

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04368

研究課題名（和文）非同期通信の理論限界の解明に向けた基礎理論の構築

研究課題名（英文）Constructing Fundamental Theories to Clarify Theoretical Limits of Asynchronous Communication

研究代表者

松田 哲直（Matsuta, Tetsunao）

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：00638984

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：様々なIoTデバイスの登場により、複数の送信者が非同期的に通信を行う機会が増加している。本研究では、非同期通信における通信速度やデータ圧縮率の理論限界を、いくつかの通信システムに対して解明することを目的とし、以下の主要成果を得た。(1) Helperシステムと呼ばれる通信システムに対して、非同期通信と同期通信におけるデータ圧縮率の理論限界が必ずしも一致しないことを明らかにした。(2) WZシステムと呼ばれる通信システムに対して、同期通信について改めて詳細に解析した結果、データ圧縮率の理論限界がグラフの彩色数で特徴づけられることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果によって、非同期通信におけるデータ圧縮率の理論限界を明らかにすることが、通信システムの設計を行う上で非常に重要であることが明らかとなった。さらに、通信システムの設計を行う際には、グラフの彩色数が応用できる可能性があることも明らかとなった。以上から、非同期通信だけでなく同期通信に対しても重要性の高い基礎理論を築くことができたといえる。

研究成果の概要（英文）：Due to the appearance of various IoT devices, opportunities are increasing for multiple senders to communicate asynchronously. The purpose of this study is to clarify the theoretical limits of transmission rate and data compression rate in asynchronous communication for several communication systems, and the following major results are obtained. (1) For a communication system called the Helper system, we clarify that the theoretical limit of the data compression rate for asynchronous communication does not always coincide with that for synchronous communication. (2) For a communication system called the WZ system, we analyze the theoretical limit of the data compression rate for synchronous communication in detail, and clarify that the theoretical limit is characterized by the chromatic number of a graph.

研究分野：情報理論

キーワード：非同期通信 マルチユーザ情報理論 情報源符号化 通信路符号化 達成可能領域

1. 研究開始当初の背景

無線通信や携帯端末の普及によって、複数の送受信者(あるいは送受信端末)が同時に通信を行う機会が増加している。特に最近では、様々な IoT デバイスの登場により、この機会はますます増加しているといえる。

通信を行う際には通常、送信者が持つ元データを通信に適した別形式の送信データに符号器を用いて変換して送信し、受信者は復号器を用いて受信データから元データを復元する。例えば、誤り訂正符号やデータ圧縮はこの一例と言える。このとき、送信者での変換は符号化と呼ばれ、受信者での復元は復号と呼ばれる。以下では、符号器と復号器をまとめて符号化システムと呼ぶことにする。したがって、通信の性能は符号化システムの性能に左右されるといえる。

複数の送受信者を伴う通信に対する符号化システムの性能を、理論的に解析する学問分野の一つとしてマルチユーザ情報理論がある。マルチユーザ情報理論では、様々な符号化システムに対する通信速度やデータ圧縮率の理論限界を解析している。これらの理論限界は、符号化システム設計の重要な指標であり、また、理論限界の解析過程には符号化システム設計の指針となる多くの知見が含まれている。そのため、理論限界の解析は工学的に非常に重要といえる。

マルチユーザ情報理論における理論限界の解析では普通、各送信者が符号化を開始する時刻を全送受信者が知っており、この時刻をもとに全送信者は同期して通信できる理想的な状況を仮定する。しかしながら一般には、各送信者は遠隔地に存在することが想定されるため、全送信者が完全に同期して動作することは困難である。したがって、符号化システムの実際の運用を考えるうえで、同期していることを仮定しない非同期通信に対する符号化システムを考えることが重要となる。

2. 研究の目的

非同期通信を行う様々な通信モデルを考えることができるが、本研究では特に、マルチユーザ情報理論においてよく扱われる、図1と図2に示した代表的な通信モデルとそれに対する符号化システムを扱う。これらはセンサネットワークやモバイルネットワークのモデルとみなすことができ、現実的な通信を端的に表した基本的かつ重要なモデルである。図1は補助者を伴う符号化システム(Helperシステム)と Wyner-Ziv 符号化システム(WZシステム)、図2は多重アクセス通信路符号化システム(MACシステム)と呼ばれる符号化システムをそれぞれ表している。ここで、図1と図2のデータはビット列のようなシンボル列

長さ n_i の元データ 長さ k_i の送信データ

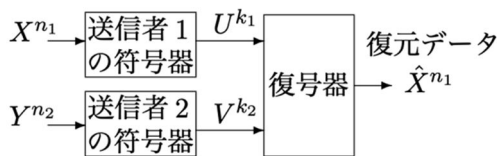


図1: HelperシステムとWZシステム ($i = 1, 2$)

長さ n_i の元データ 長さ k_i の送信データ

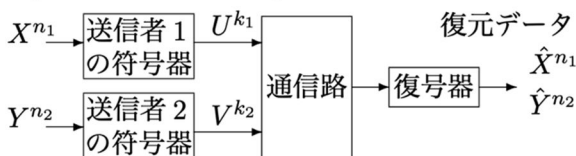


図2: MACシステム ($i = 1, 2$)

で表現されているとする。図1のHelperシステムとWZシステムは、元データを雑音のない高信頼な通信路を通じて受信者に送信する際に用いられる符号化システムである。したがって、送信データが誤ることなく受信者に届くことに注意する。ただし、受信者の復号器において、送信データ U^{k_1} と V^{k_2} から送信者1の元データ X^{n_1} のみ復元することに注意する。また、WZシステムでは、送信者2の元データ Y^{n_2} がそのまま受信者に送信され、基準値以下の歪みを許容して送信者1の元データ X^{n_1} を復元する。一方、図2のMACシステムは、すべての元データを雑音のある通信路を通じて受信者に送信する際に用いられる符号化システムである。したがって、送信データに誤りが生じて受信者に届く可能性があることに注意する。

本研究では非同期通信を仮定するため、上記の符号化システムにおいて、各送信者が符号化を開始する時刻は未知であるとする。送信者ごとに異なる時刻に元データを得て送信することに注意すれば、このことは各送信者が有する元データあるいは送信データの間にある相関関係に未知の時刻差による「ずれ」が生じてしまうことを意味する。これが非同期通信を困難にする大きな理由である。また通常、元データが従う真の確率分布や通信路の入力に対する出力が従う真の条件付き確率分布を完全に知ることは困難であるので、これらの真の確率分布がある集合に含まれることのみがわかっているとす。これはつまり、平均雑音電力の大きさの範囲のような、統計的性質が満たすべき範囲のみがわかっているとす。

図1の雑音のない通信路を用いる符号化システムでは、元データの冗長性を取り除いて短時間で通信することが求められる。これを評価する指標が各符号器のデータ圧縮率であり、ここでは送信データ長 k_i を元データ長 n_i で割った値 k_i/n_i のことである。一方、図2の雑音のある通信路

を用いる符号化システムでは、雑音に対処できるようにデータに冗長性を持たせることを前提として、できる限り多くのデータを単位時間あたりに送信することが求められる。これを評価する指標が各符号器の通信速度であり、ここでは元データ長 n_i を送信データ長 k_i で割った値 n_i/k_i のことである。したがって、データ圧縮率は小さいほうが、通信速度は大きいほうが符号化システムの性能がよいといえる。また、データ圧縮率と通信速度は、どちらも符号化率と呼ばれている。

データ長を制限しない場合、復元に失敗する誤り確率（WZ システムの場合は歪みが基準値を超える確率）を任意に小さくすることができる符号化システムの符号化率の組（例えば Helper システムの場合は $(k_1/n_1, k_2/n_2)$ のこと）が取り得る領域は達成可能領域と呼ばれている。この達成可能領域が解明できれば同時に、それぞれの符号器の符号化率をどこまで小さく、あるいは大きくできるのかという理論限界が解明できる。また、解明する際に得られる定理や証明方法は、その他の様々な非同期通信の理論限界を解明する際の基礎となり得る。このような理由から、符号化システムの理論限界を解明するためだけでなく、様々な非同期通信の理論限界の解明に向けた基礎理論を構築するために、Helper システムと、WZ システム、MAC システムの達成可能領域を明らかにすることを本研究における目的とする。

3. 研究の方法

元データや通信路が従う確率分布のクラスは多種多様に考えることができる。しかしながら、クラスを一般化し過ぎると基礎理論をまったく構築できない可能性があるため、本研究では特に断らない限り、最も基本となる定常無記憶クラスを扱うことにする。すなわち、元データのシンボルが単位時間ごとに統計的に独立に生起するとし、通信路から出力されるデータのシンボルは現在入力されたシンボルのみに依存し、過去に入出力されたシンボルとは統計的に独立とする。

この仮定のもとで、研究目的で述べた 3 つのシステムの達成可能領域について、それぞれ以下の方法で明らかにすることを旨とする。

(1) Helper システム

このシステムの達成可能領域を明らかにするために、2017 年に研究代表者らが考案した新たな証明方法を応用することを検討する。これは、Helper システムに類似した Slepian-Wolf 符号化システム (SW システム) の達成可能領域を解明するために考案した証明方法である。この証明方法は SW システムに特化した方法ではないため、Helper システムにも応用できる可能性は高いと考えられる。

(2) WZ システム

このシステムの達成可能領域を明らかにするために、Helper システムと同様の方法で研究を遂行する。上述したように、研究代表者らが考案した証明方法は特定の符号化システムに特化していないため、WZ システムに対しても応用できる可能性は高いと考えられる。

(3) MAC システム

このシステムの達成可能領域を明らかにするために、Helper システムおよび WZ システムと同様の方法で研究を遂行する。ただし、これまでの場合と違い、MAC システムでは通信路の真の確率分布も未知であることに注意する。したがって、研究代表者らが考案した証明方法を拡張し、元データが従う真の確率分布が含まれる集合と共に、通信路が従う真の確率分布が含まれる集合を考え、これらの確率分布に対する符号化システムを作成する方法を検討する。

4. 研究成果

以下では、研究目的で述べた 3 つのシステムの達成可能領域に対する研究成果について述べる。

(1) Helper システム

研究代表者らが考案した新たな証明方法を応用することで、非同期通信における達成可能領域を明らかにした。ただし、元データが従う真の確率分布は既知であるとしている。この成果によって、Helper システムにおける非同期通信の達成可能領域と同期通信の達成可能領域とが必ずしも一致しないことが初めて明らかとなった。この成果は、符号化システムの設計を行う上で、非同期通信の達成可能領域を明らかにすることが非常に重要であることを示しているといえる。一方で、元データが従う真の確率分布が未知の場合には、上述した新たな証明方法を応用することが困難であることも明らかとなった。

(2) WZ システム

当初予定していた研究代表者らが考案した証明方法を応用することが困難であり、新たな方法を検討することとなった。その際に、同期通信におけるデータ圧縮率の理論限界を改めて詳細に研究し、その理論限界がデータの取り得る値の集合によって表されるグラフの彩色数によって特徴づけられることを明らかにした。このような特徴づけは、研究代表者が知る限りこれまで存在せず、まったく新しい成果となった。この成果は、グラフの彩色数に対する様々な成果が、データ圧縮率の理論限界の解析や符号化システムの設計に応用できる

ことを示している。

(3) MAC システム

研究代表者らが考案した証明方法を応用することが困難であったことから、MAC システムについては検討途中であり、まとまった成果がまだ得られていない。

今後の展望として、元データや通信路が従う確率分布が未知である場合の達成可能領域を明らかにすることが挙げられる。これを達成する方法として、研究代表者らが考案した証明方法をさらに拡張できないかを検討することや、上述したグラフの彩色数を利用することなどが考えられる。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Tetsunao Matsuta, Tomohiko Uyematsu	4. 巻 E105.A
2. 論文標題 An Equivalent Expression for the Wyner-Ziv Source Coding Problem	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 353 ~ 362
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2021TAP0005	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 Tetsunao Matsuta, Tomohiko Uyematsu	4. 巻 E102.A
2. 論文標題 Achievable Rate Regions for Source Coding with Delayed Partial Side Information	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 1631 ~ 1641
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.E102.A.1631	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 Tetsunao Matsuta, Tomohiko Uyematsu	4. 巻 66
2. 論文標題 Coding Theorems for Asynchronous Slepian-Wolf Coding Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Information Theory	6. 最初と最後の頁 4774 ~ 4795
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIT.2020.2974736	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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Tetsunao Matsuta, Tomohiko Uyematsu
2. 発表標題 An Equivalent Expression for the Wyner-Ziv Source Coding Problem
3. 学会等名 The 2020 International Symposium on Information Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2020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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------