変換)、またそれを復号する仕組みである。上では説明を簡単にするため安直な例を挙げたが、実際には効率のよい様々な方法が知られている。一例として、(8, 4) 拡張Hamming符号がある。これは4ビットのデータを8ビットの符号語に変換して送る方式である。16個のどの符号語同士も最低4ビットずつ異なるように選ばれているため、1ビットの誤り訂正と2ビットまでの誤り検出が同時に可能である。実は、この(8, 4) 拡張Hamming符号の符号語のいずれかとmod 2で合同な \mathbb{Z}^8 の点の集合は、 E_8 格子 (の $\sqrt{2}$ 倍) となっている! このように、誤り訂正符号と格子の間には対応関係があり、一方から他方を構成することが可能である。

E_8 格子は超弦理論にも登場する。超弦理論は物理学において、素粒子と量子重力とを統合的に記述する基礎理論の最有力候補として有望視されている理論である。標準模型をはじめとする現代素粒子物理学のモデルは、場の量子論を基盤としている。超弦理論は、「世界の基本構

¹ 少なくとも1611年には、惑星運動の法則で有名なJohannes Keplerが $d=3$ の解を予想している。

² 本稿で扱う球充填問題、格子、誤り訂正符号に関する標準的文献としては、[1]がよく知られている。

³ 本稿では格子というとき、いつでも正定値符号の (すなわちユークリッド空間内の) 格子を指すことにする。

成要素は粒子ではなく弦である」ことのみに
 おいて場の量子論を修正する、最も保守的な量子
 重力理論である。理論が量子論的に矛盾をきた
 さないことを要請すると、超弦理論の模型構築
 において好き勝手な設計は許されず、時空の次
 元が10次元に決まることをはじめとして、様々
 な制限が課される。平坦時空で弦同士の相互作
 用が弱い状況では、超弦理論は5種類の異なる
 姿をとり⁴、そしてこの5種類の型のみが許さ
 れる。具体的には、I型、IIA型、IIB型超弦理論、
 および $E_8 \times E_8$ ヘテロティック弦理論、 $SO(32)$
 ヘテロティック弦理論の五つである。詳しい説
 明は省くが、ヘテロティック弦理論が上記の
 たった二つの型のみ許されることは、前述のよ
 うに16次元偶ユニモジュラー格子が $E_8 \oplus E_8$ お
 よび D_{16}^+ の二つしかないことと対応している。

最後に、 E_8 格子に関連する筆者の最近の研
 究結果[3]について紹介する。Jacobi形式とは、
 正則関数 $\varphi(\tau, z)$ ($\tau \in \mathbb{H}$, $z \in \mathbb{C}$) であって、 τ に
 関するモジュラー性、 z に関する準二重周期性
 を併せ持つものをいう[4]。Jacobi形式の一般
 化として変数 z を多変数 $\mathbf{z} \in \mathbb{C}^d$ に拡張したも
 のを考えることができる。その中でも、ルート系
 R に付随する Weyl 群 $W(R)$ の作用の下で不変
 な (すなわち任意の $w \in W(R)$ に対して $\varphi(\tau, w$
 $(\mathbf{z})) = \varphi(\tau, \mathbf{z})$ を満たす) Jacobi形式は、超弦
 理論や場の量子論の分配関数を組み立てる上での
 構成要素として基本的な重要性をもつ。既約
 なルート系は四つの無限族 A_d, B_d, C_d, D_d と五
 つの例外 E_6, E_7, E_8, F_4, G_2 に分類されることが
 よく知られている。一般に $W(R)$ 不変弱 Jacobi
 形式の全体は \mathbb{C} 上の環をなすが、 R が E_8 以外
 の既約ルート系であれば、この環は多項式環
 になることが Wirthmüller により示されている
 [5]。しかしながら、 $R=E_8$ の場合にこの環が
 どのような構造を持つかは (それが有限生成な
 のかさえも) 30年以上不明のままであった。

論文[3]では、「 $W(E_8)$ 不変弱 Jacobi形式の
 なす環は、2変数6次形式と4次形式の連立共
 変量のなす環に同型である」ことを証明した。
 2変数 n 次形式 (n 次同次多項式) の不変量・
 共変量は、古典不変式論の主題であり、その環
 の構造は19世紀以来よく研究されている。今
 回証明した定理により、 $W(E_8)$ 不変弱 Jacobi 形

式のなす環は有限生成であることが結論され、
 194個の具体的な生成元も特定された。上述の
 定理自体は純粋に数学的な結果であるが、その
 発見および証明においては、物理 (超弦理論)
 の研究で得られた関数の活用が鍵となった。そ
 の意味で今回の結果は、数学への「応用物理」
 と言えなくもない。

参考文献

- [1] J. H. Conway and N. J. A. Sloane, "Sphere packings, lattices and groups," 3rd edition, Springer, 1999.
- [2] M. Viazovska, Ann. of Math.(2) **185**(3) (2017), 991-1015; H. Cohn, A. Kumar, S. D. Miller, D. Radchenko, M. Viazovska, Ann. of Math.(2) **185**(3) (2017), 1017-1033.
- [3] K. Sakai, "The ring of Weyl invariant E_8 Jacobi forms," [arXiv:2410.12907 [math. NT]].
- [4] M. Eichler and D. Zagier, "The Theory of Jacobi forms," Prog. in Math. **55**, Birkhäuser-Verlag, 1985.
- [5] K. Wirthmüller, Compos. Math. **82** (1992), 293-354.

⁴ ただしこれらの五つは場の変数変換や背景時空の変形で互いにつながっており、単一の模型をなす。

2つの潜在変数に関する統計モデルの同定可能性

佐々木 博 昭

1 背景

近年、統計モデルの同定可能性が教師なし表現学習において再注目を集めている。統計モデルの同定可能性の代表的な研究の1つが線形独立成分分析であり、これまでに様々な研究分野で応用されている [3]。線形独立成分分析の目的は、データが潜在変数の線形混合として観測されることを仮定し、観測データからその潜在変数を推定することである。同定可能性なしでは、潜在変数が特定可能であることを保証できない。線形混合を非線形混合へと拡張したのが、非線形独立成分分析であり、近年、活発に研究が行われている [5]。

本研究では、2つの潜在変数をもつ統計モデルの同定可能性を調査する。この統計モデルはグラフ埋め込み [2] やマルチモダル学習 [1] の基盤となるモデルであり、その同定可能性を調査することは重要である。特に、文献 [4] の一部内容を紹介し、その統計モデルがどのような条件で、どの程度まで同定可能であるのかを理論的に明らかにする。

2 潜在変数モデルの同定可能性

潜在変数モデルと補助データ：本研究では、最初に周辺分布 $p_w(\mathbf{w})$ に従う補助データベクトル $\mathbf{w} \in \mathcal{W} \subset \mathbb{R}^{d_w}$ が与えられた下で、2つの潜在変数ベクトル $\mathbf{s} = (s^{(1)}, \dots, s^{(d_s)})^\top \in \mathbb{R}^{d_s}$ と $\mathbf{v} = (v^{(1)}, \dots, v^{(d_v)})^\top \in \mathbb{R}^{d_v}$ が条件付き確率分布 $p_{\mathbf{sv}|\mathbf{w}}(\mathbf{s}, \mathbf{v}|\mathbf{w})$ から生成されることを仮定する。次に、2つの観測データが次のような潜在変数の非線形混合で生成されるとする。

$$\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{s}), \mathbf{u} = \varphi(\mathbf{v}), \quad (1)$$

式(1)において、 $\mathbf{f}: \mathbb{R}^{d_s} \rightarrow \mathbb{R}^{d_x}$ と $\varphi: \mathbb{R}^{d_v} \rightarrow \mathbb{R}^{d_u}$ は混合関数であり、 $d_s \leq d_x$, $d_v \leq d_u$ とする。さらに、 \mathbf{f} と φ はそれらの像に対して全単射かつ滑らかな逆像をもつとする。したがって、 \mathbf{f} と

φ によって定義される。

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_f &:= \{\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{s}) \mid \mathbf{s} \in \mathbb{R}^{d_s}\} \subset \mathbb{R}^{d_x} \\ \mathcal{M}_\varphi &:= \{\mathbf{u} = \varphi(\mathbf{v}) \mid \mathbf{v} \in \mathbb{R}^{d_v}\} \subset \mathbb{R}^{d_u}, \end{aligned}$$

はそれぞれ \mathbb{R}^{d_s} と \mathbb{R}^{d_v} の部分多様体とみなすことができる。本稿では、簡単のため、 $d_s = d_v =: d$ とするが、文献 [4] では、 $d_s \neq d_v$ の場合も想定している。最後に、観測されるデータは \mathbf{x} , \mathbf{u} , \mathbf{w} であり、 \mathbf{s} , \mathbf{v} は観測不可能な潜在変数であることを注意しておく。

同定可能性：本研究における同定可能性の定義を述べる。混合関数 \mathbf{f} と φ の逆像をそれぞれ $\mathbf{g}: \mathcal{M}_f \rightarrow \mathbb{R}^d$ と $\phi: \mathcal{M}_\varphi \rightarrow \mathbb{R}^d$ とすると、潜在変数 \mathbf{s} と \mathbf{v} は以下のように表現できる。

$$\mathbf{s} = \mathbf{g}(\mathbf{x}), \mathbf{v} = \phi(\mathbf{u}). \quad (2)$$

このとき、式 (2) より、補助データ \mathbf{w} が与えられた下で、 \mathbf{x} と \mathbf{u} の条件付き確率分布は、

$$\begin{aligned} p_{\mathbf{xu}|\mathbf{w}}^{\mathbf{g}, \phi}(\mathbf{x}, \mathbf{u}|\mathbf{w}) \\ = p_{\mathbf{sv}|\mathbf{w}}(\mathbf{g}(\mathbf{x}), \phi(\mathbf{u})|\mathbf{w}) \sqrt{|\mathbf{G}_g(\mathbf{x})| |\mathbf{G}_\phi(\mathbf{u})|}, \quad (3) \end{aligned}$$

と記述できる。 \mathbf{g} と ϕ のヤコビ行列をそれぞれ \mathbf{J}_g と \mathbf{J}_ϕ とすると、 $\mathbf{G}_g(\mathbf{x}) := \mathbf{J}_g(\mathbf{x})^\top \mathbf{J}_g(\mathbf{x})$, $\mathbf{G}_\phi(\mathbf{u}) := \mathbf{J}_\phi(\mathbf{u})^\top \mathbf{J}_\phi(\mathbf{u})$ であり、 $|\mathbf{G}_g(\mathbf{x})|$ は $\mathbf{G}_g(\mathbf{x})$ の行列式を表す。そして、

$$\begin{aligned} p_{\mathbf{xu}|\mathbf{w}}^{\mathbf{g}, \phi}(\mathbf{x}, \mathbf{u}|\mathbf{w}) &= p_{\mathbf{xu}|\mathbf{w}}^{\tilde{\mathbf{g}}, \tilde{\phi}}(\mathbf{x}, \mathbf{u}|\mathbf{w}) \\ \Rightarrow \mathbf{g} &= \tilde{\mathbf{g}}, \phi = \tilde{\phi}, \quad (4) \end{aligned}$$

であるとき、 \mathbf{g} と ϕ は同定可能であるという。次にどのような条件下で、どの程度まで \mathbf{g} と ϕ が同定可能であるのかを示す。そのために、ある定ベクトル $\tilde{\mathbf{w}}$ を用いて、 $\bar{q}^{(i)}(\mathbf{s}, \mathbf{v}, \mathbf{w}) := \bar{q}^{(i)}(\mathbf{s}, \mathbf{v}, \mathbf{w}) - \bar{q}^{(i)}(\mathbf{s}, \mathbf{v}, \tilde{\mathbf{w}})$ と表記し、以下の d -次元ベクトルを定義する。

$$\mathbf{d}(\mathbf{s}, \mathbf{v}, \mathbf{w}) := \left(\frac{\partial^2}{\partial s^{(1)} \partial v^{(1)}} \bar{q}^{(1)}(s^{(1)}, v^{(1)}, \mathbf{w}), \dots, \frac{\partial^2}{\partial s^{(d)} \partial v^{(d)}} \bar{q}^{(d)}(s^{(d)}, v^{(d)}, \mathbf{w}) \right)^\top. \quad (5)$$

次の定理において、 \mathbf{g} と ϕ が同定可能であるための十分条件とその不確定性について述べる。

定理1. 次の2つの条件を満たすとき、各要素の非線形変換と順序の不確定性を除き、 \mathbf{g} と ϕ は同定可能である。

(1) $Z(\mathbf{w})$ を分配関数とすると、条件付き確率分布 $p_{\mathbf{sv}|\mathbf{w}}$ は以下の形式で与えられる。

$$\log p_{\mathbf{sv}|\mathbf{w}}(\mathbf{s}, \mathbf{v}|\mathbf{w}) = \sum_{i=1}^d q^{(i)}(s^{(i)}, v^{(i)}, \mathbf{w}) - \log Z(\mathbf{w}). \quad (6)$$

(2) 以下を満たす \mathbf{w} に関する $d+1$ 個の点、 $\bar{\mathbf{w}}, \mathbf{w}(1), \dots, \mathbf{w}(d)$ が存在する。

- すべての $\mathbf{s}, \mathbf{v}, \mathbf{w} \in \{\mathbf{w}(1), \dots, \mathbf{w}(d)\}$ に対して、ベクトル $\mathbf{d}(\mathbf{s}, \mathbf{v}, \mathbf{w})$ の全要素が非負。
- すべての \mathbf{s}, \mathbf{v} に対して、ベクトル $\mathbf{d}(\mathbf{s}, \mathbf{v}, \mathbf{w}(1)), \dots, \mathbf{d}(\mathbf{s}, \mathbf{v}, \mathbf{w}(d))$ は線形独立。

本定理の証明は[4]で確認できる。定理1は、潜在変数ベクトル \mathbf{s} の各要素 $s^{(i)}$ を同定することは困難であるが、ある関数 $h^{(i)}: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ が存在し、 $h^{(i)}(s^{(i)})$ が同定可能であることを意味する。ただし、各要素 $h^{(1)}(s^{(1)}), \dots, h^{(d)}(s^{(d)})$ の順番の不確定性は存在する。また、潜在変数ベクトル \mathbf{v} についても同じ解釈が成立する。その一方で、潜在変数ベクトル \mathbf{s} の推定手法が構築できたとしても、関数 $h^{(i)}$ により、その推定結果の解釈には曖昧性が存在する。この問題に対して、次の命題では関数 $h^{(i)}$ の不確定性を取り除くための十分条件を提示する。

命題2. 定理1の仮定に加え、ある関数 $\alpha^{(i)}(\mathbf{w})$ が存在し、次の方程式が満たされているとする。

$$\frac{\partial^2}{\partial s^{(i)} \partial v^{(i)}} \bar{q}^{(i)}(s^{(i)}, v^{(i)}, \mathbf{w}) = \alpha^{(i)}(\mathbf{w}). \quad (7)$$

このとき、各要素のスケールと順序の不確定性を除き、 \mathbf{g} と ϕ は同定可能である。

証明は[4]で与えられている。定理1と比較すると、関数 $h^{(i)}$ の不確定性が取り除かれ、その解釈性が高まっていることが分かる。さらに驚くべきことに、本稿では非線形な混合関数を用いているにもかかわらず、スケールと順序の不確定性は線形独立成分分析[3]と同じ不確定である。

3 まとめ

本稿では、2つの潜在変数をもつ統計モデルの同定可能性について理論的に調査した。紙面の都合上、省略したが、文献[4]では、異なる条件下での同定可能性や本理論のグラフ埋め込みへの応用、さらに潜在変数を推定するためのアルゴリズムもまた提案されている。

参考文献

- [1] T. Baltrušaitis et al. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2018.
- [2] H. Cai et al. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2018.
- [3] A. Hyvärinen and E. Oja. *Neural Networks*, 2000.
- [4] H. Sasaki. *ArXiv*. 2405.19760, 2024.
- [5] H. Sasaki and T. Takenouchi. *Journal of Machine Learning Research*, 2022.

生成AIを活用した顔表情からの表情コピーと感情マップ生成

永田 毅

〈要約〉生成AIの潜在変数を利用すると表情を別人にコピーすることが可能である。本技術を感情推定に用いるとホワイトボックス型の感情推定AIが実現できる。

〈キーワード〉表情コピー, 感情推定, ホワイトボックスAI, 生成AI

1. 概要

生成AIの潜在変数のうち、表情を担う部分を利用すれば、表情を別の人物にコピーすることができる。これを応用すれば、ニュートラルな表情から様々な表情を生成することができるので、特定の個人に特化した、ホワイトボックス型の感情推定が実現できる。

2. 本研究が解決しようとしている課題

一枚の顔画像から感情推定する技術の歴史は、アクションユニット（口角や目尻などの顔特徴点）の位置変化に着目して推定する手法から始まり^[1]、顔特徴点の近傍のテクスチャ変化の情報を追加して推定する手法へと発展してきた^{[2][3][4]}。

そのような経緯から、実用化されている感情推定エンジンには、大げさな表情については、推定精度が高いものの、無表情に近い感情推定には課題がある場合が多い。日本人は、感情を控え目に表情に出す傾向が強く、感情推定エンジンでは対応できない場合がある。

さらに、通常、感情推定は6感情のクラス分類で実施されることが多いが、無表情に近い表情に含まれる微妙な情報が反映されるとは言い難く、感情レベルを回帰的に数値レベルで推定する手法が望ましい^[4]。

また顔表情は、様々な多様性を持っており、教師データから離れたデータに対する精度（汎化性能）に問題があることが多い。

まとめると、現状の感情推定には、以下のよう

な課題がある。

- ② 表情の多様性（同一人物内）：同一人物かつ同一感情であっても、多様な表情がある。また、会話中に口角が変化するだけで、感情が変化していると推定されてしまう場合がある。
- ③ 表情の多様性（人物間）：人種、性別、年齢層により、同一感情であっても、表情は様々な多様性を持っている。
- ④ 撮影角度による多様性：顔を上方から撮影した場合、ニュートラルな感情であったとしても、口角が上がっているように見えてしまい、ポジティブな感情と推定されてしまう場合がある（下方から撮影した場合はその逆）。

こうした課題を解決するため、近年ではビッグデータを活用した深層学習による手法が主流となってきた^{[5][6][7]}。ビッグデータによる深層学習は上記のような問題を解決できる可能性がある一方、推定結果の根拠が説明できないというブラックボックス問題はさらに深刻になっている。ブラックボックスAIでは、AIの推定結果を人間が解釈することが困難であり、その活用が制限されてしまう。例えば、特定の人物の感情を定点観測してカウンセリングに利用する場合、得られた感情変化の数値情報だけではなく、その根拠が明確で、推定結果を人間が解釈し新たな知見が得られるようなものが望ましい。

本研究では、上記のような課題認識のもと、まずは①②④の解決を目的とし、深層学習（生成AI）を活用して多様性に対処しつつ、推定

- ① 無表情に近い表情からの感情推定：日本人

根拠が明確で、推定結果を人間が解釈し、新たな知見が得られるような、ホワイトボックス型の感情推定技術を目指して行ったものである。

3. 研究方法

3.1 顔撮影実験

本研究の実施にあたり、①の問題、つまり日本人データによる、無表情に近い顔表情からの感情推定を行うために、顔撮影実験を行った。10名の被験者に感情を込めて台詞を朗読してもらい、その様子を、5方向（正面、上方、下方、右方向、左方向）に設置したカメラで動画を撮影した。被験者一人あたり140枚の画像を抽出し、10名から合計1400枚の顔画像を得た^{[10][11]}。

3.2 表情パラメータの抽出

SytleGAN^[8]の潜在変数は、解像度別に分かれている。低解像度は顔の方向・輪郭・顔パーツ位置・髪型などを表現し、中解像度は顔表情、高解像度は髪の毛や肌のキメなどを表現している。

我々は、顔撮影実験で得られた、同一人物の表情変化画像を利用し、表情を担うレイヤーの分析を行った結果、5-8番目のレイヤーが表情を主に担っていることを見出した。この5-8番目のレイヤーを、本研究では「表情パラメータ」と呼ぶ。

この表情パラメータは、顔のタイプや方向とは独立である。つまり、様々な顔形状や様々な方向から撮影された顔画像について、この表情パラメータを利用すれば、統一的に扱うことが可能であり、汎化性能の高い感情推定が期待できる^{[10][11]}。

3.3 表情コピー

前節で求めた表情パラメータを別の人物の潜在変数に適用すれば、表情コピーが可能である（図1）。

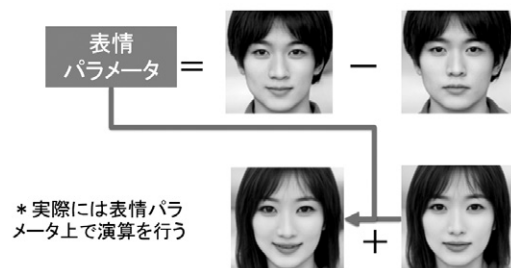


図1 表情コピーの例

3.4 感情マップ生成

本研究では、心理学におけるラッセルの円環モデル^[9]に準拠して感情を数値化して扱う。ラッセルの円環モデルでは、人間の感情を、感情のポジティブ度・ネガティブ度を示す感情価（Valence）と感情の活性度（Arousal）の2軸に分けて分析する。

我々は、収集した1400枚の顔画像について、一枚の画像あたり約10名の評価者に、ValenceおよびArousalの値について、±10の範囲の整数値での主観評価を行ってもらい、その中央値をValenceおよびArousalの正解として採用した。

さらに、同一人物の140枚の画像について、ラッセルの円環モデルの2軸平面上に配置し、ValenceおよびArousal方向の個人別平均表情差分ベクトル $\vec{V}_{Valence,i}$ と $\vec{V}_{Arousal,i}$ （iは個人番号、=1~10）を抽出した。 $\vec{V}_{Valence,i}$ と $\vec{V}_{Arousal,i}$ は、i番目の被験者の、Valence方向とArousal方向に+1移動する際の表情パラメータの平均差分ベクトルである。さらに、10名分の $\vec{V}_{Valence,i}$ と $\vec{V}_{Arousal,i}$ について平均を取り、平均表情差分ベクトル $\vec{V}_{Valence}$ と $\vec{V}_{Arousal}$ を得た。この $\vec{V}_{Valence}$ と $\vec{V}_{Arousal}$ を利用すれば、任意の顔画像についてラッセルの円環モデルの2次元マップ上の該当する位置に顔画像を生成し、感情マップを生成が可能である。図2に、男女のニュートラルな平均顔をベースとして生成した感情マップの例を示す。中央の表情がニュートラルであり、横軸方向がArousal、縦軸方向がValenceを示している。この例では、平均顔をベースに生成したが、特定の個人のニュートラル顔に対して生成すれば、特定の個人に特化した感情マップを生成することが可能である^{[10][11]}。

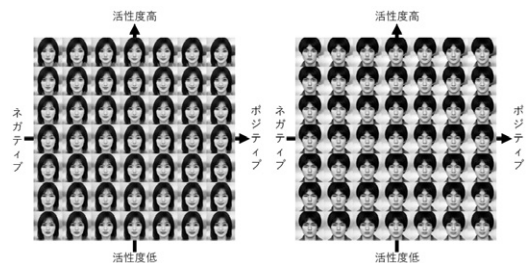


図2 感情マップの例

この感情マップを活用すれば、ホワイトボックス型の感情推定が実現できる。すなわち、顔表情と感情マップ上の各表情を比較することで、最も類似度が高い表情の位置座標が推定結

果となるため、推定根拠が明確であり、人間がその結果を確認することが可能である。

ここで、感情マップの限界についても言及しておきたい。先程から述べているように、表情には多様性がある。ニュートラルな表情の多様性については、次節で検討を行う。ニュートラル以外の表情の多様性については、本研究の範囲を超えるため、今後の課題としたい。

3.5 感情マップデータベースの作成

ニュートラルな顔表情は一定ではなく、会話中も変化するし、撮影角度によっても変化する。我々は、このようなニュートラル顔画像の多様性に対応するため、ニュートラル顔のクラスタリングを行った^{[10][11]}。

具体的には、顔撮影実験で得られた、様々な方向から撮影された、ニュートラルな感情で会話する顔動画の各フレームに対して、K-means法でクラスタリングを行い、ニュートラルな顔表情を16クラスに分類した（実験の結果、最適なクラス数数が16であった）。そして、16クラスの中心の表情に対して感情マップを生成し、感情マップデータベースを構築した^{[10][11]}。

3.6 顔画像の感情推定

構築した感情マップデータベースを利用すれば、ニュートラル表情の多様性や撮影角度の影響を受けない感情推定が期待できる。

図3にその処理イメージを示す。まず、入力画像の表情パラメータと、16個の感情マップ中のニュートラル位置の表情パラメータを比較し、最も類似度が高い感情マップを選択する（図3①）。



図3 感情推定処理イメージ①

つぎに、最も類似度が高い感情マップ中の表情パラメータと、入力画像の表情パラメータを比較し、最も類似度が高い表情が位置する感情が推定値になる^{[10][11]}（図3②）。



図3 感情推定処理イメージ②

推定は表情パラメータ上で行うが、その結果を、人間が感情マップを目視確認することで、画像として確認することが可能である。例えば、カウンセリングに利用する場合、クライアントと感情マップを共有することで、現在の状況を確認し、次に目指す位置の表情を共有し、表情トレーニングに生かすことが可能である。

4. 感情推定実験

10名1400枚の画像について、被験者単位のLOOCV (Leave one out cross validation) を行った^{[10][11]}。すなわち、1名分140枚のデータを省いた、9名分1260枚で感情マップデータベースを生成し、得られた感情マップデータベースを用いて、省いた1名分140枚の感情を推定することを、10回（10名分）繰り返した。

表1にその結果（推定結果の平均絶対誤差MAE）を示す。humanは10名の主観評価者の評価結果の中央値に対するMAEであり、この値（0.8~0.9）に近いほど、人間に近い感情推定が実現できていることになる。no-clusteringは、クラスタリングを行わず、10名分のニュートラル表情の平均顔に対して1枚の感情マップを生成し、その感情マップを用いて感情推定した結果である。16clustersが感情マップデータベースの結果である。no-clusteringのMAEはArousal, Valenceともに1.7~1.8程度であるのに対し、16clustersは1.4程度に向上しており、クラスタリングの効果が確認できる。先行研究におけるSOTA^[4]も1.4程度であることから、ブラックボックス型の先行研究と同程度の性能

を確保したホワイトボックス型の感情推定が実現できたことが確認できる。

表1 LOOCV交差検定の結果 (MAE)

	human	Proposed method	
		no-clustering	16 clusters
MAE (Arousal)	0.86	1.77	1.41
MAE (Valence)	0.92	1.73	1.42

5. ディスカッション

本研究では、表情からの感情推定上の課題、①無表情に近い表情からの感情推定、②表情の多様性（同一人物内）、③表情の多様性（人物間）、④撮影角度による多様性、のうち、①②④を解決するため、生成AIを活用したホワイトボックス型の感情推定モデルについて提案を行った。LOOCV交差検定により、提案手法の検証を行ったところ、提案手法の有効性が確認できた。

最後に、本研究が解決した点と、今後の課題について議論したい。

まず、①無表情に近い表情からの感情推定、については、日本人学生の撮影データを用いたため、正解値が、原点（ニュートラル）近くに局在しており、このようなデータで交差検定を行い、SOTAと同程度の精度が確認できたことから、効果が確認できたと考えている。

②表情の多様性（同一人物内）については、残課題が残っている。本研究では、ニュートラルな表情の多様性については、ニュートラル表情のクラスタリングで対処し、有効性を確認しているが、ニュートラル以外の感情については、単一の平均表情差分ベクトル $\vec{V}_{Valence}$ と $\vec{V}_{Arousal}$ を用いているため、対処していない。本来は、ニュートラル表情をクラスタリングしたように、 $\vec{V}_{Valence}$ と $\vec{V}_{Arousal}$ についても、クラスタリングを行うべきである。これは今後の課題としたい。

③表情の多様性（人物間）については、今回は20歳前後の日本人学生を被験者としたため、不十分である。本来は、多様な人種、性別、年齢層を想定すべきであり、今後の課題としたい。

④撮影角度による多様性については、潜在変数のうち、撮影角度の影響が少ない表情パラメータを対象としたため、対処できたと考えている。

まとめると、本研究では、日本人の若者データを利用し、ニュートラル表情の多様性や撮影角度の違いにロバストな感情推定技術を提案し、その有効性を確認した。今後は、ニュートラル以外の表情の多様性にも配慮し、多様な人種、性別、年齢層を加えて、さらにロバストな感情推定エンジンを開発していきたいと考えている。

参考文献

- [1] Y.-I. Tian, T. Kanade, and J. F. Cohn, "Recognizing action units for facial expression analysis," IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol. 23, no. 2, pp. 97-115, 2001.
- [2] 石井雅樹, et al. "自己写像特性を用いた顔表情カテゴリーの抽出と感情空間マップの生成." 電子情報通信学会論文誌 D 91.11 (2008): 2659-2672.
- [3] C. Shan, S. Gong, and P. W. McOwan, "Facial expression recognition based on local binary patterns: A comprehensive study," Image and Vision Computing, vol. 27, no. 6, pp. 803-816, 2009.
- [4] Valderrama, A., Taketomi, T., Louis, C., Sanbongi, T., Kuno, A., Takahashi, S., & Nagata, T. (2023, July). Estimation of subtle facial emotion changes from expressionless images. In Sixteenth International Conference on Quality Control by Artificial Vision (Vol. 12749, pp. 117-124). SPIE.
- [5] P. Liu, S. Han, Z. Meng, and Y. Tong, "Facial expression recognition via a boosted deep belief network," in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2014, pp. 1805-1812.
- [6] A. Mollahosseini, D. Chan, and M. H. Mahoor, "Going deeper in facial expression recognition using deep neural networks," in Applications of Computer Vision (WACV), 2016 IEEE Winter Conference on. IEEE, 2016, pp. 1-10.
- [7] Li, Shan, and Weihong Deng. "Deep facial expression recognition: A survey." IEEE transactions on affective computing 13.3

- (2020): 1195-1215.
- [8] Karras, Tero, et al. "Analyzing and improving the image quality of stylegan." CVPR2020.
 - [9] James A Russell. A Circumplex Model of Affect. Journal of Personality and Social Psychology, Vol. 39, No. 6, pp. 1161-1178, 1980.
 - [10] 中村明日香, 堀越月乃, 遠藤洋, 奥村英朗, 河本優那, 鞍崎愛里, 齋田結衣, 永田毅, "生成AIを活用した顔表情からの表情コピーと感情マップ生成", フォーラム顔学 2024
 - [11] 中村明日香, 堀越月乃, 遠藤洋, 奥村英朗, 河本優那, 鞍崎愛里, 齋田結衣, 永田毅, "生成AIを活用した顔表情からの表情コピーと感情マップ生成", DIA2025

量子論における合成系の構造と両立不可能性

宮 寺 隆 之

1 はじめに

量子系においては、同時に実行可能ではない操作が存在する。シャープな物理量の非可換な組は、同時に測定することはできない [1]。また、二つの恒等チャネルを同時に実行することも不可能である [2]。このような同時に実行することが原理的にも不可能な複数の操作は、両立不可能 (incompatible) であると呼ばれている [3]。この両立不可能性は、量子論と古典論を含む一般的な枠組みである一般確率論においても定義されており、古典系以外ではどのような系においても両立不可能な操作が存在することもわかっている [4]。

ところで、一般確率論において複数のチャネルについての両立不可能性を定義する際には、出力系である合成系の指定を行う必要がある。これまで、この合成系の選び方にチャネルの両立不可能性がどのように依存しているかについての研究はなされてこなかった。ここでは、系としては量子ビット系を扱いながら、チャネルの両立不可能性が出力系をあらわす合成系の構造にどのように依存するかを調べた研究 [5] について報告を行う。

2 量子チャネルの両立不可能性

本稿では個別の系としては量子系を扱う。各量子系には一つの Hilbert 空間 \mathcal{H} が付随している。Hilbert 空間 \mathcal{H} 上の有界作用素全体を $\mathcal{L}(\mathcal{H})$ と書くことにする。この系において状態全体のなす集合は $\mathcal{S}(\mathcal{H}) = \{\rho \mid \rho : \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}, \text{linear}, \text{tr}[\rho] = 1, \rho \geq 0\}$ で与えられる。量子ビットの場合には $\mathcal{H} = \mathbf{C}^2$ となり、各状態は Bloch 球内の点 $\mathbf{a} \in \mathbf{R}^3$ ($|\mathbf{a}| \leq 1$) を用いて $\rho = \frac{1}{2}(\mathbf{1} + \mathbf{a} \cdot \boldsymbol{\sigma})$ と一意的にあらわされる。これに対し、質問をあらわすエフェクトと呼ばれる量は $\mathcal{L}_s(\mathcal{H}) = \{A \mid A : \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}, \text{linear}, A = A^*, \|A\| < \infty\}$ の部分集合 $\mathcal{E}(\mathcal{H}) = \{A \mid A \in \mathcal{L}_s(\mathcal{H}), 0 \leq A \leq 1\}$ であらわさ

れ、状態 ρ においてエフェクト E を測定したときに結果が Yes である確率は $\text{tr}[\rho E]$ で与えられる。系 \mathcal{H} から系 \mathcal{K} 上へのダイナミクスをあらわす量子チャネルは Heisenberg 描像においては単位保存 CP 写像 $\Lambda : \mathcal{L}(\mathcal{K}) \rightarrow \mathcal{L}(\mathcal{H})$ であらわされる。ここで、 Λ が CP 写像であるとは通常の意味での合成系 (量子合成系と呼ぶことにする) $\mathcal{L}(\mathcal{K} \otimes \mathbf{C}^d)$ 上への拡張 $\Lambda \otimes \text{id}$ が d の値によらず正写像になるということ ($A \geq 0$ であれば $(\Lambda \otimes \text{id})(A) \geq 0$ が成り立つこと) である。また、単位保存性 $\Lambda(1) = 1$ も要請される。

一般確率論の文脈においては、二つの量子系の合成系は一意的には定まらない。 \mathcal{H} であらわされる系と \mathcal{K} であらわされる系の合成系の状態空間 \mathcal{S} は最小の状態空間 $\mathcal{S}(\mathcal{H}) \otimes_{\min} \mathcal{S}(\mathcal{K})$ と最大の状態空間 $\mathcal{S}(\mathcal{H}) \otimes_{\max} \mathcal{S}(\mathcal{K})$ のあいだの凸集合となる。ここで、 $\mathcal{S}(\mathcal{H}) \otimes_{\min} \mathcal{S}(\mathcal{K})$ はセパラブル状態全体からなる集合をあらわし、 $\mathcal{S}(\mathcal{H}) \otimes_{\max} \mathcal{S}(\mathcal{K})$ は $\mathcal{L}_s(\mathcal{H} \otimes \mathcal{K})$ のうち、 $\mathcal{E}(\mathcal{H}) \times \mathcal{E}(\mathcal{K})$ に制限して得られる双線形写像が 0 以上 1 以下を取るようなものの全体である。すなわち、 $\rho \in \mathcal{L}_s(\mathcal{H} \otimes \mathcal{K})$ のうち $\text{tr}[\rho(1 \otimes 1)] = 1$ と、 $0 \leq \text{tr}[\rho(E \otimes F)] \leq 1$ を全ての $E \in \mathcal{E}(\mathcal{H})$ と $F \in \mathcal{E}(\mathcal{K})$ に対して満たすものの全体で与えられる。この $\mathcal{S}(\mathcal{H}) \otimes_{\max} \mathcal{S}(\mathcal{K})$ は $\mathcal{S}(\mathcal{H} \otimes \mathcal{K})$ よりも真に広い空間であることはエンタングルド状態 $|\phi\rangle\langle\phi|$ について片方の系に転置 (T と書く) を施した ($\text{id} \otimes T$) ($|\phi\rangle\langle\phi|$) がこの中に入っていることから見て取れる。また、各 \mathcal{S} には対応するエフェクト空間 \mathcal{E} が自然に $\mathcal{E} = \{E \mid E \in \mathcal{L}(\mathcal{H} \otimes \mathcal{K}), 0 \leq \text{tr}[\rho E] \leq 1 \text{ for all } \rho \in \mathcal{S}\}$ で定義される。このエフェクト空間は、対応する $\mathcal{L}_s(\mathcal{H} \otimes \mathcal{K})$ の正錐 $\mathcal{P} := \{\lambda E \mid \lambda \geq 0, E \in \mathcal{E}\}$ により $\mathcal{E} = \mathcal{P} \cap (1 - \mathcal{P})$ とあらわされる。

これらの準備の下、我々は以下のような概念を導入する。

Definition 1 Hilbert 空間 $\mathcal{H}_0, \mathcal{H}_1, \mathcal{H}_2$ で記述される個別の系と、正錐 $\mathcal{P} \subset \mathcal{L}_s(\mathcal{H}_1 \otimes \mathcal{H}_2)$ で指定さ

れる $\mathcal{E}(\mathcal{H}_1)$ と $\mathcal{E}(\mathcal{H}_2)$ の合成系を考える. 量子チャネル $\Lambda_1: \mathcal{L}(\mathcal{H}_1) \rightarrow \mathcal{L}(\mathcal{H}_0)$ と $\Lambda_2: \mathcal{L}(\mathcal{H}_2) \rightarrow \mathcal{L}(\mathcal{H}_0)$ が \mathcal{P} -両立可能であるとは, 線形写像 $\Lambda: \mathcal{L}(\mathcal{H}_1 \otimes \mathcal{H}_2) \rightarrow \mathcal{L}(\mathcal{H}_0)$ が存在し, 以下を満たすことである.

$$\Lambda(A \otimes \mathbf{1}) = \Lambda_1(A) \text{ for all } A \in \mathcal{L}(\mathcal{H}_1)$$

$$\Lambda(\mathbf{1} \otimes B) = \Lambda_2(B) \text{ for all } B \in \mathcal{L}(\mathcal{H}_2)$$

$$\Lambda(\mathcal{P}) \subset \mathcal{P}_0$$

ただし, $\mathcal{P}_0 = \{\lambda E | \lambda \geq 0, E \in \mathcal{E}(\mathcal{H}_0)\}$ である. 特に, \mathcal{P} が取りうる正錐のうち最小で, 状態空間 $\mathcal{S}(\mathcal{H}_1) \otimes_{\max} \mathcal{S}(\mathcal{H}_2)$ に対応するとき, \mathcal{P} -両立可能であることを最小両立可能であると呼ぶことにする.

3 主結果

最終目標は量子チャネルの両立不可能性が合成系の選び方にどのように依存するかを解明することだが, 一般論を行うことは現状では難しい. そこで, 最も簡単な具体例について調べることにする. 扱う系は量子ビット系 ($\mathcal{H}_0 = \mathcal{H}_1 = \mathcal{H}_2 = \mathbb{C}^2$) であり, 量子チャネルとしてはノイズ ($0 \leq \eta \leq 1$) つきの恒等チャネル

$$\Lambda_\eta(A) = \eta A + (1 - \eta) \frac{\text{tr}[A]}{2} \mathbf{1}$$

を考える. ($1 - \eta$ がノイズの強さをあらわす.)

Theorem 1 量子ビット間の量子チャネル Λ_{η_1} と Λ_{η_2} が最小両立可能であるための必要十分条件は以下の不等式を満たすことである.

$$\eta_1^2 + \eta_2^2 \leq 1 \quad (1)$$

本定理の結果は, 通常の量子論における合成系を採用した場合 (量子両立可能と呼ぶ) の必要十分条件である.

$$\eta_1^2 + \eta_2^2 + (1 - \eta_1 - \eta_2)^2 \leq 1 \quad (2)$$

と比べると, 最小両立可能であるパラメータ領域は真に広いことをあらわしている. これにより, チャネルの両立可能性は合成系の選び方に依存することが示された.

ところで, 実際に両立可能性を検証するための実験ではベル測定のようなエンタングルした物理量を測定する必要はなく, $\mathcal{E}_{\min} = \{\sum_n \lambda_n$

$E_n \otimes F_n, E_n \in \mathcal{E}(\mathcal{H}_1), F_n \in \mathcal{E}(\mathcal{H}_2), \lambda_n \geq 0, \sum_n \lambda_n = 1\}$ にあるエフェクトを測定すれば十分である. 上記の結果によれば, (1) を満たすが (2) を満たさないような Λ_{η_1} と Λ_{η_2} についてはそれらを同時に実現するような量子チャネルは存在しないが, \mathcal{E}_{\min} を \mathcal{E}_0 に移すような非物理的な写像であれば $\Lambda(A \otimes \mathbf{1}) = \Lambda_1(A), \Lambda(\mathbf{1} \otimes B) = \Lambda_2(B)$ を満たすようなものが存在する. この写像は本当に非物理的なのだろうか. つまり, この写像から計算される測定結果は物理的には実現できないのだろうか. そうではない. 実際, Λ が (CP 性を満たす) 量子チャネル Λ_0 と正写像 $\Phi_1: \mathcal{E}(\mathcal{H}_1) \rightarrow \mathcal{E}(\mathcal{H}_1), \Phi_2: \mathcal{E}(\mathcal{H}_2) \rightarrow \mathcal{E}(\mathcal{H}_2)$ を用いて $\Lambda = \Lambda_0 \circ (\Phi_1 \otimes \Phi_2)$ と書くことができる場合には, 入力状態 ρ を物理的に $\Lambda_0^*(\rho)$ へと移した後に, エフェクトの局所的な読み替え Φ_1 と Φ_2 を行えば測定結果が再現されるのである. 以上の議論から, 我々は以下のような新しいクラスの定義に導かれる.

Definition 2 最小両立可能な量子チャネル $\Lambda_1: \mathcal{L}(\mathcal{H}_1) \rightarrow \mathcal{L}(\mathcal{H}_0)$ と $\Lambda_2: \mathcal{L}(\mathcal{H}_2) \rightarrow \mathcal{L}(\mathcal{H}_0)$ は, 量子チャネル $\Lambda_0: \mathcal{L}(\mathcal{H}_1 \otimes \mathcal{H}_2) \rightarrow \mathcal{L}(\mathcal{H}_0)$ と正写像 $\Phi_1: \mathcal{L}(\mathcal{H}_1) \rightarrow \mathcal{L}(\mathcal{H}_1), \Phi_2: \mathcal{L}(\mathcal{H}_2) \rightarrow \mathcal{L}(\mathcal{H}_2)$ が存在し以下を満たすときに, 概量子両立可能であるという. 任意の $A \in \mathcal{E}(\mathcal{H}_1)$ と $B \in \mathcal{E}(\mathcal{H}_2)$ について

$$\Lambda_0 \circ (\Phi_1 \otimes \Phi_2)(A \otimes \mathbf{1}) = \Lambda_1(A)$$

$$\Lambda_0 \circ (\Phi_1 \otimes \Phi_2)(\mathbf{1} \otimes B) = \Lambda_2(B).$$

ここで, 前定理で得られた真に広い最小両立可能なクラスは実は概量子両立可能なクラスと一致するのではないかという疑問が生じるのは自然である. この疑問に答えるのが次の結果である.

Theorem 2 量子ビット上の量子チャネル Λ_{η_1} と Λ_{η_2} が概量子両立可能であるための必要十分条件は以下の不等式を満たすことである.

$$\eta_1^2 + \eta_2^2 + (1 - \eta_1 - \eta_2)^2 \leq 1.$$

この結果によれば, 量子ビットにおけるノイズつき恒等チャネルの場合には概量子両立可能な組と量子両立可能な組は一致し, 最小両立可能だが量子両立可能ではない組は読み替えを許しても実現できないことがわかる.

4 まとめと今後の課題

本稿ではチャンネルの両立可能性について、合成系の選び方の影響を、量子ビット間のノイズつき恒等量子チャンネルを例にとり調べた。その結果、両立可能な組が最も多くなる合成系の取り方をした場合にあたる最小両立可能な組のなす集合は量子両立可能な組の集合よりも真に広いことがわかった。また、操作論的な議論から概量子両立可能性という定義を導入したが、概量子両立可能な組の集合は量子両立可能な組の集合と一致することも示された。

合成系の選び方と両立可能性の関係を調べるという大きな目標と照らし合わせると、今後の課題は多数残されている。まず、本研究で取り上げたのは量子ビット上の特殊な量子チャンネルのみであり、組の集合に関する上記の包含関係が一般的に成り立つかどうかは全く定かではない。本稿で紹介した定理の証明は Clifford 代数を用いたかなり具体的な計算に依存しており、一般論を展開するためには新たなテクニックの開発が必要であろう。また、大きな研究課題として合成系の構造を定める自然な要請を探すというものが考えられる。量子系（特に量子ビット）の状態空間を一般確率論に対するいくつかの要請から導くという研究はいくつか存在するが、合成系を定めるという研究はこれまで行われてこなかった。両立可能性に関する何らかの自然な要請がこの合成系を定めることにつながるのであれば面白い。

参考文献

- [1] P. Busch, P. Lathi, J.-P. Pellonpää and K. Ylinen, *Quantum Measurement*, Theoretical and Mathematical Physics, Springer International Publishing, 2016.
- [2] W. Wootters and W. Zurek, *A Single Quantum Cannot be Cloned*, *Nature*, vol. 299, pp. 802–803, 1982.
- [3] T. Heinosaari, T. Miyadera and M. Ziman, *An invitation to quantum incompatibility*, *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, vol. 49, pp. 123001, 2016.
- [4] H. Barnum, J. Barrett, M. Lefier and A. Wilce, *Generalized No-Broadcasting Theorem*, *Physical Review Letters*, vol. 99,

pp. 240501, 2007.

- [5] M. Yamada and T. Miyadera, *Incompatibility of quantum channels in general probabilistic theories*, *Physical Review A*, vol. 110, pp. 062210, 2024.



RESEARCH PROJECT

研究プロジェクト

「データ駆動型社会物理」研究会 開催報告

小 串 典 子

2024年11月22日に「Data-driven Social Physics (SocPhys@MeiGaku)」と題した国際研究会[1]を、明治学院大学 横浜キャンパス図書館において開催した。午後半日で発表件数7件の小規模な研究会であるが、学内外から29名の参加者が集まり、活気ある研究交流の機会となった。

以下、本研究会の概要と開催報告である。

• 研究会趣旨

人の社会の構造や活動は古くからの自然科学の興味の対象であり、それぞれの分野で研究が進められてきた。一方で、こうした現実の大規模で複雑な系を直接的あるいは包括的に扱うことは、系のサイズからも長らく困難であった。近年、計測機器の進歩と普及により、様々な人の活動が電子ログとして記録され、これまでにない規模と精度での解析が可能になってきている。その成果として、これまでは困難であった人の社会についての直接的かつ包括的な研究が可能になり、21世紀の科学として大きな成果を収めている。

他方、個々には単純な規則に従う要素が集団で示す非自明で複雑な振る舞いは協同現象として知られ、物理学の分野においても大きな興

味の対象である。例えば非平衡系での協同現象として、生物の群れなどに見られる複雑な時空間パターンは「アクティブマターの集団現象」として注目を集め、個別の現象や系を超えた俯瞰的な見方をするものの有効性が示されてきた。また例えば、オンライン百科事典であるWikipediaはデジタル空間上において編集者と記事が構築する「生態系」である。再帰的指標を軸に編集関係を解析することで、その多様な記事と編集者の特徴が明らかになって来ている[2-5]。

現在、現実の大規模で複雑な系をネットワークとして記述し、多様な系の様相や動態をより一般に複雑ネットワークの問題として捉える多くの研究が精力的に進められている。本研究会では話題を人の社会に絞り、データ解析と理論モデリングの双方向から研究を進めている研究者が集まった。人の社会について統計物理学の視点から統一的にアプローチすることで新たな知見と興味の焦点を得ようというのが本研究会の趣旨である。

• 研究会プログラム

本研究会では、Kimmo Kaski氏による基調講



SocPhys@MeiGaku. (左) 研究会ポスター。立て看として遠望橋と図書館前に掲示。(右) 研究会での一コマ。Kimmo Kaski氏(中央)、佐野幸恵氏(前列左から4人目)、島田尚氏(左端)らと。

演を含め3件の招待講演を行った。招待講演の詳細は下記の通りである。

- ▶ (基調講演) Kimmo Kaski (Aalto大学)
“Social Physics: Data-driven Studies of Human Social Networks” (携帯電話のデータをもとにした、知人関係の構造や人の社会行動の特徴についての明らかにしてきた一連の研究)

Kaski氏は、人間の社会的繋がりや構造や社会行動について、実データ解析と理論モデリングの双方からの研究を世界でも先導的に進めている。本講演で紹介された、人の社会行動における地域差の研究 [6] は、小串とKaski氏らによる最近の共同研究である。

- ▶ 佐野幸恵 (筑波大学)
“Quantifying collective attention on online social media” (プロ野球についてのX投稿やリツイートデータから、ファン心理を定量的に捉える試み)
- ▶ 島田尚 (東京大学)
“Opinion Dynamics on Model and Real Networks” (意見形成の基本的なメカニズムについての理論研究、および携帯電話の通話データをもとにした実ネットワーク上での研究)

一般講演4件は、大学院生を含む若手研究者の講演を中心とした。動画投稿サイト「ニコニコ動画」の投稿者と利用者が構成する「社会」の研究、立地から店舗間相互作用を評価しようという店舗立地の物理、日本の街における実際の人流データ解析など、いずれもデータ解析と理論研究の双方から「社会」を理解することを目指す意欲的なテーマばかりである。(詳細は研究会HP [1] 参照)

● 参加状況の詳細

本研究会は、横浜キャンパスにおける対面での交流を志向した。そのため発表は全てon-siteとしハイブリッド形式で開催した。結果として、学内外から合計29名(on-site 20名 + online 9名)の参加者が集まった。多くの現地参加に加えて、予想よりも多数の異なる大学・研究所・企業から参加が集まった。参加者の所属は以下の通り

である。

Aalto大学 (1名)・東京大学 (5名)・筑波大学 (2名)・東京科学大学 (4名)・静岡大学 (1名)・理化学研究所 (1名)・ソフトバンク株式会社 (5名)・トヨタ自動車株式会社 (1名)・明治学院大学 (9名)

● 横浜キャンパスでの研究会開催について

研究会会場として、今回は横浜キャンパス図書館のオープンスペース(アクティブコモンズ)を利用した。研究会中は講演を図書館入り口に設置したディスプレイで中継し、データサイエンスや社会物理といった分野自体に馴染みの薄い学生の気軽な聴講も可能とした。直接確認できていないが、ディスプレイを眺める学生も多くいたと聞いている。社会物理は、既存の学問分野と異なり基礎理論もまだ確立していない。そのため、丁寧なデータ解析に基づく各論的現象論と系の理論研究の双方を、現在は文字通り行きつ戻りつしながら進めている。Kaski教授のように分野を先導してきた世代と、佐野氏、島田氏や大学院生といった若手が共に分野を牽引している。こうした成長期にある分野における国際的にも先端の研究の一端を、学生が直接見聞きする機会を提供できたのであれば、世話人として望外の成果である。

図書館からは、図書館改修時には研究会などの開催も想定してのスペース設計だったものの、これまであまり研究会開催の機会がなかったと伺っている。こうした事情もあってか、図書館スタッフの方々には準備段階から研究会開催中の対応含めて大変よく協力していただいた。図書館活用の一例として、本研究会開催が少しでもお役に立てば幸いである。

最後に、本研究会開催にあたっては情報数理学部事務室にも多大な協力を頂いた。後日、参加者の方々から「心温まる」良い会だったと感想を頂いた。皆様のアドバイスと助けがなければ、とてもこの様な会を開催することは出来なかった。この場をお借りして、改めて感謝を申し上げたい。今後とも、こうした交流をつなげて行きたい。

本研究会は、JST さきがけ「数理構造活用」領域、情報科学研究所、情報科学融合領域センターの共催を得て開催した。

参考文献

- [1] 研究会 HP: <https://sites.google.com/view/socphys2024mg/english>
- [2] F. Ogushi, J. Kertész, K. Kaski, and T. Shimada, “Ecology of the digital world of Wikipedia”, *Scientific Reports* 11 (2021) 18371
- [3] F. Ogushi and T. Shimada, “Comparison of metrics for measuring Wikipedia ecology: characteristics of self-consistent metrics for editor scatteredness and article complexity”, *Artificial Life and Robotics* 28 (2023) 62
- [4] T. Shimada, F. Ogushi, J. Török, J. Kertész, and K. Kaski, “A simple model of edit activity in Wikipedia”, *Physica A* 630 (2023) 129253
- [5] 小串典子, 「データとモデルで読み解く Wikipedia 「生態系」」, *数学セミナー* 2025 年2月号 50-56
- [6] F. Ogushi, R. Chandreyee, and K. Kaski, “Differences of communication activity and mobility patterns between urban and rural people”, *Journal of Computational Social Science* 8 (2025) 51

第23回高性能計算物理勉強会の報告

加 堂 大 輔

1 研究会の趣旨

高性能算物理 (HPC-Phys) 勉強会は、現代の計算物理学において不可欠となっている大規模数値シミュレーションに関し、その活用法や技術的課題について議論・共有することを目的に、開催している研究会です。物理学の多くの分野において、数値計算が中心的研究手法となっている一方、最適化や新たなアルゴリズムの導入に高度な技術対応が求められるため、研究者間の情報交換や協力体制がますます重要となっています。本研究会では、こうした背景をふまえ、計算物理の幅広い話題について意見を交わし、新技術や計算手法の動向を共有する場を提供しています [1]。

第23回目となる今回は、「量子計算」をテーマに掲げ、明治学院大学情報数理学部附属情報数理科学研究所と計算基礎科学連携拠点 (JICFuS) [2] が共催する形で、2024年12月7日に明治学院大学 (白金キャンパス) にて開催しました [3]。

量子コンピュータは、古典計算機とは異なり、量子ビット (いわゆるキュービット) を用いた行列演算を活用した計算を行います。特定の問題では、古典計算機を大きく上回る性能が期待されていますが、量子状態は非常に壊れやすく、外部環境の影響で容易に崩れてしまいます。そのため、壊れた量子状態に由来するエラーの訂正が不可欠であり、多数の物理キュービットを使って論理キュービットを構成する必要があります。特に、誤り耐性量子コンピュータ (FTQC) は発生したエラーを取り除いて、計算を正確に維持する枠組みとして注目されています。今後のその実用化には、エラー訂正を支える技術の進展が重要な鍵を握ります。

今回の研究会では、量子計算分野で先進的な取り組みを行っているベンチャー企業 QunaSys の筒井翔一朗氏、今井良輔氏、小津泰生氏を講師に迎え、量子計算の入門・基礎から最先端ま

での内容の講演を実施することを計画しました。内容は、誤り耐性量子コンピュータ (FTQC) のアルゴリズムに関する講演と QunaSys が開発した量子計算ライブラリ QURI Parts のハンズオンです。聴衆としては、量子計算に関心をもつ理系の大学院生や、実際に量子計算を研究で使ったり、あるいは研究に量子計算を取り入れようとしている研究者を主な対象としました。

2 実施状況

当日の講演・ハンズオンは、13時から17時半まで行われ、量子計算の基礎から最新の研究動向までを幅広く取り上げていただきました。オンサイトおよびオンライン (Zoom) を合わせて、量子計算に関心のある研究者を中心に合計22名の参加がありました。関西からの参加者に加え、学部学生や大学院生の参加もあり、多様なバックグラウンドをもつ方々が集う、活気のある会となりました。また、講演後には研究者が参加する懇親会を開き、そこで更なる情報交換や交流を行うことができました。

研究会前半90分の筒井氏のトークでは、量子計算の基本的な原理から始まり、量子エラー訂正の重要性について分かりやすく解説されました。さまざまな量子計算の実現方法が紹介され、それぞれの特徴や利点にも触れられました。特に、表面符号と呼ばれるエラー訂正手法のアイデアに重点が置かれ、その仕組みや論理キュービットの構成法について具体的に説明されました。また、シュレディンガー方程式ではない微分方程式を解く量子アルゴリズムについても議論されました。全体を通して、量子計算の安定化に向けた現在の技術的課題と展望が示されました。

後半では、今井良輔氏と小津泰生氏によって、QURI Partsのハンズオンが「QURI Parts ハンズオン Part 1」「QURI Parts ハンズオン Part 2」と題して、2時間30分にわたって行われました。

小津氏からは具体的なプログラムの書き方について、今井氏からは簡単なコードの構造や考え方について解説がありました。参加者は各自持参したコンピュータ上で、実際にコードを動かしながら学ぶことができました。プログラムを実行しながら実習することで理解が深まり、実践的な内容となっていました。

量子計算のオープンソースソフトとして、IBMのQiskitが有名で、Pythonで手軽に量子回路を扱えます。第5回HPC-Phys勉強会（早稲田大学での開催）では、Qiskitを使ったハンズオンでイジング模型の計算プログラムを作成しました。Qiskitは実機実行やシミュレーションが可能で、研究や教育にも広く活用されています。

一方、QURI Partsは、量子アルゴリズムを色々な環境で同じように使えるようにするためのソフトウェアです。プラットフォームに依存せず、一度書いたコードをさまざまなシミュレータや量子コンピュータで使えます。モジュールごとに分かれていて、必要な機能だけを選んで使え、高速なシミュレータの性能を活かせるように、いろいろな工夫がされていることがわかりました。

今回の研究会には学生の参加もあり、積極的な関心がうかがえました。本学部では3年次からコース分けがあり、数理量子情報コースでは量子計算を本格的に学ぶことができます。こうした研究会への参加は、教室では得られない刺激や学びの機会になります。実際の研究やソフトウェアに触れることで、理解が深まり、興味も広がるでしょう。今回の経験が、今後の学びへの良いきっかけとなることを期待しています。

今回の研究会では、量子計算に関する基礎的な内容から応用技術まで幅広く扱われ、多くの刺激を受ける機会となりました。その中で個人的には、量子計算の新たな可能性について改めて考えるきっかけとなり、筆者が最近取り組んでいるランジュバン法に基づく確率過程量子化の研究との接点にも気が付きました。この手法では、従来必要とされていたランジュバン時間の連続極限を回避する新たな方法論を提案しており [5, 6]、シュレディンガー方程式やファインマン経路積分とは異なる、確率過程による量子論の定式化に基づくものです。今回の研究会

を通じて、この方法で量子回路の長さ（深さ）を短くした実装の可能性にも思い至り、今後の量子アルゴリズムの展開に向けた新たなヒントを得ることもできました。

今回の研究会で、量子計算という新たな計算パラダイムに対する理解を深めるとともに、今後の研究に向けた貴重な学びと交流の場となりました。

参考文献

- [1] 高性能計算物理 (HPC-Phys) 勉強会, *About HPC-Phys workshop*, <https://hpcphys.kek.jp/introduction.html>.
- [2] Joint Institute for Computational Fundamental Science (JICFuS), <https://www.jicfus.jp/en/jointinstitute/>
- [3] Daisuke Kadoh, *The 23rd HPC-Phys Workshop*, <https://hpc-phys.kek.jp/workshop/workshop241207.html>
- [4] QunaSYS, <https://qunasys.com/en/>
- [5] D.Kadoh, M.Kato, M.Sakamoto, H.So, Stochastic Quantization with Discrete Fictitious Time, PTEP, Volume 2025, Issue 4, April 2025, 043B01, <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaf038>
- [6] 加堂大輔, 確率過程量子化法の新しい側面について, 情報数理科学研究所所内セミナー, 2025年3月26日.

テンソルネットワーク法を用いた量子もつれに関する 共同研究の報告

加 堂 大 輔 ・ 田 中 豪 太

1 研究の背景

場の量子論は、ミクロな世界で起こるさまざまな物理現象を説明するための基本的な理論です。この理論では、粒子は「場」として扱われ、空間のすべての点に広がっています。その意味での場の自由度は無限で、手計算で簡単に扱うことはできません。格子場の理論は、場の量子論をコンピュータで扱えるようにするために、時空間を細かい「マス目（格子）」に区切って計算する方法です。こうすることで、目では見えないミクロな世界のふるまいをシミュレーションできるようになります。この手法を使うと、宇宙のはじまりや物質の根本的な性質を理解する手がかりが得られます。

格子場の理論の数値計算では、これまで主にハイブリッド・モンテカルロ（HMC）法が広く用いられてきました。HMC法は、理論の作用関数に依存する確率を用いて、求めたい場の配位を生成する手法です。しかし、さまざまな物理系で作用関数が複素数の値を取り、配位の生成確率とは解釈できず、この方法は適用できなくなります。この問題は「符号問題」と呼ばれ、物質の根源に迫る研究を進めるうえで大きな障害となっていて、新しい計算手法の確立が大きなテーマになっています。

テンソルネットワーク法、中でもテンソル繰り込み群（TRG）法は、格子場の理論の新しい計算手法として注目されています。この手法では、分配関数や物理量の期待値をテンソルのネットワークとして表現し、繰り込み群的なアイデアでネットワークを粗視化することで、数値解析を実現しています。大きな体積での計算が容易であり、従来のHMC法で問題となる「符号問題」を回避できるという意味でも良い性質を持っています。TRG法を用いて格子場の理論を数値計算し、そこから物理現象の性質を明らかにする研究が大きな潮流を生み出しつつあります。

2 研究目的

本研究では、専門研究員の田中豪太氏との共同研究として、場の量子論におけるエンタングルメントエントロピー（EE）をTRG法を使って数値計算し、宇宙や物質の極小の構造について理解を深めることを目指しています。

エンタングルメントエントロピーは量子もつれの「度合い」を表す指標で、場の量子論を研究するうえで重要な役割を果たしています。特に、ホログラフィー原理や量子情報理論との関係から、多くの研究が行われています。しかし、粒子同士が影響し合う「相互作用のある系」では、EEの値を求めることは極めて難しい課題です。こうした中で、テンソルネットワーク法は、この問題を解決するための有力な方法として注目されています。

まずは、2次元時空においてEEをTRG法で計算するためのアルゴリズムの構成を行います。そして、確立した計算アルゴリズムを2次元のスカラー場の理論に適用して、EEを数値的に評価し、そこからこの理論に見られる相転移の性質を調べます。次に、3次元や4次元の時空でもEEを計算できるように、アルゴリズムを拡張する予定です。そして、そのアルゴリズムを実際の計算プログラムとして実装し、最終的には4次元の場の量子論におけるEEを数値的に求めることで、宇宙と物質のミクロなふるまいを明らかにしていきます。

3 本年度の研究実施内容

エンタングルメントエントロピー（EE）をTRG法で計算するためのアルゴリズムの構成を進めました。具体的には、2次元の格子時空上で、一般的な部分系サイズにも対応可能な計算アルゴリズムを構築しました。

そして、この手法を、厳密解が知られた2次元イジングモデルでテストし、EEのサイズ依存

性から中心電荷を抽出した結果、期待される理論値と一致することを確認しました。これにより、開発したアルゴリズムの正当性を実証することができました。現在、2次元の実スカラー場の理論に対してTRG法を使って、EEの数値計算を行い、それを用いて相転移点の精密な決定を試みています。これらの計算には、手持ちの計算機に加えて、スーパーコンピュータ「富岳」も用いています。

研究成果は国内外の学会・研究会で複数回発表しました。日本物理学会では、開発したEEの計算アルゴリズムや実際の数値計算結果について講演しました [1, 2, 3, 4]。また、英国リバプール大学で開催された格子場理論の分野で最大となる国際会議LATTICE2024では、2次元イジング模型におけるEEの計算結果を発表しました [5]。この発表内容は海外の研究者からも興味を持たれ、質疑応答の時間を通じて他の計算手法との比較や、他の模型や高次元系への拡張など今後の展望について活発な議論が行われました。金沢大学で実施された研究会「Tensor Network 2024」では、幅広い分野から集まったテンソルネットワーク法の研究者たちに向けて、EEを用いた臨界現象の解析について講演しました [6]。ここでは、EEの計算アルゴリズムの詳細やさらなる改善点について議論し、他の研究者からのフィードバックを得ることができました。

4 まとめ

本研究では、宇宙や物質のミクロな構造を明らかにするために、場の量子論のエンタングルメントエントロピーを、格子場の理論とテンソル繰り込み群法を活用して数値的に評価する手法の開発を行いました。まず、2次元の格子時空中で任意の部分系に適用可能な計算法を構築し、2次元イジング模型を用いて構築した手法が正しく機能することを実証しました。その応用として現在、エンタングルメントエントロピーのテンソル繰り込み群計算を用いて、実スカラー場の理論の相転移点の精密な決定にも取り組んでいます。今後は、3次元・4次元への拡張を通じて、より現実的な理論への応用を進めていく予定です。

参考

- [1] 田中豪太, 早崎貴大, 加堂大輔, 武田真滋, 1+1次元格子模型の量子もつれのテンソルネットワークによる研究, 日本物理学会第79回年次大会, 北海道大学, 2024年9月16日.
- [2] 早崎貴大, 加堂大輔, 武田真滋, 田中豪太, テンソル繰り込み群を用いたスカラー場の理論におけるエンタングルメント・エントロピーの数値解析, 日本物理学会第79回年次大会, 北海道大学, 2024年9月16日.
- [3] 田中豪太, 早崎貴大, 加堂大輔, 武田真滋, 1次元量子系における量子エンタングルメントのテンソルくりこみ群解析, 日本物理学会2025年春季大会, オンライン, 2025年3月19日.
- [4] 早崎貴大, 加堂大輔, 武田真滋, 田中豪太, 2次元実スカラー ϕ^4 理論におけるエンタングルメント・エントロピーと臨界点の連続極限日本物理学会2025年春季大会, オンライン, 2025年3月19日.
- [5] T.Hayazaki, D.Kadoh, S.Takeda, G.Tanaka. Entanglement entropy by tensor renormalization group approach. Proceedings of The 41st International Symposium on Lattice Field Theory – PoS (LATTICE2024).
- [6] 田中豪太, Numerical analysis of entanglement entropy using tensor network, Tensor Network 2024 (TN24), 石川県政記念しいのき迎賓館, 2024年11月16日.

研究集会および特別講演会の報告

川 島 誠*

Abstract

情報数理科学研究所および科学研究費助成事業の援助を受けて、2025年2月28日から3月12日まで、Sinnou David氏（ソルボンヌ大学）を招聘した。

3月3日から5日には、明治学院大学白金校舎において、情報数理科学研究所との共催により研究集会「Diophantine Analysis and Related Fields」を開催した。さらに、3月7日には明治学院大学横浜校舎にてDavid氏による特別講演を実施した。以上の活動について報告を行う。

1 研究集会および特別講演会の実施について

本セクションでは筆者の申請により情報数理科学研究所との共催で行われた研究集会と、招聘者Sinnou David氏の特別講演会について報告を行う。

1.1 研究集会について

情報数理科学研究所との共催で、国際研究集会「Diophantine analysis and related fields 2025」を2025年3月3日（月）から3月5日（水）まで白金校舎で行った。3月3日の集会開催のOpeingに情報数理科学研究所から穴田啓晃先生に共催のご挨拶を頂いた。講演者は14名（海外からの講演者は5名）、参加者は3日間で38名と盛況であった。講演ではDiophantus近似論、Diophantus方程式論、Mahlar関数論、超越数論などにかかわる最先端の研究について紹介がなされ、質問討議も活発に行われた。

1.2 特別講演会について

2025年3月7日（木）に横浜校舎でSinnou David氏による特別講演会「Automata and

Diophantine approximation」を行った。本講演は第一部と第二部から成る2時間講演で内容全体として、計算理論・数論・解析の交差点における深い問題群へのアプローチが丁寧に解説された。詳細は以下の通りである。

第一部

数論的観点と計算論的観点から実数の複雑さや分類、特に自動数列（automatic sequence）や超越数の性質について紹介がなされた。まず実数を代数的次数により分類し、有理数（次数1）、代数的無理数（次数 ≥ 2 ）、そして最も複雑な超越数（次数無限大）の定義がなされた。次に「自動数列」を定義し、例えばThue-Morse列のように、有限状態機械によって定まる数列が紹介され、それに対応する実数（例：Kempner数）が超越数であることのMahlerの手法に依る証明の解説がなされた。

第二部

計算可能性の観点から実数を再分類し、Turing機械によって短時間で桁が生成できる「単純な数」や、Cobhamの問いに関連する「自動実数」の扱いが議論された。LiouvilleやRothの定理、さらに p 進的Rothの定理やSchmidtの部分空間定理により、自動実数が超越的であることが証明がされることが言及された。また、Cobhamの定理やAdamczewski-Bugeaudの結果により、代数的無理数は有限オートマトンで生成できないことも示されることが紹介された。さらに、Lerch関数や多重対数関数を用いて、超越数の線形独立性にも言及し、Padé近似や微分作用素の導入による新しい超越性判定のアプローチの可能性も示唆された。

この講演に対して、参加者からは活発な質疑応答があり、情報理論において数の複雑性の理解がどのように活用されるのか議論が交わされた。

* kawasima@mi.meijigakuin.ac.jp

研究集会，特別講演会および共同研究の報告

川 島 誠*

Abstract

情報数理科学研究所および科学研究費助成事業の援助を受けて、2025年3月8日から11日にかけて、S. David 氏（ソルボンヌ大学）と平田典子氏（日本大学）とともに、「SiegelのG関数の特殊値の間の代数的関係性の解明およびGrothendieck周期予想への応用」に関するセミナーを行った。以上の活動について報告を行う。

1 共同研究について

筆者、David 氏と平田典子氏で「SiegelのG関数の特殊値の間の代数的関係性の解明およびGrothendieck周期予想への応用」に関するセミナーを行った。本セミナーでは、長期的な目的である、円周率 π や楕円曲線の周期を一般化した“代数多様体の周期の間の代数的な関係式は代数多様体の幾何学的な性質のみで決まるであろう”というGrothendieck周期予想が成り立つ実例を得ることを見据えてSiegelのG関数の代数的数における特殊値の線形独立性に関して議論を行った。ここでSiegelのG関数とは、代数関数や有理数パラメーターをもつGaussの超幾何関数を一般化した、代数的数を係数に持ちある線形微分方程式の解になる冪級数族で、それらの代数的数における値全体のなす環は代数体上定義された代数多様体の周期全体のなす環と一致すると予想されている対象である。特にセミナーでは p, q を0以上の整数、 $a_1, \dots, a_p, b_1, \dots, b_q$ を負の整数ではない有理数としたとき、次の一般超幾何関数：

$${}_pF_q \left(\begin{matrix} a_1, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_q \end{matrix} \middle| z \right) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(a_1)_k \cdots (a_p)_k}{(b_1)_k \cdots (b_q)_k} \frac{z^k}{k!}$$

とそれ隣接する関数の異なる値における線形独立性について考察した。ここで、 $(a)_k$ は $a \in \mathbb{Q}$

に対して、 $(a)_0 = 1, (a)_k = a(a+1) \cdots (a+k-1)$ で定義されるPochhammer記号である。具体的には任意の p, q に対して、一般超幾何関数とその隣接する関数の異なる値達での関数族に対して明示的なPadé近似を構成し、その性質を調べることでそれらの代数的数における値が代数体上線形独立になるための判定法を与えた。ここで $p = q+1$ の場合のみ上述のG関数になるが、一般的な p, q に対しても議論が成り立つことを注意しておく。ここでは $p = q+1 (= dとおく)$ のとき定理を紹介する。

Theorem 1.1. K を代数体、 m を自然数とし、 $\alpha_1, \dots, \alpha_m \in K \setminus \{0\}$ を相異なる元とする。 v を K の素点とし、 $\beta \in K \setminus \{0\}$ とする。 a_i, b_j が、 a_i かつ $a_i + 1 - b_j$ ($1 \leq k \leq d, 1 \leq j \leq d-1$)が正整数でないと仮定する。このとき $v, a_i, b_j, \alpha_k, \beta$ に依存するeffectiveな定数 $V = V_v(a_i, b_j, \alpha_k, \beta)$ で次を満たすものが存在する。

$V > 0$ であれば、 $d_m + 1$ 個の K_v の元：

$${}_dF_{d-1} \left(\begin{matrix} a_1, \dots, a_d \\ b_1, \dots, b_{d-1} \end{matrix} \middle| \frac{\alpha_i}{\beta} \right),$$

$${}_dF_{d-1} \left(\begin{matrix} a_1 + 1, \dots, a_s + 1, a_{s+1}, \dots, a_d \\ b_1, \dots, b_{d-1} \end{matrix} \middle| \frac{\alpha_i}{\beta} \right)$$

($1 \leq i \leq m, 1 \leq s \leq d-1$)および1は K 上一次独立である。

定理1.1は[1]の一般化となっている。定理1.1の証明で重要な点は、2024年度に筆者がAnthony Poëls氏との共同研究[2]で考察した関数族のPadé近似から得られる行列式の比零性の証明の枠組みを、一般超幾何関数とその隣接する関数族でも確認した点にある。但し、この手法は比零性を示すには有効な手法であると考えられるが、[1]の議論で得られるような具体的な行列式の値を得るのは難しいことを注意しておく。この手法はさらに一般的なホロノ

* kawasima@mi.meijigakuin.ac.jp

ミック級数でも成り立つことが期待される。これらの内容について現在論文を作成している。

References

- [1] S. David, N. Hirata-Kohno and M. Kawashima, *Linear Forms in Polylogarithms*, Ann. Scuola Norm. Sup. Pisa Cl. Sci, **23** no. 3, (2022), 1447-1490.
- [2] M. Kawashima and A. Poëls, *On the linear independence of p -adic polygamma values*, preprint, available at <https://arxiv.org/pdf/2410.06789>.

素粒子現象論に対する数値的アプローチ

山田敏史

素粒子物理学の「標準模型」と呼ばれる理論は、これまでの実験結果のほとんどを正しく説明する非常に成功した理論である。だが、ニュートリノ微小質量、暗黒物質、宇宙の物質・反物質非対称性、初期宇宙の加速膨張（インフレーション）、 $U(1)$ ハイパーチャージの量子化といった、標準模型では説明できない現象もいまだ存在する。私の研究分野である「素粒子現象論」は、こうした現象を説明する新たな素粒子理論を構築し、さらに、その新理論を実験的に検証する方法を明らかにすることを目指す。

2024年度は「45表現ヒッグス場を導入したSU(5)大統一理論」、「超対称化した標準模型のflat direction（ポテンシャルが平坦な方向）による初期宇宙のインフレーションとバリオン数生成」、「矮小銀河からの γ 線の観測による、ヒッグスポータル・マヨラナ暗黒物質の探索」という3つのテーマについて研究を行い、数値解析により、標準模型を超える新たな素粒子理論の検証可能性を明らかにした。これらの研究成果を以下に報告する。

1 45表現ヒッグス場を導入したSU(5)大統一理論

標準模型の $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ ゲージ群をSU(5)群に統一する「SU(5)大統一理論」は、 $U(1)$ ハイパーチャージの量子化を説明することができるため、標準模型を超える理論の有力候補と考えられている。だが、標準模型を単純に拡張しただけでは、(i)ゲージ結合定数の統一を説明できない、(ii) d, s, b クォークと e, μ, τ レプトンの質量の違いを説明できない、という問題が生じるため、現実的な素粒子理論にはならない。

本研究では、(i) (ii)の問題を同時解決する方法として、SU(5)群の45表現のヒッグス場を導入した。そして、この場から生じるスカラー粒子たちの質量の差により、ゲージ結合定数の繰

り込み群方程式を修正し、ゲージ結合定数の統一を説明した。さらに、この45表現ヒッグス場のクォークとレプトンに対する結合の違いにより、 d, s, b クォークと e, μ, τ レプトンの質量差を説明した。

本研究は、45表現ヒッグス場を導入したSU(5)大統一理論の実験的徴候を議論した。一般に大統一理論は、陽子や原子核中の束縛中性子といった本来安定なはずの粒子が極めて稀に崩壊する「核子崩壊」と呼ばれる現象を预言する。そこで本研究は、45表現ヒッグス場を導入したSU(5)大統一理論の中で、核子崩壊を媒介する新粒子を特定し、数値計算により、核子崩壊の崩壊先ごとの頻度の予測範囲を求めた。そして、2027年に稼働するハイパーカミオカンデ実験の核子崩壊探索により、この理論の予測が検証される可能性があることを示した。

以上の研究成果を論文[1, 2]にまとめて、査読付英文学術誌に掲載した。

2 超対称化した標準模型のflat directionによる初期宇宙のインフレーションとバリオン数生成

ボワンカレ対称性を拡張した超対称性を持つ「超対称標準模型」は、理論的側面から、標準模型を超える理論の有力候補と考えられている。超対称標準模型には、flat directionと呼ばれる、ポテンシャルがほぼ平坦な方向がある。この方向に対応するスカラー粒子は、slow-roll条件を満たすことができるので、初期宇宙のインフレーションを引き起こした未知の素粒子「インフラトン」の正体である可能性がある。

本研究は、超対称標準模型のflat directionに対応するスカラー粒子がインフラトンとして働く理論を精査した。

論文[3]では、flat directionが $n = 4, 5, 6, 7, 9$ の高次スーパーポテンシャル項で持ち上げられる場合それぞれについて、Planck実験と

BICEP実験で得られた宇宙背景放射のデータにより、理論のパラメータを制限した。そして、超対称性をソフトに破る項の大きさと、高次スーパーポテンシャル項の係数との関係を予測した。

論文[4]では、flat directionに対応するスカラー粒子が、初期宇宙のインフレーションを引き起こすことに加えて、崩壊に伴ってバリオン数を生成し、それが現在の宇宙の物質・反物質非対称性の起源となる理論を構築した。そして、理論のパラメータ空間を調査し、Planck実験とBICEP実験のデータと無矛盾かつ、現在の宇宙のバリオン数密度の観測値を正しく説明できるパラメータセットを発見した。

3 矮小銀河からの γ 線の観測による、ヒッグスポータル・マヨラナ暗黒物質の探索

ヒッグスポータル・マヨラナ暗黒物質モデル[PTEP 2023 (2023) 8, 083B04] は、ゲージ荷を持たない Z_2 -oddマヨラナ粒子が、標準模型のヒッグス場と、高次項を通じて結合するモデルである。このマヨラナ粒子は安定である。そのため、輻射優勢期の宇宙において高次項を通じて少しずつ生成されたマヨラナ粒子が宇宙に残存し、それが現在の宇宙の暗黒物質になる。

本研究は、このマヨラナ粒子（暗黒物質）が現在の宇宙で僅かに対消滅し、W,Z ボゾンやヒッグス粒子を生成して、それらが段階的に崩壊して γ 線を生成する過程に注目した。特に、銀河系周辺の矮小銀河に蓄積された暗黒物質の対消滅を起源とする γ について、暗黒物質分布の理論予想を利用して、数値計算により γ 線のフラックスを予測した。そして、現在のFermi-LAT実験のデータとの比較を行い、ヒッグスポータル・マヨラナ暗黒物質モデルのパラメータをどこまで制限できるか、明らかにした。この研究成果を論文 [5] にまとめて、査読付英文学術誌に掲載した。

参考文献

- [1] N. Haba, K. Nagano, Y. Shimizu and T. Yamada, PTEP **2024**, no.5, 053B05 (2024)
- [2] N. Haba, K. Nagano, Y. Shimizu and T. Yamada, PTEP **2024**, no.10, 103B04 (2024)

- [3] N. Haba, Y. Shimizu, Y. Tanabe and T. Yamada, PTEP **2024**, no.9, 093C01 (2024)
- [4] N. Haba, Y. Shimizu, Y. Tanabe and T. Yamada, PTEP **2024**, no.11, 113C01 (2024)
- [5] N. Haba, J. Ikemoto, S. Yasuhiro and T. Yamada, PTEP **2024**, no.10, 103C02 (2024)

謝辞

本研究の遂行にあたり、太田和俊教授、酒井一博教授よりご支援と議論・アドバイスを頂きましたことに感謝申し上げます。

研究所イベント一覧

○TCSセミナー¹「2024年 Nobel物理学賞の解説と深層学習理論の先端」

講 師：東京大学教授 鈴木 大慈 氏

開 催 日：2025年1月16日(木)

開催場所：オンライン

担当所員：今井 浩

○TCSセミナー¹「マッチングの安定性とサイズ最大化」

講 師：東京科学大学准教授 横井 優 氏

開 催 日：2025年1月17日(金)

開催場所：オンライン

担当所員：今井 浩

¹ Theoretical Computer Science の分野からお話頂く、当研究所のセミナー。

所員・助手・専門研究員紹介

	氏名	職位	学位	研究分野
所 長	今井 浩	教 授	工学博士	情報科学
主 任	穴田 啓晃	教 授	博士（情報学）	暗号理論
所 員	阿部 香澄	准教授	博士（工学）	人間情報学 (ヒューマンインタフェース, インタラクション)
	太田 和俊	教 授	博士（理学）	理論物理学（素粒子論）
	小串 典子	准教授	博士（工学）	統計物理
	加堂 大輔	教 授	博士（理学）	素粒子物理学
	亀田 達也	教 授	博士（心理学）	実験社会科学, 社会的意思決定, 社会心理学
	川島 誠	准教授	博士（理学）	整数論
	酒井 一博	教 授	博士（理学）	物理学（素粒子理論）
	佐々木 博昭	教 授	博士（工学）	統計的機械学習
	永田 毅	教 授	博士（理学）	人工知能（機械学習）, 画像解析（特に顔画像解析）, 画像認識, 画像生成
	宮寺 隆之	教 授	博士（学術）	量子情報理論, 量子基礎論, 数理物理
助 手	山田 敏史	助 手	博士（理学）	理論物理学（素粒子現象論）
専 門 研究員	田中 豪太	専 門 研究員	博士（理学）	素粒子物理学

編集後記

巻頭言で今井所長がお書きのとおり、情報数理科学研究所は学部開設の2024年度より各方面への活動を開始しました。その中でも各所員の研究上の興味や学術的「問い」を垣間見ることができるのがこの年報であることを願い、第1号の編集作業を柴田さんと進めました。御覧になる方々のお眼鏡で検証頂けましたら幸いです。

[穴田 啓晃]

この度、年報第1号を無事に発刊できましたこと、大変嬉しく存じます。私事ながら、十数年ぶりの仕事復帰ということもあり、手探りでの編集作業となりましたが、「より良いものを作りたい」という想いで、穴田先生と細部にわたり話合いや調整を重ねてまいりました。

また、相和印刷株式会社の笠井様には、こちらの細かな要望にも快く、かつ迅速にご対応いただき、おかげさまで滞りなく刊行することができました。心より感謝申し上げます。

最後に、本書が今後の研究所の発展の一助となれば幸甚に存じます。

[柴田 美香]

情報数理科学研究所 年報 執筆要項

(目的)

第 1 条 この申合せは、情報数理科学研究所所員（情報数理学部に所属する専任教員）が1年間の研究活動内容を報告する「情報数理科学研究所年報」（以下、「年報」）の寄稿について申合せるところを目的とする。

(寄稿内容)

第 2 条 年報は、次のいずれかの項に該当する内容の文章を寄稿する。

- (1) 研究所の予算で開催した研究会や講演などの実施報告
- (2) 所内研究紹介のまとめ
- (3) 当該年度に所員が遂行した研究の報告
- (4) その他、所員会議で承認された内容

(刊行)

第 3 条 「情報数理科学研究所年報」は、原則として年1回（7月頃）刊行する。

(執筆要領)

第 4 条 掲載原稿は、未発表・未投稿のものに限る。

- 2 寄稿原稿は、所員会議で指定された様式を用い、電子データの形で提出期限までに情報数理科学研究所に提出する。
- 3 執筆者は、提出された原稿が明治学院大学リポジトリにおいて公開されることに同意するものとする。

2025年8月31日発行

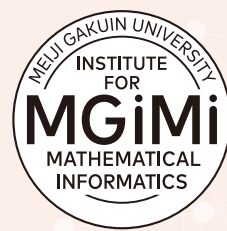
明治学院大学 情報数理学部付属
情報数理科学研究所 年報 第1号

編集・発行：明治学院大学 情報数理学部付属
情報数理科学研究所
〒244-8539 横浜市戸塚区上倉田町1518
TEL:045-863-2330
HP:<https://mg-imi.meijigakuin.ac.jp>

印 刷：相和印刷株式会社



明治学院大学
情報数理学部附属
情報数理科学研究所



年報 第1号
〔2024年度〕