

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K12638

研究課題名(和文) 符号理論による量子情報同期と高分子生体物質による超長期情報保存の基礎理論構築

研究課題名(英文) Coding theoretic foundations of quantum information synchronization and longer-term information and long-term information storage via polymers

研究代表者

藤原 祐一郎 (Fujiwara, Yuichiro)

千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：20756142

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は情報通信における理論限界等の解明を主な目的とするものである。特に研究開始時点では、量子力学を用いた情報通信の仕組みやDNAを情報記憶媒体とする仕組みなどの、次世代情報システムにおける基礎理論構築が焦点としていたが、期せずして、より一般的に多くの情報システムに共通して適応可能な理論限界の導出が可能であることが判明した。中でも、デジタル情報の文脈において最も代表的な雑音のモデルであるビット反転と情報消失の効率的同時処理に必要な資源量と、X符号と呼ばれる特殊な情報圧縮技術に用いられる数学的構造との間の関係の発見が重要で、これにより双方の分野でこれまでに知られていなかった理論限界を導出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は情報科学における基礎理論の発展に貢献することを目的とするものであり、上述の研究成果はこの意味において、情報通信の信頼性向上と情報圧縮技術についての理解が数学により深まったという観点から、学術的にも、また工学的にも意義のあるものである。特に学術的には、これまで同種の学術的研究においては十分に活用されてこなかった、確率的組合せ論と呼ばれる数学の一分野を有効に活用しており、今後の新しい道筋を切り開いていると言える。

研究成果の概要(英文)：This research has focused on the mathematical and theoretical aspects of information transmission and storage. While the original goal was to investigate some of the most important technical problems appearing in next generation communications technologies such as quantum information communications and DNA information storage systems, the initial stages of this project unexpectedly discovered interesting theoretical bounds on the efficiency of error-correcting systems and information compression in more general settings. This led to our success in deriving much tighter bounds on the amount of resource we need to efficiently correct both bit flips and information loss simultaneously through a widely used class of error-correction schemes, called linear codes. We also found a close relation of such simultaneous bit-flip and erasure correction to an information compression technique, called X-compact. This finding led to better theoretical understandings of the compression technique.

研究分野：組合せ論，情報理論，量子情報

キーワード：確率的組合せ論 符号理論 誤り訂正符号 情報圧縮 組合せデザイン論 有限幾何学

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、既存の情報処理方式の枠組みが持つ物理的な限界が、性能向上を目指す上での現実的障害となってきた。例えば、現代の集積回路を構成する個々の部品の大きさが、原子一個分の大きさという、自明の限界に近づいていることはよく知られるところである。またこのようなハードウェアに起因する原理的制約が現実の課題となる中、極限にまで研ぎ澄まされたハードウェア技術を仮定した際に、アルゴリズムの洗練化などのソフトウェア面での技術向上が、一体どこまで情報処理性能の向上に貢献できるのかという、理論的な限界解析がソフトウェア技術においてもその重要性が増している。このため、情報処理機器の性能向上を今後も持続させるためには、革新的な着想による情報技術の転換が必要であり、またハードウェア技術の限界を承知した上で、ソフトウェア面での技術進歩が望まれている。

新しい枠組みでの情報処理の候補は幾つか挙げられるが、代表的なものに、量子情報処理と分子情報処理の二つがある。前者は、既存の情報処理の抽象的枠組みでは考えてこられなかった、量子力学という物理の体系を取り入れたものであり、後者は、主に生体に見られる有機分子構造体を制御することで情報処理を実現するという、構成的生物学を応用することで情報科学的ないしは情報工学的問題の解決を図るものである。

量子情報処理は、1980年代に Feynman や Deutsch などの物理学者により独立に考案された当初は、エネルギーを消費することなく計算することが可能であることなど、既存の情報処理の枠組みでは物理的に不可能であることが、原理的には可能になるという点を取りざたされていた。しかしながら、Shor (*SIAM J. Comput.*, 26 (1997) 1484-1509) による多項式時間で因数分解を行う量子アルゴリズムの発見や、Shor (*Phys. Rev. A*, 52 (1995) R2493-R2496) および Steane (*Phys. Rev. Lett.*, 77 (1996) 793) による量子情報の誤り訂正が可能であることの発見などが起爆剤になり、現在では、既存の枠組みでは不可能あるいは非常に難しい情報処理を、如何にして量子力学により実用化するかという視点での研究が盛んである。

また分子情報処理においても同様に、何が可能であるかという研究もさることながら、Church ら (*Science*, 337 (2012) 1628) や Goldman ら (*Nature*, 494 (2013) 77-80) がデオキシリボ核酸 (DNA) 中に大量の文字情報や音楽、デジタル画像を保存することに実験的に成功したことが契機となり、理論的には可能であると考えられていることを如何にして実現するかという、より現実的な要請が非常に重要な課題となっている。

2. 研究の目的

本研究の主要な目的は、端的に言えば符号理論を進展させることにより、革新的な情報処理技術実現へ向けての理論基盤を強化することであり、またこれを通して既存の符号理論の応用先においても一定の学術的貢献を狙うものである。さらに本研究では後述の通り、確率的組合せ論などの数学的道具の有効活用することを狙うのであるが、これにより組合せ論という数学における進展も見られることを期するものである。

このように本研究では、革新的な情報処理方式と既存の情報処理技術とを俯瞰することで、符号理論的な観点から共通項と相違点を見極め、問題解決を図ることから始めねばならない。もちろん前述した次世代の情報処理の実用化には様々な困難を退けなければならないが、共通する主要な困難の一つに、新しい情報処理方式を支えるハードウェアの技術が未成熟であるため、現状では信頼性が十分に得られないことが挙げられる。これは現在の半導体によるデジタル情報処理においても、その黎明期には同様の信頼性問題を抱えていたという経緯があり、これをソフトウェア的に解決するための基盤技術として生まれた基礎理論が符号理論である。現在では本来の目的である計算機内部の信頼性向上に止まらず、情報科学内外の様々な分野で応用されている符号理論であるが、情報技術革新の時代である今日においては、近年の広い応用先での発展のみならず、その原点に立ち返り、情報処理ハードウェアの信頼性を補う必須のソフトウェア技術としての進歩がより一層望まれている。

本研究の背景にある究極の目標は、前述の次世代情報処理技術の実用化を阻む技術的課題を克服するために、それらの基本設計部分についての基礎理論を、現代的な符号理論をもってして打ち立てることである。またこれと同時に、符号理論自体の発展を促し、デジタル情報処理やデジタル情報通信など、すでに広く符号理論がその重要性が認識されている代表的応用先においても貢献できることが期待され、波及効果の高い研究成果を得ることを目的とするものである。

3. 研究の方法

上記の方針の下、3年間という比較的短期間にて重要かつ飛躍的進展が望めるよう、本研究では、最も基礎的でありながら、これらの情報処理方式では進歩が非常に遅れている部分である、広い意味での情報通信についての、設計基礎理論に焦点を当てることから開始した。なお、ここで情報通信とは、ある点から空間上で離れた別の点への情報伝達だけでなく、時間軸上で離れた二点間の情報伝達、つまり日常語で言うところの情報の保存も含むと考えており、この空間軸と時間軸を同一視するという抽象化により、応用範囲の広い結果を得ることを狙っている。

この観点に立てば、情報を失うことなく安定して保持することや、またその情報を損なうことなく別の地点へ伝達することは、如何なる情報処理方式であれ、その最も基本的構成要素の

一つであり、またある意味同一の技術的要素である。これは単に、標準的な計算機が持つメモリや通信機能の抽象化というだけでなく、例えば、電子回路の各素子から各素子への情報の伝搬も情報通信と見なせるという、より根源的な意味でも情報処理の基本的構成要素をなしているということである。

本研究では、量子情報処理と分子情報処理という、二つの全く異なる情報処理の枠組みがそれぞれ相補的な関係で持つ、一見異なる二つの弱点を、符号理論の観点から「情報通信における問題」としてモデル化することにより、統一された理論的枠組みで克服することを第一に目指した。前者の量子情報処理においては情報を同一にしたまま保持することが大変難しく、実用に耐える汎用量子情報計算機の実現を阻む、最も大きな技術課題である。反面、分子情報処理においては、情報の保持を担う高分子自体は安定した物質であり、多くの場合、一度記録した情報の同一性を保持することは、先進的な技術であるにも関わらず、比較的容易であると言える。反面、量子情報処理とは異なり、情報伝達の方法が課題である。例えば、Churchら (*Science*, 337 (2012) 1628) や Goldmanら (*Nature*, 494 (2013) 77-80) が提案する合成 DNA 情報記録方式では、本申請書ワードファイルの読み込みにでさえ、数日という単位の時間がかかる。この特性は、たとえ超長期的な情報保存を目的とするような場合であったとしても、非常に非効率であると言わざるをえず、またそれ以外の用途では、大幅な速度向上無しには実用に耐えることが出来ない。本研究では、量子情報処理と分子情報処理の間で、片方のより進歩している部分をもう片方に輸出するという、双方向的相乗効果により、信頼性とフレーム同期の問題の解決が第一の方針である。

なお、次節で述べる通り、本研究を進めていく中で、より符号理論の基礎的な部分での発展が大きく見込めることとなり、本研究としては第一の目標と並んで同じく重要な目的である既存の符号理論の応用先において貢献することが研究成果の中心的なものとなった。これにより、本研究の大半は、情報処理技術の構成要素はその多くが抽象化すれば情報通信であるという事実を元に、数学的な解析を符号理論の様々な応用先で行うことで実施された。

4. 研究成果

当初の計画では、情報処理の信頼性向上について、量子情報処理と DNA を利用した分子情報処理といった特定の枠組みに主な焦点をあて、研究を押し進める予定であった。この方針においても一定の成果は得られており、特に、DNA ストレージ等の分子情報処理技術では一般に大きな問題とならないが、量子情報通信においては主要な雑音である情報消失について、量子情報処理特有のディコヒーレンスという最も対処の難しい信頼性阻害要因とともに、量子情報処理の枠組みで、理論的には比較的容易に解決可能であることを示した。これについては 2018 年度に国際会議にて部分的進展についての口頭発表を行なっている。

しかし本研究の初年度においてはむしろ、現実に試作のデジタル回路を作り上げた際に、その回路が意図通りに正しく動作するかを如何に効率よく、安価に、かつ正確に検査するかという、信頼性を担保するための、情報処理方式の如何を問わない基本問題において最も大きな進展をみた。特に、こういった検査では、通常、検査対象回路の挙動データを如何に圧縮するかが最も重要な問題の一つとなるが、本研究においては、単純な線型回路で構成される既存圧縮技術を数学的に精査し直すことにより、現在生産されているコンピュータの CPU にでも簡単に応用できるような形で、既知の圧縮限界についての上限を理論的に改良したことが契機となり、以降様々な知見が得られることとなった。

上述の方針転換で得られた成果の中で特に重要なものは、消失と加法的雑音という二種類の誤り原因を同時にかつ効率よく解消することを可能にする、*separating* 検査行列と呼ばれる特殊な行列と、*X* 符号と呼ばれる情報圧出技術に関わる組合せ構造との間に深い関係性があることを見出したことである。消失と加法的雑音は量子情報処理や有機分子を用いた情報処理でも共通して重要な問題であるため、*X* 符号あるいはその類似の組合せ構造が、多くの次世代情報処理方式の信頼性向上に役立つことが期待されるものである。特に本研究の最終年度においては、それまでにおいて得られた *X* 符号について、情報圧縮や誤り訂正といった応用の場面で、実用上の要請からくるより厳しい数学的条件を満たすような特殊例について、その存在と効率的構成法を理論的に示した。また有限幾何学を用いた誤り訂正の仕組みについて、経験的に知られていたその有効性について、理論的な根拠を一定程度与えることに成功し、これらの研究成果と関連する組合せ論においても知見が深まった。中でも、現在はグラフ理論における支配集合の最小濃度問題と呼ばれる非常に基本的な問題に対して、確率的手法によるこれまでにない方針にて興味深い予備的研究成果が得られており、今後の発展が望まれる。また情報科学においても、既存の研究では確率的組合せ論が有効だと見なされていなかった、ある種の良い相関特性を持つ系列の存在問題においても、既知の結果を改良すること成功しており、本研究は、主要な目的の一つである波及効果の高い研究成果と知見を得るという点において、期待通りの進展が見られたと言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Y. Tsunoda, Y. Fujiwara	4. 巻 Jul
2. 論文標題 On the Maximum Number of Codewords of X-Codes of Constant Weight Three	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on Information Theory	6. 最初と最後の頁 1752-1756
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ISIT.2019.8849238	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 Y. Fujiwara, Y. Tsunoda	4. 巻 Aug
2. 論文標題 Small stopping sets in projective low-density parity-check codes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2019 IEEE Information Theory Workshop	6. 最初と最後の頁 559-563
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ITW44776.2019.8989047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Y. Tsunoda, Y. Fujiwara, H. Ando, P. Vandendriessche	4. 巻 64
2. 論文標題 Bounds on Separating Redundancy of Linear Codes and Rates of X-Codes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Information Theory	6. 最初と最後の頁 7577-7593
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIT.2018.2871477	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Y. Tsunoda, Y. Fujiwara	4. 巻 -
2. 論文標題 Bounds and Polynomial-Time Construction Algorithm for X-Codes of Constant Weight Three	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2018 IEEE International Symposium on Information Theory	6. 最初と最後の頁 2515-2519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ISIT.2018.8437884	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 Yu Tsunoda, Yuichiro Fujiwara	4. 巻 August
2. 論文標題 Explicit bounds on the length of optimal X-codes	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2017 IEEE International Symposium on Information Theory	6. 最初と最後の頁 3165-3169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ISIT.2017.8007113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Y. Tsunoda, Y. Fujiwara
2. 発表標題 Small Stopping Sets in Projective Low-Density Parity-Check Codes
3. 学会等名 2019 IEEE Information Theory Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Fujiwara, Y. Tsunoda
2. 発表標題 On the Maximum Number of Codewords of X-Codes of Constant Weight Three
3. 学会等名 2019 IEEE International Symposium on Information Theory (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Fujiwarfa
2. 発表標題 Codes for correcting erasures with sporadic errors
3. 学会等名 27th British Combinatorial Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 角田有, 藤原祐一郎
2. 発表標題 Necessary Conditions for the existence of X-Codes of Constant Weight Three and a Polynomial-Time Construction
3. 学会等名 実験計画法と符号および関連する組合せ構造 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Tsunoda, Y. Fujiwara
2. 発表標題 Improved bounds through probabilistic methods for global quantum error correction
3. 学会等名 AMS Spring Central and Western Joint Sectional Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Fujiwara
2. 発表標題 Parity-check matrices for error-erasure separation and X-codes
3. 学会等名 AMS Spring Central and Western Joint Sectional Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Tsunoda, Y. Oh, Y. Fujiwara
2. 発表標題 Probabilistic upper bound on the domination number
3. 学会等名 50th Southeastern International Conference on Combinatorics, Graph Theory, and Computing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Fujiwara
2. 発表標題 Bounds and constructions for X-codes
3. 学会等名 Conference on Combinatorics and its Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Tsunoda, Y. Fujiwara
2. 発表標題 Bounds and polynomial-time construction algorithm for X-codes of constant weight three
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Information Theory (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Tsunoda, Y. Fujiwara
2. 発表標題 On a relationship between X-codes and separating parity-check matrices
3. 学会等名 The Japanese Conference on Combinatorics and its Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤原祐一郎
2. 発表標題 Error-erasure separation and X-codes
3. 学会等名 組合せ論の符号理論
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 呉有敏, 藤原祐一郎
2. 発表標題 A nontrivial inequality relating domination and independence in a graph
3. 学会等名 実験計画法ならびに情報数理と関連する組合せ構造 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 角田有, 藤原祐一郎
2. 発表標題 Bounds on the redundancy for global quantum error correction
3. 学会等名 実験計画法ならびに情報数理と関連する組合せ構造 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yu Tsunoda, Yuichiro Fujiwara
2. 発表標題 Bounds and polynomial-time construction algorithm for X-codes of constant weight three
3. 学会等名 2018 IEEE International Symposium on Information Theory (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yu Tsunoda, Yuichiro Fujiwara
2. 発表標題 Explicit bounds on the length of optimal X-codes
3. 学会等名 2017 IEEE International Symposium on Information Theory (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuichiro Fujiwara
2. 発表標題 Correcting both qubit loss and decoherence by stabilizer codes
3. 学会等名 5th Taiwan-Japan Conference on Combinatorics and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----