

Fundamentals Review

2025 October Vol.19 No.

2

レビュー論文

個別系列の無歪み符号化

https://www.ieice.org/ess/ess_r/jpn/publications/Fundam-Review/

2 Fundamentals

ごあいさつ

45

AI は敵か味方か

定兼邦彦

レビュー論文

46

個別系列の無歪み符号化

植松友彦

解説論文

55

力学系の数値分岐解析とその応用

北島博之

60

Sub-GHz 帯 LPWAN における電力検出キャリアセンスとその特性

成枝秀介

70

画像伝送におけるセマンティック通信

須藤克弥

78

生体認証技術の研究開発における総合知

長坂晃朗

87

Software-Defined Vehicle (SDV) におけるセキュリティ課題とその展開

倉地 亮

97

擬等角写像の数値的構成法と機械学習への応用

島内宏和

105

物質科学と情報科学の融合による高分子ニューラルネットワーク

赤井 恵

その他

114

ESS ニュース

114

NOLTA, IEICE 特集号

中村 遼

115

2025 年電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会開催報告

伊藤大輔

研究会に行こう！

119

応用音響研究会 (EA)

西浦敬信

119

イメージ・メディア・クオリティ研究会 (IMQ)

土田 勝

120

スマートインフォメディアシステム研究会 (SIS)

笹岡直人

120

超音波研究会 (US)

青柳 学

121

VLSI 設計技術研究会 (VLD)

富山宏之

122

国際会議報告

122

2025 IEEE International Symposium on Information Theory

橋本健吾

124

The 40th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications

篠宮紀彦

126

開催案内

126

NOLTA2025 開催案内

山仲芳和

127

論文募集

127

SCIS2026

Review

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 機械振興会館内
電話 (03) 3433-6691 (代) FAX (03) 3433-6659
E-mail:office@ieice.org 振替口座: 00120-0-35300

IEICE 電子情報通信学会
基礎・境界ソサイエティ / NOLTA ソサイエティ

Preface

45

Is AI a Friend or Foe?

Kunihiko SADAKANE

Advance Review Papers

46

Lossless Coding for Individual Sequences

Tomohiko UYEMATSU

Review Papers

55

Numerical Bifurcation Analysis and Its Application

Hiroyuki KITAJIMA

60

Energy Detection Based Carrier Sense in Sub-GHz Band LPWANs and Its Characteristics

Shusuke NARIEDA

70

Semantic Communication for Image Transmission

Katsuya Suto

78

Convergence Knowledge in Research and Development of Biometrics Technologies

Akio NAGASAKA

87

Security Issues and Evolution in Software-Defined Vehicle (SDV)

Ryo KURACHI

97

Numerical Quasiconformal Mappings and Application of Quasiconformal Mappings to Machine Learning

Hirokazu SHIMAUCHI

105

Polymer Neural Networks Based on the Fusion of Materials and Information Science

Megumi AKAI-KASAYA

Miscellaneous Articles

114

ESS News

119

Let's go to IEICE Workshops!

122

International Conference Report

126

Call for Participations

127

Call for Papers



AI は敵か味方か

Is AI a Friend or Foe?

基礎・境界ソサイエティ誌編集委員長 定兼 邦彦

2025年度より基礎・境界ソサイエティ誌（以下FR誌）の編集委員長を務めております。定兼です。基礎・境界ソサイエティの仕事は2012年度のFR誌編集幹事補佐から2017年度の事業担当幹事まで務めました。それ以来となります。この間の一番の変化は会議がオンラインになったことでしょうか（当時はオンラインでの参加も可能でしたが、対面がメインでした）。移動の時間とコストがゼロになるというメリットは大きく、情報通信技術の発展のおかげではありますが、ほかの方の顔を覚えるにくくなった気がします。

情報通信技術のもう一つの発展といえば、やはり生成AIでしょう。2022年末に登場して大きな話題となり、その後も進化しています。登場した時に著者も使用してみましたが、存在しない文献を「生成」しているのを見て、これを使うのは危険だと思いました。しかし最近ではVisual Studio CodeでGitHub Copilotを用いると、自分が書こうと思っているプログラムの一部を勝手に書いてくれるようになり、かなり省力化が図れそうです。現在我が国では大学入試共通テストで情報科目がほぼ必修になるなど、情報教育に力を入れています。情報教育とは何なのかと考えだすとよく分からなくなってきました。大学の学部で習うプログラミングは、生成AIが完璧にやってくれるでしょうし、レポートも大部分を書いてくれそうです。情報科目の単位を修得するとは、何を意味するのでしょうか。

さて、本稿はFR誌の編集委員長就任のあいさつ記事なので、本題に戻って、FR誌の役目について考えます。FR誌のメインは解説論文、レビュー論文、技術の原点、特別寄稿などの「かたい記事」です。解説論文は最近の研究について、分野外の方にも分かりやすく解説頂くものです。一方、技術の原点は現在用いられている技術が開発された当時の話や歴史などを語って頂いています。これらの記事は生成AI時代にはどうなるのでしょうか。

ある技術に関連する論文を収集し、それらを要約する簡単なサーベイ論文の執筆は、AIの得意分野でしょうし、英語文献の日本語への翻訳もやってくれるでしょう。では、現在のAIにできなさそうなことは何でしょうか。「技術の原点」のような、論文には書かれていない内容は無理でしょうし、

サーベイ論文にしても、技術の根底にある基本原理の解説などは難しいでしょう。そのような記事を掲載できれば本誌の価値があると思います。

ただし、そのような内容が掲載されれば、AIはそれを学習し、使用するようになるでしょう。特に本誌はオープンアクセスですので、そうなることは自然です。これにより「知」が多くの方に共有されるのは良いことだと思いますが、一方で著作権の問題はありますし、記事の著者への敬意も払われないことになりそうです。著者のメリットは、僅かな原稿料、自分の業績リストへの掲載と、FR誌のベストオナー賞などの褒章制度でしょうか。結局は、「学界への貢献」が使命と思っている研究者の厚意で成り立っているのかもしれませんが、そう思うと、FR誌の役目も学界への貢献ということになるのかもしれませんが、このような考えが続いていくのかも不明です。

情報技術は急速に発展しているため、数年後には現在とは全く違う状況になっているかもしれません。著者の編集委員長の任期中だけではなく、その先のことも考えて編集作業を行いたいと思います。

著者紹介

定兼邦彦（正員）

2000 東京大学理学系研究科博士課程了。東北大学助手、九州大学助教授、国立情報学研究所准教授を経て、2014より東京大学大学院情報理工学系研究科教授。データ圧縮、秘匿計算などの研究に従事。2021年文部科学大臣表彰科学技術賞受賞。著書『簡潔データ構造』など。

個別系列の無歪み符号化

Lossless Coding for Individual Sequences

植松友彦 Tomohiko UYEMATSU

アブストラクト 与えられた半無限系列について効率的な符号化法とその性能限界を求める問題が個別系列の符号化問題である。小文では、まず個別系列を一定長のブロックに分割し、各ブロックを固定長の符号語に符号化する固定長符号化について解説し、符号化による誤りを許さない場合、1記号あたりの符号長で定まる最小許容符号化レートがトポロジカルエントロピーなどの情報量と一致することを説明し、具体的な符号化法を示している。一方、ブロック長を長くしたとき誤り率が零に漸近する符号化については、最小符号化レートが個別系列のZivエントロピーなどの情報量によって特徴付けられることを説明するとともに、効率的な符号化法を示している。次に、各ブロックを可変長の符号語に符号化する可変長符号化についても解説し、1記号あたりの最小符号長を表す可変長最小符号化レートが個別系列の重なりを許した経験分布のエントロピーに一致することを説明し、LZ78符号によって可変長最小符号化レートが達成できることを示す。更に、可変長最小符号化レートと一致するほかの情報量についても述べるとともに、これらの情報量を利用することで、可算無限アルファベット上の個別系列の集合が可変長ユニバーサル符号化できる条件を示す。最後に、Zivが2008年に提案した有限ブロック長における最良符号の条件を紹介し、この条件の下でLZ77符号や文脈木を用いたユニバーサル符号化が最良であることを述べる。

キーワード 固定長符号、個別系列、情報量、情報源符号化、可変長符号

Abstract This paper deals with the coding problem of individual sequences, focusing on both fixed and variable-length coding methods. In the fixed-length coding method, we show that if coding errors are not allowed, the minimum coding rate coincides with some information measures, such as topological entropy, and we also explain a concrete coding method. If the error rate vanishes as the block length tends to infinity, we show that the minimum coding rate is characterized by information measures, such as Ziv entropy, and we also explain an efficient coding method. We then show that the variable-length minimum coding rate coincides with the entropy of the empirical distribution of individual sequences, and that this rate can be achieved by using the LZ78 code. Further, we discuss a sufficient condition on the universal coding for a set of individual sequences on a countably infinite alphabet. Finally, we introduce the concept of essential optimality for the encoding of finite length sequences and show that the LZ77 code and the universal context tree coding are essentially optimal.

Key words Fixed-length code, Individual sequence, Information measure, Source coding, Variable-length code

1. はじめに

与えられた半無限系列について効率的な符号化法とその性能限界を求める問題が個別系列の符号化問題である。個別系列の符号化問題はユニバーサル符号化問題と密接に関連し、1970年代にZivら^{(1)~(3)}によって研究され、現在でも広く利用されている2種類のユニバーサル符号化法であるLZ77符号⁽²⁾とLZ78符号⁽³⁾の開発に結びついた。

小文では、まず個別系列を一定長のブロックに分割し、各ブ

ロックを固定長の符号語に符号化する固定長符号化について解説する。系列のブロックを符号語に符号化し、符号語を復号することによって必ず元の系列が復元できる場合、すなわち誤りを許さない場合、1記号あたりの符号長で定まる最小許容符号化レートがトポロジカルエントロピー⁽¹⁾や重なりのない最大エントロピー⁽⁴⁾に一致することを述べ、重なりのない最大エントロピーを利用することで具体的な符号化⁽⁵⁾が行えることを示す。一方、ブロック長を長くしたとき誤り率が零に漸近する固定長符号化については、最小許容符号化レートがZivエントロピー⁽¹⁾、定常包に属する確率測度のエントロピーレートの本質的上界⁽⁶⁾、並びに2種のスムーズ最大エントロピーによって特徴付けられることを示す⁽⁵⁾。更に、スムーズ最大エントロピーを利用することで、Zivの提案した符号⁽¹⁾よりも大幅に符号化計算量の小さい符号が構成できることを述べる⁽⁵⁾。

次に、個別系列を一定長のブロックに分割し、各ブロックを可変長の符号語に符号化する可変長符号化について解説し、1

植松友彦 正員：フェロー 放送大学東京渋谷学習センター
Tomohiko UYEMATSU, Fellow (Tokyo Shibuya Study Center, The Open University of Japan, 1-10-7 Dogenzaka, Shibuya-ku, Tokyo 150-0043 Japan).

電子情報通信学会 基礎・境界サイエンス
Fundamentals Review Vol.19 No.2 pp.46-54 2025年10月
©電子情報通信学会 2025

記号あたりの最小符号長を表す可変長最小符号化レートが重なりを許した経験分布のエントロピーに一致することを述べる⁽³⁾。また、可変長最小符号化レートの下限が個別系列の複雑度で与えられ、LZ78 符号によって可変長最小符号化レートが達成できることを示す⁽³⁾。更に、可変長最小符号化レートが重なりのない経験分布のエントロピー⁽⁷⁾や自己エントロピーレート⁽⁷⁾に一致することを示すとともに、これらの情報量を利用することで、可算無限アルファベット上の個別系列の集合が可変長ユニバーサル符号化できる条件を述べる⁽⁷⁾。最後に、Ziv⁽⁸⁾が 2008 年に提案した有限ブロック長における最良符号の条件を紹介し、この条件の下で LZ77 符号や文脈木を用いたユニバーサル符号化が最良であることを述べる⁽⁸⁾、⁽⁹⁾。

2. 個別系列の固定長符号化

有限アルファベット \mathcal{X} 上の半無限系列の集合を \mathcal{X}^∞ によって表し、 \mathcal{X}^∞ の要素を個別系列あるいは単に系列と呼ぶ。また、個別系列を $x = x_1x_2\dots$ によって表し、その部分列を $x_m^n = x_mx_{m+1}\dots x_n$ によって表す。特に、 $m = 1$ のときはインデックス m を省略して x^n と書く。以下、小文では対数と指数の底を 2 とする。

2.1 固定長符号化の定式化

ブロック長 $n = 1, 2, \dots$ に対して、整数の集合 $\mathcal{M}_n = \{1, 2, \dots, M_n\}$ を定める。個別系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ を長さ n のブロック x_1^n, x_{n+1}^n, \dots に区切り、各ブロック $x_{(i-1)n+1}^n$ ($i = 1, 2, \dots$) を \mathcal{M}_n に属する整数に変換する操作を固定長符号化といい、この変換を表す写像 $\varphi_n : \mathcal{X}^n \rightarrow \mathcal{M}_n$ を符号器という。ここで、 $\varphi_n(x^n)$ を部分列 x^n に対応する符号語と呼ぶ。他方、符号語 $k (= \varphi_n(x^n))$ から元の出力系列 x^n を復元する操作を復号といい、この操作を表す写像 $\psi_n : \mathcal{M}_n \rightarrow \mathcal{X}^n$ を復号器と呼ぶ。また符号器と復号器の対 (φ_n, ψ_n) を符号と呼ぶ。

個別系列 x に対し、ブロック長 n の符号化と復号を続けて行ったとき、元の系列が復元できない割合

$$\epsilon_n(x) \triangleq \limsup_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m d_H^n(\psi_n(\varphi_n(x_{(i-1)n+1}^n))),$$

を誤り率と呼ぶ。ただし、 $d_H^n(x^n, y^n)$ は系列 x^n と y^n との間のハミング距離を表す。誤り率 $\epsilon_n(x)$ を小さくするためには、符号語の集合 \mathcal{M}_n のサイズ M_n を十分大きくしなければならない。そこで、符号器の符号化レートを

$$R_n \triangleq \frac{1}{n} \log M_n$$

によって定義し、誤り率 $\epsilon_n(x)$ が零あるいは零に漸近する符号が存在するためには、最小限どの程度の符号化レート R_n が必要かという問題が情報源符号化問題である^{(10)~(12)}。

以下では、系列 x に対しブロック長が n 、符号語の集合 \mathcal{M}_n のサイズが M_n 、誤り率 $\epsilon_n(x)$ が ϵ_n 以下であるような符号 (φ_n, ψ_n)

を (n, M_n, ϵ_n) 符号と呼ぶ。このとき、誤り率の制約に応じて、個別系列の固定長符号化問題は次のように定式化される。

定義 1 (誤りのない最小許容符号化レート⁽¹⁾) 系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ に対し、レート R が誤りなく達成可能であるとは、ある整数 n_0 が存在して、

$$\epsilon_n(x) = 0 \quad (\forall n \geq n_0) \quad \text{かつ} \quad \limsup_{n \rightarrow \infty} R_n \leq R$$

を満足する (n, M_n, ϵ_n) 符号の列が存在することである。更に、達成可能なレートの下限として、誤りのない最小許容符号化レートを

$$R_{f0}(x) \triangleq \inf\{R : R \text{ が誤りなく達成可能}\}$$

によって定義する。

他方、ブロック長 n を長くしたとき、誤り率を零ではなく、漸近的に零に収束するという緩和された制約下での固定長符号化は次のように定式化される。

定義 2 (最小許容符号化レート⁽¹⁾) 系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ に対し、レート R が達成可能であるとは、

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \epsilon_n(x) = 0 \quad \text{かつ} \quad \limsup_{n \rightarrow \infty} R_n \leq R$$

を満足する (n, M_n, ϵ_n) 符号の列が存在することである。更に、達成可能なレートの下限として、最小許容符号化レートを

$$R_f(x) \triangleq \inf\{R : R \text{ が達成可能}\}$$

によって定義する。

2.2 誤りのない最小許容符号化レート

本節では、誤りのない最小許容符号化レートを個別系列の情報量によって特徴づける。まず個別系列のトポロジカルエントロピーを導入する。なお、トポロジカルエントロピーは、2000 年代以降、最大エントロピーと呼ばれることも多い。

定義 3 (トポロジカルエントロピー) 系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ と任意の整数 $\ell > 0$ に対し、 $h_\ell(x^n)$ を

$$h_\ell(x^n) \triangleq \frac{1}{\ell} \log |\{a^\ell \in \mathcal{X}^\ell : a^\ell = x_{i+1}^{i+\ell} \text{ for some } i = 0, 1, \dots, n - \ell\}|, \quad \forall n > \ell$$

によって定義する。ただし、 $|\cdot|$ は集合の要素数を表す。このとき、 x のトポロジカルエントロピーは、

$$h(x) \triangleq \lim_{\ell \rightarrow \infty} \lim_{n \rightarrow \infty} h_\ell(x^n)$$

によって定義される。なお、この極限は必ず存在する⁽¹⁾。

例 1: 系列 $x^{12} = 010110101010$ に対し、 $\ell = 3$ とすれば、系列 x^{12} に出現する長さ 3 の部分列は順に、010, 101, 011, 110, 101, 010, 101, 010, 101, 010 であり、この中で相異なる部分列は、010, 101, 011, 110 の四つである。したがって、

$$h_3(x^{12}) = \frac{1}{3} \log 4 = \frac{2}{3}$$

となる。

次の定理は、誤りのない最小許容符号化レートがトポロジカルエントロピーに一致することを示している。

定理 1 (Ziv⁽¹⁾) 系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ の誤りのない最小許容符号化レート $R_{f_0}(x)$ は

$$R_{f_0}(x) \geq h(x)$$

を満足する。また逆に、ブロック長 n 、符号化レート R_n の固定長符号 (φ_n, ψ_n) と実関数 $\gamma_n(x)$ が存在して、

$$h(x) \leq R_n - \gamma_n(x) \quad (1)$$

を満足する系列 x について、

$$x_{(i-1)n+1}^{in} = \psi_n(\varphi_n(x_{(i-1)n+1}^{in})) \quad i = 1, 2, \dots$$

が成り立つ。ただし、

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \gamma_n(x) = 0$$

である。

一方、1985年に Yamamoto はトポロジカルエントロピーと類似の情報量として重なりのない最大エントロピーを定義した。

定義 4 (重なりのない最大エントロピー (Yamamoto⁽⁴⁾)) 系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ と任意の整数 $\ell > 0$ について、 $\hat{h}_\ell(x^n)$ を

$$\hat{h}_\ell(x^n) = \frac{1}{\ell} \log |\{a^\ell \in \mathcal{X}^\ell : x_{\ell i+1}^{\ell i+\ell} = a^\ell \text{ for some } i = 0, 1, \dots, m-1\}|, \quad \forall n > \ell$$

によって定義する。ただし、 $m = \lfloor n/\ell \rfloor$ である^(注1)。このとき、 x の重なりのない最大エントロピーは、

$$\hat{h}(x) \triangleq \lim_{\ell \rightarrow \infty} \lim_{n \rightarrow \infty} \hat{h}_\ell(x^n)$$

によって定義される。なお、この極限は常に存在する。

例 2: 例 1 で取り上げた系列 $x^{12} = 010110101010$ に対し、再び $\ell = 3$ とし、 x^{12} を長さ 3 のブロックに分割すると、010, 110, 101, 010 が得られる。これら長さ 3 の部分列で相異なるものは 010, 110, 101 の三つであるから、

$$\hat{h}_3(x^{12}) = \frac{1}{3} \log 3$$

となる。

次の定理は、重なりのない最大エントロピーがトポロジカルエントロピーに一致することを示している。

定理 2 (Yamamoto⁽⁴⁾) 任意の系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ に対して、

$$\hat{h}(x) = h(x)$$

が成り立つ。

定理 2 によって、具体的な固定長符号化法を考える際、 $h(x)$ を利用する代わりに、取り扱いが容易な重なりのない最大エントロピー $\hat{h}(x)$ を利用することができる。次節では、 $\hat{h}(x)$ を利用した、著者らが提案した固定長符号化法について述べる。

(注1) : 記号 $\lfloor t \rfloor$ は t 以下の最大整数を表す。

2.3 誤りのない固定長符号化法

本節では、重なりのない最大エントロピー $\hat{h}_\ell(x^n)$ を利用した誤りのない固定長符号化法⁽⁵⁾を示す。なお、この符号化法は、Ziv が示した固定長符号化法⁽¹³⁾を洗練したものである。

ブロック長 n に対し、 $\ell|\mathcal{X}^\ell| \leq n$ を満たす最大の整数を ℓ とする。このとき、ブロック $x^n \in \mathcal{X}^n$ に対して、 \mathcal{X}^ℓ の部分集合 $S_\ell(x^n)$ を

$$S_\ell(x^n) \triangleq \{a^\ell \in \mathcal{X}^\ell : x_{\ell i+1}^{\ell i+\ell} = a^\ell \text{ for some } i = 0, 1, \dots, m-1\}$$

によって定める。ただし、 $m = \lfloor n/\ell \rfloor$ である。明らかに、

$$|S_\ell(x^n)| = \exp(\ell \hat{h}_\ell(x^n))$$

が成り立つ。

ブロック x^n に対する符号語の最初の部分は、 $S_\ell(x^n)$ に属する系列のリストからなる。長さ ℓ の系列に辞書の順序を導入すれば、 $S_\ell(x^n)$ に属する系列は $|\mathcal{X}^\ell|$ ビットで指定できる。具体的には、もし \mathcal{X}^ℓ の i 番めの系列が $S_\ell(x^n)$ に属していれば、符号語の先頭から i 番めのビットを 1 とし、そうでなければ 0 にすればよい。次に、ブロック x^n を長さ ℓ の部分列に区切る。

$$x^n = x_1^\ell, x_{\ell+1}^{2\ell}, \dots, x_{(m-1)\ell+1}^{m\ell}, x_{m\ell+1}^n$$

ここで最後の部分列 $x_{m\ell+1}^n$ の長さは ℓ 未満であることに注意する。 x^n の符号語の 2 番めの部分はインデックス列からなる。長さ ℓ の各部分列 $x_1^\ell, x_{\ell+1}^{2\ell}, \dots, x_{(m-1)\ell+1}^{m\ell}$ は、その部分列が部分集合 $S_\ell(x)$ の辞書の順序で何番めであるかを示すインデックスに符号化される。このとき、各インデックスは $\lceil \ell \hat{h}_\ell(x^n) \rceil$ ビットで符号化できるので^(注2)、インデックス列の全長は $m \lceil \ell \hat{h}_\ell(x^n) \rceil$ ビットである。符号語の最後には、部分列 $x_{m\ell+1}^n$ の $\lceil \log |\mathcal{X}^{n-m\ell}| \rceil$ ビットの 2 進表現を接続する。したがって、系列 x^n の符号語の符号長 $L(x^n)$ は

$$L(x^n) = |\mathcal{X}^\ell| + m \lceil \ell \hat{h}_\ell(x^n) \rceil + \lceil \log |\mathcal{X}^{n-m\ell}| \rceil < |\mathcal{X}^\ell| + n \left(\hat{h}_\ell(x^n) + \frac{1}{\ell} \right) + \ell \log |\mathcal{X}|$$

を満足する。

例 3: 2 元系列 $x^{12} = 000001010000$ の符号化を考えよう。 $\ell = 2$ とすれば、 x^{12} は次のように分割される。

$$x^{12} = 00 \ 00 \ 01 \ 01 \ 00 \ 00$$

この分割から、部分集合 $S_2(x^{12}) = \{00, 01\}$ が得られる。辞書の順序が $00 < 01 < 10 < 11$ であるとすれば、符号語の最初の部分は 1100 となる。そこで、インデックス 0 を部分列 00 に、インデックス 1 を部分列 01 に割り当てると、符号語の 2 番めの部分はインデックス列 001100 となる。したがって、 x^{12} に対応する符号語は

(注2) : $\lceil t \rceil$ は t 以上の最小整数を表す。

となる。

なお、このままでは、提案した符号の符号長は $h_\ell(x^n)$ に依存し可変長符号になる。そこで、固定長符号にするために、与えられた符号化レート R について、符号語長 $L(x^n)$ が nR ビット以下ならば、 $(nR - L(x^n))$ 個の 0 を符号語の終わりに付け加え、 $L(x^n)$ が nR を超えるならば、符号語の nR ビットを超える部分を切り捨てる。したがって、 $L(x^n) > nR$ ならば、 x^n の後半部分は復号できない。

次の定理は、提案した固定長符号が誤りなく復号できるための必要条件を明らかにしている。

定理 3 (Uyemtsu-Matsuta⁽⁵⁾) 符号化レート $R > 0$ が与えられたとき、提案した固定長符号は、次の条件を満足する系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ に対して、ブロック長 n の誤りのない固定長符号になる。

$$h(x) \leq R - r_n(x) \quad (2)$$

ただし、 $r_n(x)$ は冗長度であり、

$$r_n(x) \leq h_\ell(x) - h(x) + \frac{2}{\ell} + \frac{1}{|\mathcal{X}|^\ell} \log |\mathcal{X}|$$

を満足する。

整数 ℓ の選び方から、 $n \rightarrow \infty$ のとき $\ell \rightarrow \infty$ に注意すれば、 $r_n(x) \rightarrow 0$ ($n \rightarrow \infty$) が成り立つ。したがって、提案した符号は漸近的に最良であることが分かる。

注意 1: 式 (2) の冗長度 $r_n(x)$ は定理 1 の式 (1) における $\gamma_n(x)$ の具体例であることに注意する。このように、具体的な符号化を定めることによって、関数 $\gamma_n(x)$ が定まることになる。

2.4 誤り率が漸的に零に収束する固定長符号化

本節では、誤り率が漸的に零に収束するという緩和された制約下での固定長符号化の限界を明らかにする。この場合、次の Ziv エントロピーが重要な役割を果たす。

定義 5 (Ziv エントロピー⁽¹⁾) 系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ の Ziv エントロピー $H_Z(x)$ は、

$$H_Z(x) \triangleq \lim_{\epsilon \downarrow 0} \inf_{\substack{y \in \mathcal{X}^\infty: \\ d(x,y) \leq \epsilon}} h(y)$$

によって定義される。ただし、 $d(x, y)$ は

$$d(x, y) \triangleq \limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} d_H^n(x^n, y^n)$$

によって定まる。

注意 2: たとえ系列 x が有限長 n であったとしても Ziv エントロピーの計算は困難である。なぜならば、任意に定めた $\epsilon > 0$ について

$$d_H^n(x^n, y^n) \leq \epsilon n$$

を満たす系列 y^n の系列の中からトポロジカルエントロピー $h_\ell(y^n)$ を最小にするものを探す必要があり、条件を満たす系列は $\binom{n}{\epsilon n} |\mathcal{X}|^{\epsilon n}$ 個あり、 n の指数関数で増加するからである。

Ziv エントロピーを利用して、Ziv は有限状態符号器と復号器を用いた際の固定長符号化の最小許容符号化レートを明らかにした。なお、紙面の都合により、有限状態符号器の定義などの詳細については文献 (1)、(3) を参照されたい。

定理 4 (Ziv⁽¹⁾) 有限状態符号器と復号器を用いた固定長符号において、系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ の最小許容符号化レート $R_f(x)$ は

$$R_f(x) \geq H_Z(x)$$

を満足する。また逆に、任意の $\delta \in (0, 1)$ に対して、ブロック長 n 、符号化レート R_n の固定長符号 (φ_n, ψ_n) が存在して、

$$H_Z(x) \leq R_n - \gamma_n(x, \delta) - \delta$$

を満足する系列 x について、

$$\hat{x}_{(i-1)n+1}^{in} = \psi_n(\varphi_n(\hat{x}_{(i-1)n+1}^{in})) \quad i = 1, 2, \dots$$

とすれば、復号系列 $\hat{x} = \hat{x}_1^n, \hat{x}_{n+1}^{2n}, \dots$ に対して、 $d(x, \hat{x}) \leq 2\delta$ が成り立つ。ただし、

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \gamma_n(x, \delta) = 0$$

である。

更に Ziv は、1976 年に Lempel とともに提案した系列の複雑度⁽¹⁴⁾ と Ziv エントロピーとの間の大小関係を明らかにしている。この成果に先立ち、まず Lempel と Ziv による系列の複雑度を導入する。

定義 6 (系列の複雑度⁽¹⁴⁾) 系列 x^n を次の 2 条件を満足する部分列に区切る。

- (1) x_1 を最初の部分列とする。
- (2) i 番目の部分列の最後を x_{n_i} ($1 \leq n_i \leq n-1$) とするとき、次の部分列 $x_{n_i+1}^{n_{i+1}}$ は、最後の記号 $x_{n_{i+1}}$ を除いた $x_{n_i+1}^{n_{i+1}-1}$ が x_{n_i+1} よりも先に始まる最長の部分列と一致するように定められる。すなわち、 $i+1$ 番目の部分列 $x_{n_i+1}^{n_{i+1}}$ は、ある $1 \leq p_i \leq n_i$ が存在して、

$$x_{n_i+1}^{n_{i+1}-1} = x_{p_i}^{n_{p_i+L_i-1}}$$

を満足する最大長 $L_i = n_{i+1} - n_i - 1$ ($\leq n$) の部分列として $x_{n_i+1}^{n_{i+1}-1}$ を定めた後、それに $x_{n_{i+1}}$ を接続することで得られる。

このような分割によって得られる部分列の個数から 1 を引いたものを x^n の複雑度と呼び、 $C(x^n)$ によって表す。更に、規格化された複雑度を

$$c(x) \triangleq \limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{\log n}{n} C(x^n)$$

によって定義する。

例 4: 系列 $x^{16} = 0001101001000101$ は、定義 6 に従うと次のような六つの部分列に分解される。

したがって、 $C(x^{16}) = 5$ である。

このとき、Ziv は次の関係を示した。

定理 5 (Ziv⁽¹⁾)

$$c(x) \leq H_Z(x) \leq h(x)$$

特に、 x がエントロピーレート H を有するエルゴード情報源からの出力列であるとき、

$$H = c(x) = H_Z(x) \leq h(x) \quad (3)$$

が確率 1 で成り立つ。

式 (3) は、系列 x がエルゴード情報源からの出力列のとき、最小許容符号化レート $R_f(x)$ が情報源のエントロピーレート H に等しいことを示しており、これは固定長符号化定理⁽¹²⁾と一致している。したがって、定理 4 の成果は従来の固定長符号化定理の個別系列への拡張とみることもできる。

Ziv の論文から 7 年後の 1985 年に Dueck と Wolters⁽⁶⁾ は、Ziv エントロピーを個別系列の定常包 (stationary hull) を利用して特徴づけるのに成功した。彼らの成果を次の定理に述べる。

定理 6 (Dueck-Wolters⁽⁶⁾) 個別系列 x が与えられたとき、ある単調増加数列 n_1, n_2, \dots と確率測度 μ が存在して、 \mathcal{X}^∞ 上の任意の実数値連続関数 f に対して

$$\lim_{j \rightarrow \infty} \frac{1}{n_j} \sum_{i=0}^{n_j-1} f(T^i(x)) = \int_{\mathcal{X}^\infty} f d\mu$$

が成り立つとき、このような確率測度 μ の集合を x の定常包 $\Lambda(x)$ と呼ぶ。ただし、 T は時間シフト操作を表す。ここで、 $\mu \in \Lambda(x)$ のエルゴード分解測度を Φ_μ によって表せば、

$$\mu(A) = \int_{\mathcal{X}^\infty} \nu(A) d\Phi_\mu(\nu), \quad \forall A \subset \mathcal{X}^\infty$$

と書ける。このとき、Ziv エントロピーについて

$$H_Z(x) = \sup_{\mu \in \Lambda(x)} (\Phi_\mu\text{-ess sup})H(\nu)$$

が成り立つ。ただし、 $H(\nu)$ は確率測度 ν のエントロピーレートを表す。

定理 6 は、もし系列 x が定常情報源からの出力列であったとすれば、最小許容符号化レートが情報スペクトル上限⁽¹²⁾に等しいことを意味しており、これは Han⁽¹²⁾の成果と一致している。したがって、定理 4 の成果は定常情報源に対する固定長符号化定理の個別系列への拡張とみることもできる。

更に、著者らは 2023 年に個別系列の固定長符号化の再定式化を試み、個別系列に新たな情報量を導入した。まず、Ziv エントロピーの代わりになる情報量を定義するために、スムーズ最大エントロピーを導入する。

定義 7 (スムーズ最大エントロピー⁽¹⁵⁾) 任意の $\epsilon \in (0, 1)$ と有限アルファベット \mathcal{Z} 上の任意の確率分布 P に対し、スムーズ最大エントロピーを

$$H^\epsilon(P) = \inf_{Q \in \mathcal{B}^\epsilon(P)} \log |\{z \in \mathcal{Z} : Q(z) > 0\}| \quad (4)$$

によって定義する。ただし、 $\mathcal{B}^\epsilon(P)$ は \mathcal{Z} 上の確率分布の中で $(1/2) \sum_{z \in \mathcal{Z}} |Q(z) - P(z)| \leq \epsilon$ を満足する確率分布 Q の集合である。

注意 3: スムーズ最大エントロピー $H^\epsilon(P)$ の具体的な計算は容易である。有限アルファベット \mathcal{Z} の要素 z を確率 $P(z)$ の大きい順にインデックスを付けて並べたものを $z_1, z_2, \dots, z_{|\mathcal{Z}|}$ とするとき、

$$H^\epsilon(P) = \min\{k : \sum_{i=1}^k P(z_i) \geq 1 - \epsilon, 1 \leq k \leq |\mathcal{Z}|\}$$

が成り立つ⁽¹⁶⁾。したがって、 \mathcal{Z} の要素のソートに必要なたかだか $O(|\mathcal{Z}| \log |\mathcal{Z}|)$ の計算量でスムーズ最大エントロピーは計算可能である。

スムーズ最大エントロピーを利用して、著者らは個別系列に関する 2 種の情報量を新たに導入した。

定義 8 (重なりを許したスムーズ最大エントロピー (Uyematsu-Matsuta⁽⁵⁾)) 系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ 、整数 $n > 0$ 、並びに任意の整数 $\ell \in (0, n)$ に対し、重なりを許した経験分布 $P_\ell(\cdot|x^n)$ を

$$P_\ell(a^\ell|x^n) \triangleq \frac{|\{i : 0 \leq i \leq n - \ell, x_{i+1}^{i+\ell} = a^\ell\}|}{n - \ell + 1}, \quad \forall a^\ell \in \mathcal{X}^\ell$$

によって定義する。このとき、任意の $\epsilon \in (0, 1)$ に対して、系列 x の重なりを許したスムーズ最大エントロピーは、

$$H^\epsilon(x) \triangleq \limsup_{\ell \rightarrow \infty} \limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\ell} H^\epsilon(P_\ell(\cdot|x^n))$$

によって定義される。

定義 9 (重なりのないスムーズ最大エントロピー (Uyematsu-Matsuta⁽⁵⁾)) 系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ 、整数 $n > 0$ 、並びに任意の整数 $\ell \in (0, 1)$ に対し、重なりのない経験分布 $\hat{P}_\ell(\cdot|x^n)$ を

$$\hat{P}_\ell(a^\ell|x^n) \triangleq \frac{|\{i : 0 \leq i < m, x_{i+1}^{\ell+i} = a^\ell\}|}{m}, \quad \forall a^\ell \in \mathcal{X}^\ell$$

によって定義する。ただし、 $m = \lfloor n/\ell \rfloor$ である。このとき、任意の $\epsilon \in (0, 1)$ に対して、系列 x の重なりのないスムーズ最大エントロピーは、

$$\hat{H}^\epsilon(x) \triangleq \limsup_{\ell \rightarrow \infty} \limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\ell} H^\epsilon(\hat{P}_\ell(\cdot|x^n))$$

によって定義される。

以上の準備の下で、著者らは、個別系列の情報量について次の等価性を示した。

定理 7 (Uyematsu-Matsuta⁽⁵⁾) 任意の系列 x に対して、

$$H_Z(x) = \lim_{\epsilon \downarrow 0} H^\epsilon(x) = \lim_{\epsilon \downarrow 0} \hat{H}^\epsilon(x)$$

が成り立つ。

定理 2, 5 と 7 を組み合わせることで、これまでに出てきた情

報量の等価性と大小関係を示す次の系が導かれる。

系 1 任意の系列 x に対して、

$$\begin{aligned} c(x) &\leq R_f(x) = H_Z(x) = \lim_{\epsilon \downarrow 0} H^\epsilon(x) = \lim_{\epsilon \downarrow 0} \hat{H}^\epsilon(x) \\ &\leq h(x) = \hat{h}(x) = R_{f0}(x) \end{aligned}$$

が成り立つ。

定理 7 によって、具体的な固定長符号化法を考える際、 $H_Z(x)$ を利用する代わりに、取り扱いが容易な 2 種のスムーズ最大エントロピー $H^\epsilon(x)$ や $\hat{H}^\epsilon(x)$ を利用することができる。次節では、 $H^\epsilon(x)$ を利用した、著者らが提案した固定長符号化法について述べる。

2.5 誤り率が漸近的に零に収束する新しい固定長符号化法

本節では定理 7 に着目し、重なりを許したスムーズ最大エントロピーを用いた個別系列に対する新たな固定長符号化法⁽⁵⁾を示す。

任意の $\epsilon \in (0, 1)$ とブロック $x^n \in \mathcal{X}^n$ に対し、 $\ell|\mathcal{X}|^\ell \leq n$ を満足する最大の整数を ℓ とする。また、 $B_\ell^\epsilon(x^n)$ によって、次の二つの式を満足する \mathcal{X}^ℓ の部分集合を表す。

$$P_\ell(B_\ell^\epsilon(x^n)|x^n) \geq 1 - \epsilon \text{ かつ } \log |B_\ell^\epsilon(x^n)| = H^\epsilon(P_\ell(\cdot|x^n))$$

このとき、 $P_\ell(\cdot|x^n)$ の定義から、ある整数 $t_o \in [0, \ell - 1]$ が存在し、

$$\sum_{i=1}^{\lfloor (n-t_o)/\ell \rfloor} 1_{\{x_{t_o+(i-1)\ell+1}^{t_o+i\ell} \notin B_\ell^\epsilon(x^n)\}} \leq \frac{(n-\ell+1)\epsilon}{\ell}$$

を満足する^(注3)。

さて、ブロック x^n の符号化は、先に述べた固定長符号とはほぼ同様に行える。 x^n に対応する符号語の先頭部分は、 $B_\ell^\epsilon(x^n)$ に属する長さ ℓ の部分列のリストからなり、これは $|\mathcal{X}|^\ell$ ビットで表現される。符号語の 2 番目の部分は t_o を $\lceil \log \ell \rceil$ ビットで表したものである。次に、系列 x^n を次のように区切る。

$$x_1^{t_o}, x_{t_o+1}^{t_o+\ell}, x_{t_o+\ell+1}^{t_o+2\ell}, \dots, x_{t_o+(m-1)\ell+1}^{t_o+m\ell}, x_{t_o+m\ell+1}^n$$

ただし、 $m = \lfloor (n - t_o)/\ell \rfloor$ である。まず最初の長さ t_o の部分列 $x_1^{t_o}$ を $\lceil \log |\mathcal{X}|^{t_o} \rceil$ ビットの 2 進表現で表す。符号語の次の部分は、長さ ℓ の各部分列 $x_{t_o+1}^{t_o+\ell}, x_{t_o+\ell+1}^{t_o+2\ell}, \dots, x_{t_o+(m-1)\ell+1}^{t_o+m\ell}$ が部分集合 $B_\ell^\epsilon(x^n)$ の辞書的順序で何番目であるかを示すインデックスに符号化したものである。なお、もし部分列が $B_\ell^\epsilon(x^n)$ に含まれない場合は、任意のインデックスに符号化する。このとき各インデックスは $\lceil \ell H_\ell^\epsilon(x^n) \rceil$ ビットで表される。最後に部分列 $x_{t_o+m\ell+1}^n$ を $\lceil \log |\mathcal{X}|^{n-t_o-m\ell} \rceil$ ビットの 2 進表現で表したものを接続する。以上のことから、系列 x^n に対応する符号語の符号長 $\hat{L}(x^n)$ は

(注3) $1_{\{\cdot\}}$ はインジケータ関数を表し、中括弧の中の命題が真であるときは 1、偽であるときは 0 を表す。

$$\begin{aligned} \hat{L}(x^n) &= |\mathcal{X}|^\ell + \lceil \log \ell \rceil + \lceil \log |\mathcal{X}|^{t_o} \rceil \\ &\quad + m \lceil \ell H_\ell^\epsilon(x^n) \rceil + \lceil \log |\mathcal{X}|^{n-t_o-m\ell} \rceil \\ &< n H_\ell^\epsilon(x^n) + n/\ell + |\mathcal{X}|^\ell + \lceil \log \ell \rceil + 2\ell \log |\mathcal{X}| \end{aligned}$$

によって定められる。また、 x^n に対応する符号語を復号することによって得られた系列を y^n とすれば、誤り率 $\epsilon_n(x^n)$ について

$$\epsilon_n(x^n) = \frac{1}{n} d_H^n(y^n, x^n) \leq \ell \times \frac{(n-\ell+1)\epsilon}{n\ell} \leq \epsilon$$

が成り立つ。

明らかに、この符号は可変長符号である。そこで、与えられた符号化レート R に応じて、符号語の最後に 0 を付け加えるか、あるいは最後の部分を削除するかによって、符号長が固定長の nR ビットになるように調整する。

例 5: 再び 2 元系列 $x^{12} = 000011010001$ の符号化を考えよう。 $\ell = 2$ とし、経験分布 $P_2(\cdot|x^{12})$ は、

$$\begin{aligned} P_2(00|x^{12}) &= \frac{5}{11}, \quad P_2(01|x^{12}) = \frac{3}{11} \\ P_2(10|x^{12}) &= \frac{2}{11}, \quad P_2(11|x^{12}) = \frac{1}{11} \end{aligned}$$

によって定まる。ここで、 $\epsilon = 3/11$ とすれば、 $B_2^{3/11}(x^{12}) = \{00, 01\}$ である。辞書的順序が例 3 と同様だとすれば、符号語の最初の部分は 1100 である。次に、 t_o を定める。 x^{12} に関する次の二つの区切り

$$\begin{aligned} x^{12} &= 00 \ 00 \ 11 \ 01 \ 00 \ 01 \\ x^{12} &= 0 \ 00 \ 01 \ 10 \ 10 \ 00 \ 1 \end{aligned}$$

において、最初の区切りでは、11 のみが $B_2^{3/11}(x^{12})$ に属していないが、2 番目の区切りでは、2 個の 10 が $B_2^{3/11}(x^{12})$ に属していない。したがって、 $t_o = 0$ となり、符号語の 2 番目の部分は 0 となる。この区切りでは、 $x_1^{t_o}$ と $x_{t_o+m\ell+1}^n$ は空列になるので、これらの部分列は符号化しない。インデックス 0 を部分列 00 に、インデックス 1 を部分列 01 に割り当てれば、各々の部分列はインデックス列 001101 に符号化される。以上のことから、 x^{12} に対応する符号語は

$$\underbrace{1100}_{\text{list of 2-strings}} \quad \underbrace{0}_{t_o} \quad \underbrace{001101}_{\text{sequence of indices}}$$

となる。また、この符号語を復号することによって得られる系列は、 $y^{12} = 000001010001$ となり、 $\epsilon_n(x^{12}) = d_H^n(x^{12}, y^{12})/12 = 1/12$ である。

次の定理は、この符号が $(n, 2^{nR}, 2\epsilon)$ 符号になるための符号化レート R の条件を明らかにしている。

定理 8 (Uyematsu-Matsuta⁽⁵⁾) 指定された符号化レート $R > 0$ 、任意の実数 $\epsilon \in (0, 1)$ と十分大きな整数 n に対し、提案した固定長符号は次の条件を満足する系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ について $(n, 2^{nR}, 2\epsilon)$ 符号となる。

$$H_Z(x) \leq R - \hat{r}_n(x)$$

ただし、 $\hat{r}_n(x)$ は冗長度を表し、

$$\hat{r}_n(x) \leq H_\ell^{\epsilon^2/2}(x) - H_Z(x) + \frac{2}{\ell} + \frac{2 \log \ell}{\ell |\mathcal{X}|^\ell} + \frac{2 \log |\mathcal{X}|}{|\mathcal{X}|^\ell} + \epsilon \quad (5)$$

を満足する。

ℓ の選び方から、 $n \rightarrow \infty$ のとき $\ell \rightarrow \infty$ が成り立つことに注意すれば、式 (5) において n に関する上極限を取れば、右辺は $H^{\epsilon^2/2}(x) - H_Z(x) + \epsilon$ に漸近する。 $\epsilon \in (0, 1)$ は任意に小さくできるので、定理 8 は提案した固定長符号が最小許容符号化レート $H_Z(x)$ を達成できることを示している。

Ziv⁽¹⁾ は、任意の $\epsilon > 0$ に対して、 $d(x, y) \leq \epsilon^2/2$ か $h_\ell(y) \leq H_Z(x) + \epsilon$ を満たす系列 y を利用することで最小許容符号化レート $H_Z(x)$ を達成する固定長符号を構成している。しかしながら、Ziv の固定長符号は、Ziv エントロピーの計算同様に、系列 y の探索に符号長 n の指数オーダーの計算量が必要である。これに対して、提案した固定長符号は $O(n \log n)$ の計算量で符号化でき、計算量の面で大幅な改善が得られている。

3. 個別系列の可変長符号化

3.1 可変長符号化の定式化

個別系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ を長さ n のブロック $x_1^n, x_{n+1}^{2n}, \dots$ に区切り、各ブロック $x_{(i-1)n+1}^{in}$ ($i = 1, 2, \dots$) を $\{0, 1\}$ 上のプリフィックス条件⁽¹⁷⁾ を満たす有限系列に変換する操作を可変長符号化といい、混同が生じない限り、この変換もまた写像 $\varphi_n : \mathcal{X}^n \rightarrow \{0, 1\}^*$ によって表して符号器と呼び、 $\varphi_n(x^n)$ を部分列 x^n に対応する符号語と呼ぶ。また、符号語 $w (= \varphi_n(x^n))$ から元の出力系列 x^n を復元する操作を復号器といい、この操作を表す写像 $\psi_n : \text{Image}(\varphi_n) \rightarrow \mathcal{X}^n$ を復号器と呼ぶ。

可変長符号化においては、常に符号語から元の系列を復元できるので、符号化による 1 記号あたりの符号語長、すなわち

$$\rho_n^\varphi(x) \triangleq \limsup_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m L(\varphi_n(x_{(i-1)n+1}^{in})) \quad (6)$$

をどこまで小さくできるかが問題となる。ただし、 $L(\cdot)$ は系列長を表す関数である。可変長符号化における Ziv と Lempel の成果⁽³⁾ で重要な役割を占めるのが、次に述べる有限状態符号器を用いた際の 1 記号あたりの符号語長の最小値である。

定義 10 (可変長最小符号化レート⁽³⁾) 状態数 s の有限状態符号器 φ_n によって長さ n の系列 x^n を符号化して得られる可変長符号化レートの最小値を

$$\rho_{E(s)}(x^n) \triangleq \min_{\varphi_n} \frac{L(\varphi_n(x^n))}{n}$$

によって定める。ただし、最小値は状態数 s の有限状態符号器 φ_n にわたって取られる。このとき、系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ を有限状態符号器によって符号化して得られる可変長最小符号化レートを

$$\rho(x) \triangleq \lim_{s \rightarrow \infty} \limsup_{n \rightarrow \infty} \rho_{E(s)}(x^n)$$

によって定義する。

3.2 可変長最小符号化レートの限界

本節では、個別系列の可変長最小符号化レートの情報量による特徴づけについて説明する。最初に、有限状態符号器を用いた可変長最小符号化レートの限界について述べる。

定理 9 (Ziv-Lempel⁽¹⁴⁾) 系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ について、有限状態符号器によって達成できる可変長最小符号化レートは

$$\rho(x) \geq c(x)$$

を満足する。ただし、 $c(x)$ は定義 6 に示した系列の複雑度を表す。他方、系列 x を長さ n のブロック $x_1^n, x_{n+1}^{2n}, \dots$ に区切り、各々のブロックを LZ78 符号で符号化することによって得られる 1 記号あたりの符号語長 (式 (6)) を $\rho_n^{LZ}(x)$ によって表すとき、任意の $\epsilon > 0$ について

$$\rho_n^{LZ}(x) \leq \rho(x) + \delta_\epsilon(x, n)$$

が成り立つ。ただし、 $\lim_{n \rightarrow \infty} \delta_\epsilon(x, n) = \epsilon$ である。

定理 9 は、有限状態符号器によって得られる可変長最小符号化レートが漸近的に LZ78 符号で達成できることを示しており、LZ78 符号の最良性を示している。なお、Ziv と Lempel は複雑度 $C(x^n)$ の代わりに、系列 x^n を相異なる部分列に分解したときの部分列の最大数について定理 9 を証明していることに注意しておく。

更に、1978 年に Ziv と Lempel は可変長最小符号化レート $\rho(x)$ の特徴づけを行った。この成果について述べる前に、重なりを許した経験分布のエントロピーを定義する。

定義 11 (重なりを許した経験分布のエントロピー) 系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ の重なりを許した経験分布のエントロピーは、経験分布 $P_\ell(\cdot|x^n)$ に対する正規化エントロピーの極限であり、

$$H(x) \triangleq \lim_{\ell \rightarrow \infty} \limsup_{n \rightarrow \infty} -\frac{1}{\ell} \sum_{a^\ell \in \mathcal{X}^\ell} P_\ell(a^\ell|x^n) \log P_\ell(a^\ell|x^n)$$

によって定義される。

次の定理は可変長最小符号化レート $\rho(x)$ の特徴づけを与えるものである。

定理 10 (Ziv-Lempel⁽³⁾) 系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ について

$$\rho(x) = H(x)$$

が成り立つ。特に、エントロピーレート H を有するエルゴード情報源からの出力列 x について、

$$c(x) = \rho(x) = H(x) = H$$

が確率 1 で成り立つ。

定理 10 は、エルゴード情報源の可変長符号化定理⁽¹²⁾ と一致しており、Ziv と Lempel による成果は、可変長符号化定理の個別系列への拡張と見ることもできる。

一方、2000年代半ばに著者らは、個別系列の情報量を新たに二つ導入し、アルファベットが有限のみならず可算無限の場合にも可変長符号化の限界を表すとともに、それらの情報量と個別系列の重なりを許した経験エントロピーや複雑度との大小関係を明らかにした⁽⁷⁾。まず、個別系列に対する新たな二つの情報量と符号長関数について述べる。

定義 12 (重なりのない経験分布のエントロピー (Kuzuoka-Uyematsu⁽⁷⁾)) 系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ の重なりのない経験分布のエントロピーは、経験分布 $\hat{P}_\ell(\cdot|x^n)$ の正規化エントロピーの極限であり、

$$\hat{H}(x) \triangleq \lim_{\ell \rightarrow \infty} \limsup_{n \rightarrow \infty} -\frac{1}{\ell} \sum_{a^\ell \in \mathcal{X}^\ell} \hat{P}_\ell(a^\ell|x^n) \log \hat{P}_\ell(a^\ell|x^n)$$

によって定義される。

定義 13 (自己エントロピーレート (Kuzuoka-Uyematsu⁽⁷⁾)) 系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ の自己エントロピーレート $h^{KU}(x)$ を

$$h^{KU}(x) \triangleq \lim_{\ell \rightarrow \infty} \limsup_{n \rightarrow \infty} \inf_{\mu \in \mathcal{P}_\ell} -\frac{1}{n} \log \mu(x^n)$$

によって定義する。ただし、 \mathcal{P}_ℓ は、 \mathcal{X} 上の ℓ 次マルコフ情報源の集合を表し、初期状態 $x_{-\ell+1}^0$ もまた情報源の確率分布 $\mu \in \mathcal{P}_\ell$ に含まれるものとする。

注意 4: $h^{KU}(x)$ は有限次元マルコフ情報源の中で x のゆがみを最大にするものを選んだときの x の 1 記号あたりの理想符号長を示している。

可変長符号 $\varphi: \mathcal{X} \rightarrow \{0,1\}^*$ に対し、 $\sigma(x) \triangleq L(\varphi(x))$ ($\forall x \in \mathcal{X}$) をその符号長関数と呼ぶ。以下では、可変長符号から一意的に符号長関数が定まることから、可変長符号と符号長関数を同一視する。このとき、有限長符号化可能 (finite encodable) を次のように定義する。

定義 14 (有限長符号化可能 (Kuzuoka-Uyematsu⁽⁷⁾)) \mathcal{X} が可算無限アルファベットであるとき、系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ に対して、ある符号長関数 σ が存在して、

$$\lim_{u \rightarrow \infty} \limsup_{n \rightarrow \infty} \sum_{a \in \mathcal{X}: \sigma(a) \geq u} P_1(a|x^n) \sigma(a) = 0$$

が成り立つとき、 x は有限長符号化可能であるという。同様に、符号長関数 σ に対して、有限長符号化可能である系列の集合を

$$\mathcal{X}^\infty(\sigma) \triangleq \{x \in \mathcal{X}^\infty : x \text{ は } \sigma \text{ について有限長符号化可能}\}$$

によって定義する。

なお、 \mathcal{X} が有限アルファベットならば、 \mathcal{X} 上の全ての系列は有限長符号化可能であることに注意しておく。

次の定理は可変長符号化最小レートが新たな情報量で特徴づけられることを示したものである。

定理 11 (Kuzuoka-Uyematsu⁽⁷⁾) 系列 $x \in \mathcal{X}^\infty$ について、

$$c(x) \leq h^{KU}(x) = \hat{H}(x) = H(x) = \rho(x) \quad (7)$$

が成り立つ。更に、 \mathcal{X} が可算無限アルファベットの場合、系列

x が有限長符号化可能ならば式 (7) が成り立つ。

定理 11 において、経験分布のエントロピーに対してエルゴード定理を適用し、有限長符号化可能の定義を考慮することで、次の系が直ちに導かれる。

系 2 \mathcal{X} を可算無限アルファベットとする。このとき、有限のエントロピーレート H を有する定常エルゴード情報源からの出力列について、

$$c(x) = h^{KU}(x) = \hat{H}(x) = H(x) = \rho(x) = H$$

が確率 1 で成り立つ。

著者らは、定理 11 を利用し、可算無限アルファベット上の個別系列に対する次のようなユニバーサル符号化定理を示した。

系 3 (Kuzuoka-Uyematsu⁽⁷⁾) \mathcal{X} を可算無限アルファベットとする。符号長関数列 $\{\sigma^{(n)}\}_{n=1}^\infty$ が定められたとき、ある可変長符号列 $\{\varphi_n^*: \mathcal{X}^n \rightarrow \{0,1\}^*\}_{n=1}^\infty$ が存在して、任意の系列 $x \in \bigcup_{i=1}^\infty \mathcal{X}^\infty(\sigma^{(i)})$ について

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{L(\varphi_n^*(x^n))}{n} \leq h^{KU}(x) = \hat{H}(x) = H(x) = \rho(x)$$

を満足する。

系 3 は、可算無限アルファベット上の系列については、符号長関数列の選び方に依ってユニバーサル符号が異なり、各々のユニバーサル符号によって符号化できる系列の集合が異なることを意味しており、有限アルファベットの個別系列との大きな違いを示している。

次の定理は、系 3 を可算無限アルファベット上の定常エルゴード情報源のユニバーサル符号化に応用したものである。

定理 12 (Kuzuoka-Uyematsu⁽⁷⁾) 可算無限アルファベット \mathcal{X} 上の定常エルゴード情報源の集合 Ω に対し、可算無限個の符号長関数の集合 Σ が存在して、任意の情報源 $\mu \in \Omega$ について $E_\mu[\sigma(X_1)] < \infty$ を満足する符号長関数 $\sigma \in \Sigma$ があるならば、ある部分集合 $A^* \subset \mathcal{X}^\infty$ とある可変長符号列 $\{\varphi_n^*: \mathcal{X}^n \rightarrow \{0,1\}^*\}_{n=1}^\infty$ が存在して

$$\mu(A^*) = 1, \quad \forall \mu \in \Omega$$

並びに

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{L(\varphi_n^*(x^n))}{n} \leq \rho(x) = H$$

を満足する。ただし、 H は情報源 μ のエントロピーレートを表す。

この後、個別系列の可変長符号化に関する新たな展開として、2008 年に Ziv⁽⁸⁾ は、符号器の最良性として、ブロック長を無限に大きくしたときに符号化レートが可変長最小符号化レートに収束する漸近最良性だけでなく、ブロック長 n が有限の場合の最良性についても検討を行い、有限ブロック長 n の符号器の本質的最良性を導入した。

定義 15 (本質的最良性 (Ziv⁽⁹⁾)) ブロック長 n に対する漸近的

に最良な符号器 $\varphi_n : \mathcal{X}^n \rightarrow \{0, 1\}^*$ が本質的に最良 (essentially optimal) であるとは、ある個別系列の集合 $S(n, \varphi_n, k \log |\mathcal{X}|)$ ($0 < k < 1$) が存在して、

- (1) $S(n, \varphi_n, k \log |\mathcal{X}|)$ に属する全ての系列 x について

$$\rho(x) < k \log |\mathcal{X}| \quad \text{かつ} \quad \rho(x) \leq \rho_n^\varphi(x) \leq \rho(x) + \epsilon$$

が成り立つ。ただし、 $\epsilon > 0$ は任意に小さい実数である。

- (2) n' を $n' \leq n^{1-\epsilon}$ を満たす正整数とすると、いかなる符号器 $\hat{\varphi}_{n'} : \mathcal{X}^{n'} \rightarrow \{0, 1\}^*$ に対しても、ある系列 $x \in S(n, \varphi_n, k \log |\mathcal{X}|)$ が存在し、

$$\rho_{n'}^{\hat{\varphi}}(x) \geq \log |\mathcal{X}| - \epsilon$$

が成り立つ。

符号器 φ_n が本質的に最良であるとは、個別系列の集合 $S(n, \varphi_n, k \log |\mathcal{X}|)$ が存在し、ブロック長 n よりも指数関数的に小さいブロック長 $n' (< n^{1-\epsilon})$ では、本質的に符号化できない系列 x が $S(n, \varphi_n, k \log |\mathcal{X}|)$ に存在するが、ブロック長が n 以上あれば、 $S(n, \varphi_n, k \log |\mathcal{X}|)$ に属する全ての系列 x は可変長最小符号化レート $\rho(x)$ 近くまで符号化できることを示している。

次の定理は、本質的に最良な符号器の存在を示したものである。

定理 13 (Ziv^{(8), (9)} 文脈木を用いたユニバーサル符号化⁽⁸⁾ と LZ77 符号⁽²⁾ は本質的に最良である。

4. む す び

小文では、個別系列の無歪み符号化問題に着目し、固定長符号化並びに可変長符号化について、70 年代に Ziv らによって得られた成果、並びに 2000 年代以降に著者や Ziv らによって得られた成果を解説した。なお、複数の個別系列の多端子情報理論的な成果は、Slepian-Wolf 符号化問題^{(18), (19)}を除いて、まだほとんど明らかにはされておらず、今後の研究が待たれる。

謝辞 小文で述べた個別系列の符号化の共同研究者であった 2 人の高弟、和歌山大学 葛岡成晃教授並びに埼玉大学 松田哲直准教授に深謝する。また小文の発表の機会を与えて下さった情報理論研究専門委員会に感謝する。

文 献

- (1) J. Ziv, “Coding theorems for individual sequences,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol.24, no.4, pp.405–412, July 1978.
- (2) J. Ziv and A. Lempel, “A universal algorithm for sequential data compression,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol.23, no.3, pp.337–343, May 1977.
- (3) J. Ziv and A. Lempel, “Compression of individual sequences via variable-rate coding,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol.24, no.5, pp.530–536, Sept. 1978.
- (4) H. Yamamoto, “Notes on coding theorems for individual sequences,” Proc. Symp. Inf. Theory and its Apps. 1985, pp.381–384, Dec. 1985.
- (5) T. Uyematsu and T. Matsuta, “Equivalences among some information measures for individual sequences

and their applications for fixed-length coding problems,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E107-A, no.3, pp.393–403, March 2024.

- (6) G. Dueck and L. Wolters, “The Slepian-Wolf theorem for individual sequences,” Problems of Control and Information Theory, vol.14, pp.437–450, 1985.
- (7) S. Kuzuoka and T. Uyematsu, “Relationship among complexities of individual sequences over countable alphabet,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E89-A, no.7, pp.2047–2055, July 2006.
- (8) J. Ziv, “On finite memory universal data compression and classification of individual sequences,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol.54, no.4, pp.1626–1636, April 2008.
- (9) J. Ziv, “The universal LZ77 compression algorithm is essentially optimal for individual finite-length n -blocks,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol.55, no.5, pp.1941–1944, May 2009.
- (10) C.E. Shannon, “A mathematical theory of communication,” Bell Syst. Tech. J., vol.27, pp.379–423, 623–656, 1948.
- (11) C.E. シャノン, W. ウィーバー, 通信の数学的理論, 植松友彦 (訳), ちくま書房, 2009.
- (12) T.S. Han, Information-Spectrum Methods in Information Theory, Springer, 2003.
- (13) J. Ziv, “Coding of sources with unknown statistics — Part I, probability of encoding error,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol.18, no.3, pp.384–394, May 1972.
- (14) A. Lempel and J. Ziv, “On the complexity of finite sequences,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol.22, no.1, pp.75–81, Sept. 1976.
- (15) R. Renner and S. Wolf, “Simple and tight bounds for information reconciliation and privacy amplification,” Proc. ASIACRYPT 2005, LNCS 2788, pp.199–216, 2005.
- (16) T. Uyematsu, “A new unified method for fixed-length source coding problems of general sources,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E93-A, no.11, pp.1868–1877, Nov. 2010.
- (17) T.M. Cover and J.A. Thomas, Elements of Information Theory, 2nd Edition, Wiley, 2006.
- (18) J. Ziv, “Fixed-rate encoding of individual sequences with side information,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol.30, no.2, pp.348–332, March 1984.
- (19) S. Kuzuoka, “Slepian-Wolf coding of individual sequences based on ensembles of linear functions,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E92-A, no.10, pp.2393–2401, Oct. 2024.

(IT 研究会提案, 2025 年 5 月 29 日受付,

2025 年 6 月 21 日再受付)



植松友彦 (正員: フェロー)

昭 57 東工大・工・電気電子卒, 昭 59 同大学院修士課程了。同年同大助手, 同大講師を経て平 3 同大助教授。平 4 北陸先端大助教授。平 9 東工大助教授。平 15 同大教授。令 6 大学統合により東京科学大教授。令 7 同大名誉教授。令 7 放送大学東京渋谷学習センター所長・特任教授。工博。情報理論, 特にシャノン理論の研究に従事。本会篠原記念学術奨励賞, 業績賞, 喜安善市賞, 論文賞 (複数回) など受賞。平 27 本会基礎・境界ソサイエティ会長, 令 2 副会長 (学術強化担当), 令 7 会長。

力学系の数値分岐解析とその応用

Numerical Bifurcation Analysis and Its Application

北島博之 Hiroyuki KITAJIMA

アブストラクト 著者は研究者としての道を歩み始めて以来、約 30 年間にわたり力学系の数値分岐解析を行ってきた。数値分岐解析用プログラムとしては、AUTO や MatCont などがよく用いられている。本稿では、主に著者が所属した徳島大学・川上研究室で開発されてきた数値分岐解析アルゴリズムを中心にその発展の推移とその応用について述べる。

キーワード 力学系, 局所的分岐, 大域的分岐, 余次元 2 の分岐, 心臓数理モデル

Abstract I have investigated numerical bifurcations in dynamical systems over the past thirty years since the beginning of my research career. AUTO and MatCont are well-known programs for numerical bifurcation analysis. In this review, I mainly describe the history of algorithm development in the Kawakami Lab, along with some recent applications to cardiac systems.

Key words Dynamical system, Local bifurcation, Global bifurcation, Codimension-two bifurcation, Cardiac system

1. はじめに

非線形システムとは、「線形でないシステム」という定義である。では、線形システムとは何か？ 学部生の講義で出てくる範囲であり、下記の条件を満たすシステムとなる。

$$f(0) = 0, f(ax) = af(x) \quad (1)$$

この性質があるために重ね合わせの理が成り立ち、非同次微分方程式の一般解が、「同次方程式の一般解」と「非同次方程式の特殊解の一つ」の和で求められたり、異なる電源周波数がある場合の交流回路の電圧・電流の計算が可能となったりする。非線形システムでは、微分方程式の解を解析的に求めることがほぼ不可能であるために、解の定性的な性質のパラメータ依存性を調べるのが非常に重要となる。パラメータの変化に伴い解の定性的性質の変化する現象を分岐 (bifurcation) と呼ぶ。

分岐には、局所的分岐 (local bifurcation) と大域的分岐 (global bifurcation) がある。局所的分岐は更に余次元 1 (codimension-one) の分岐である接線分岐 (tangent bifurcation) (またはサドルノード (saddle-node) 分岐, フォールド (fold) 分岐), 周期倍分岐 (period-doubling) (またはフリップ (flip) 分岐), Neimark-Sacker 分岐, Hopf 分岐があり、余次元 2 (codimension-two) 分岐としては、ピッチフォーク (pitchfork) 分岐やトランスク

リティカル (transcritical) 分岐がある。余次元 1 とか 2 の数字は簡単にいうと分岐が起こるための条件の数である。余次元 1 では特性乗数の値のみで分岐の発生が決まるが、上記の余次元 2 の分岐では特性乗数の値に加えてシステムのもつ対称性も満たす必要がある。更には、余次元 1 の分岐集合同士がパラメータ平面上で交わる場合にも余次元 2 の分岐が発生する。大域的分岐には、同じ解の不安定多様体 (α 枝) と安定多様体 (ω 枝) が交わるホモクリニック (homoclinic) 分岐や異なる解の α 枝と ω 枝が交わるヘテロクリニック (heteroclinic) 分岐がある。

これらの分岐がパラメータ空間内のどこで起こるかを調べるために様々なソフトウェアが提供されている。世界的に使われているものとしては AUTO⁽¹⁾ や MatCont⁽²⁾ がある。日本で開発されたものとしては ERATO 合原プロジェクトで開発された Bunki がある。Bunki は著者が所属していた徳島大学川上研究室で開発されたアルゴリズムが中心となっている。

2. 分岐探索アルゴリズム

2.1 局所的分岐

紙幅の都合で詳しいアルゴリズムについては文献(3), (4)を参照して頂くとしてここでは簡単な概要を述べる。対象となるシステムは差分方程式 (漸化式) で記述される離散時間システム (discrete-time dynamical system) や微分方程式で記述される連続時間システム (continuous-time dynamical system) である。ここでは、次の離散時間システムを考える。

$$x_{n+1} = f(x_n, \lambda) \quad n = 0, 1, \dots \quad (2)$$

ここで、 n は時刻、 λ はパラメータ、関数 $f(x_n, \lambda)$ は必要となる

北島博之 正員 香川大学創造工学部
E-mail kitajima.hiroyuki@kagawa-u.ac.jp
Hiroyuki KITAJIMA, Member (Faculty of Engineering and Design, Kagawa University, Takamatsu, 761-0396 Japan).
電子情報通信学会 基礎・境界サイエティ
Fundamentals Review Vol.19 No.2 pp.55-59 2025 年 7 月
©電子情報通信学会 2025

回数 x_n や λ に関して微分可能であるとする。連続時間システムに関しては、非自律系 (non-autonomous system) であれば外力の周期ごとで時間を離散化、自律系 (autonomous system) では状態空間内で適切な断面上のみを考えることで時間を離散化することで同様の議論が可能となる。

まずは周期解である条件を満たす必要がある。

$$u = f(u) \quad (3)$$

ここでは簡単のために固定点を考える。ヤコビ行列は

$$D = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=u} \quad (4)$$

となる。この行列の特性方程式は次式となる。

$$\chi(\mu) = \det(D - \mu I) \quad (5)$$

この特性乗数 μ の値によりどの余次元 1 の分岐が発生するか決まる。 $\mu = 1$ で接線分岐、 $\mu = -1$ で周期倍分岐、それら以外の $\mu = \exp(i\theta)$ で Neimark-Sacker 分岐が発生する。パラメータ平面での分岐集合の追跡は式 (3) と (5) を Newton 法などで連立させて解くことにより可能となる。特に式 (5) を解くときには、解軌道の初期値とパラメータに関する微分や、初期値に関する 2 階微分などが必要となる。これらの計算方法を示した文献が(3)である。

その後、式 (2) において関数 f が微分不可点を含む場合として、インパルス列を印加した BVP 方程式を例として分岐集合追跡アルゴリズムが提案された(5)。基本的な考えは f が微分不可となる点において合成写像を構成することにより、 f が微分可能である場合のアルゴリズムを適用可能にした。馬越らはこのアイデアを拡張して非線形断続回路 (強制外力依存及び状態依存のスイッチング動作をもつ回路) における分岐集合追跡アルゴリズムを示した(6)。吉永らはニューロンが化学シナプスにより結合された遅延のあるシステムに対して、ニューロンの膜電位がしきい値に達して遅れ時間経過した後に、別途用意していた状態変数の値を強制変化させる (ここで f が微分不可となる) ことで化学シナプスに対応するアルファ関数を発生させ、化学シナプス結合システムにおける分岐集合追跡アルゴリズムを開発した(7)。

式 (2) において下記

$$f(Px, \lambda) = Pf(x, \lambda) \quad (6)$$

を満たすときにシステムは P 対称方程式であるといわれる。勝田らはこのような対称性がある場合の分岐集合を求める効率的な手法を提案した(8)。(9)。特に、対称性を有するシステムにおける解の対称性を定義し、分岐により解の対称性が保存・破壊される場合を示した。対称性破壊分岐は一般に退化した分岐となり通常の方法では分岐パラメータの計算が不可能であったが、文献(8)では対称性を考慮することで可能となった。

ほかにも様々な改良が加えられている。北島らは接線分岐におけるカusp点において計算が止まってしまう問題に対して、新たなベクトル場を形成しそのベクトル場に沿って接線分岐集合を求めることでカusp点でも止まらずに連続的に分岐集合を

追跡可能となるアルゴリズムを開発した(10)。そのアルゴリズムを固定点追跡に応用して、接線分岐があっても連続的に固定点を追跡できるアルゴリズムも開発した(11)。上田らは自律系における効率的な分岐集合追跡アルゴリズムを提案したり(12)、複雑である高次元自律系の Neimark-Sacker 分岐集合を簡素に計算できる方法を示したりした(13)。同じ解の余次元 1 の分岐点がパラメータ平面で交差する場合には余次元 2 の分岐が発生する。川上らはこれらの余次元 2 の分岐パラメータを求めるアルゴリズムを提案し、起こりうる余次元 2 の分岐を分類した(14)。(15)。北島らは周期倍分岐集合とピッチフォーク分岐集合に関連した新たな余次元 2・3 の分岐を見出し(16)、周期倍分岐同士が交わる分岐に関して標準形を用いて起こりうる全ての場合を示した(17)。

2.2 大域的分岐

式 (2) を二次元として考え、式 (3) が満たされているとする。ここで固定点はサドル型 (二つの特性乗数が実数で 1 未満と 1 より大きい場合) であるとする。時間の増加に伴い、この固定点に漸近する不変集合を ω 枝、固定点から離れる不変集合を α 枝と呼ぶ (図 1)。同一の固定点の α 枝と ω 枝が交わる点をホモクリニック点という。ホモクリニック点の存在は馬蹄形写像の存在を意味し、そのことはカオス集合の存在することを意味する。川上らは二次元システムにおいて、非横断的ホモクリニック点を生ずるパラメータ集合を求める方法を示した(18)。図 1 に非横断的なホモクリニック点を示す。非横断的ホモクリニック点を生ずるパラメータ集合を求める際に必要となる条件を下記に示す。

- 固定点の条件 (式 (3))
- 固定点の近傍 $U(\epsilon, D)$ において α 枝上の点 Q_{-M} を M 回写像した点と、 ω 枝上の点 Q_N を N 回逆写像した点と同じ点 Q_0 になる条件
- α 枝上の点 Q_{-M} と ω 枝上の点 Q_N が、それぞれ α 枝上と ω 枝上に含まれる条件 (近傍内の局所表現として両枝の一次近似、すなわち固有ベクトルを用いて記述)
- α 枝と ω 枝を曲線で表して、 α 枝と ω 枝が接する点において両枝の接ベクトルが同じ方向を向く条件

これらの条件を状態変数とパラメータを変数にニュートン法などで解くことによりホモクリニック点が発生するパラメータ値を特定することが可能となり、ほかのパラメータ値を微小変化させて繰り返すことにより、ホモクリニック分岐を起こすパラ

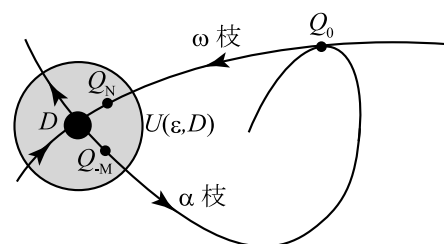


図 1 非横断的ホモクリニック点 D はサドル型の固定点を表す。

メータ集合を得ることができる。

上記の手法では、 ω 枝上の点 Q_N を N 回逆写像した点を求める必要があり、逆写像をもつシステムを前提としていた。吉永らは、拡散結合系の条件下では ω 枝に対応する固定点に入ってくる安定不変集合が解析的に与えられることを利用して非可逆写像でもホモクリニック点が導出可能であることを示した⁽¹⁹⁾。北島らは、これらのアルゴリズムを応用して、サドル型固定点の ω 枝と特異曲線 (critical line: 写像のヤコビ行列の行列式が 0 になる集合を 1 回写像した集合⁽²⁰⁾) が接する (basin bifurcation が起こる) パラメータ集合を求めるアルゴリズムを示した⁽²¹⁾。更に、北島らは周期点の α 枝同士が交わる点を探るアルゴリズムを提案し、カオスの遍歴の発生メカニズムの一端を明らかにした⁽²²⁾。

3. 応 用

非線形システムの分岐集合追跡アルゴリズムを用いた解析は世界中で数多く存在するが本稿では一つの例として心室筋数理モデルの解析を紹介する。心室筋は通常ではペースメーカ細胞からの信号を受けて振動するために、数理モデルでは方形波パルス (外力) を心室筋数理モデルに印加することにより解析を行う。心室筋の異常な応答の一つとして早期後脱分極 (Early Afterdepolarization: EAD) がある。これは図 2 に示すように膜電位が外力の影響で発火した後に静止膜電位に戻る前に小さな振動 (図 2 の小さな黒丸) を自発的に起こす現象である。これが数回起こると膜電位が -20 mV 付近に滞り、心電図上では QT 延長が発生し心臓にとってはよくない。状態空間で考えると EAD の発生は小さな疑似ループの軌道が発生することであり、分岐とは直接的な関係がなく、心室筋数理モデルは一般に高次元系となるので解析が困難となる。ここでは、様々な工夫を施した数値分岐解析を用いた解析例を紹介したい。

倉田らは外力を印加しないシステムの分岐解析を行い、平衡点の Hopf 分岐により発生する小さな振幅の振動解が安定に存在するパラメータ領域と、外力を印可した場合の EAD が観測されるパラメータ領域を調査・比較し、ほぼ同一となることを確かめた⁽²³⁾。これは、一般的に外力が印可されるのは非常に短い時間で、ダイナミクスの大部分は外力がないシステムに従うためである。津元らはカリウムイオン電流のコンダクタンス値の変化により、正常解や EAD が余次元 1 の分岐 (接線分岐、

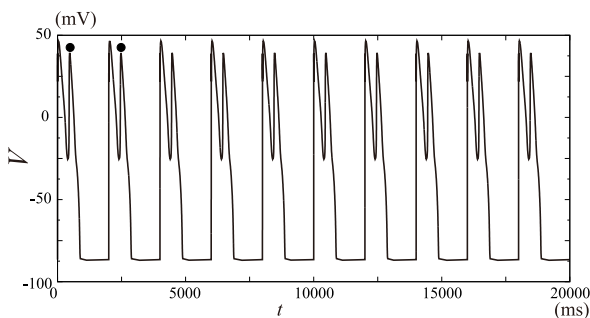


図 2 早期後脱分極時の膜電位波形 黒丸は EAD を示し、3 個以降は省略した。

周期倍分岐、Neimark-Sacker 分岐) を起こし不安定化し、別のアトラクタが出現しヒステリシス特性を示すことを明らかにした⁽²⁴⁾。細胞内ナトリウムイオン濃度、細胞内カルシウムイオン濃度、及び活動電位持続時間などの様々な状態の不連続な変化を引き起こし、結果として二重安定状態及び多重安定状態を形成することを示した。

北島らは高次元システムの中でゆっくりと変化する細胞内ナトリウムイオン濃度 ($[Na]_i$) をパラメータ化し、そのシステムの分岐解析を行うことで、長い時間スケールの中で EAD が連続して起こったり起こらなかったりする現象のメカニズムを明らかにした⁽²⁵⁾。図 3 に解析結果の一例を示す。細胞内ナトリウムイオン濃度をパラメータ化したシステムの分岐解析を行うと、EAD の解の接線分岐が $[Na]_i = 10.8$ mM より少し大きい値で、EAD でない解の接線分岐が $[Na]_i = 10.6$ mM より少し小さい値で発生し、ヒステリシス特性をもつことが分かった。次に、細胞内ナトリウムイオン濃度を状態変数とした元のシステムにおいて、EAD のみが存在する領域 ($[Na]_i < 10.6$) と EAD でない解のみが存在する領域 ($[Na]_i > 10.8$) に初期値を設定して、外力の周期ごとに点列を観測した (図 3)。いずれの場合においても中心部分の EAD がある状態とない状態を繰り返す状態に収束した。これらの解析を行うことにより、元のシステムでは、パラメータ化したシステムの二つの接線分岐点付近で二つの状態 (EAD と no EAD) の遷移を繰り返し、EAD が起こる状態がしばらく続いた後に、EAD でない状態がしばらく続き、それを周期的に繰り返す現象 (図 4 参照。18 回 EAD が連続して発生し、47 回 EAD のない状態が続き、それを周期的に繰り返している) の発生メカニズムが分かった。

更に、ナトリウムイオン濃度の次に遅いダイナミクスをもつ筋小胞体ネットワークにおけるカルシウムイオン濃度 ($[Ca]_{nsr}$) をパラメータ化し、その分岐解析を行った⁽²⁶⁾。結果を図 5 (a) に示す。同図において、EQ は平衡点を、LC はリミットサイクルを表し、 LC_{max} と LC_{min} はそれぞれ振動の最大値と最小値を示す。それぞれの状態が安定な場合は実線、不安定な場合は破線で示した。 $[Ca]_{nsr}$ をパラメータ化しない元のシステムの $[Ca]_{nsr}$ を 5.0 mM (黒い四角形の点) として得られた解軌道を細い実線で表し、最終的なアトラクタは水色の実線で示

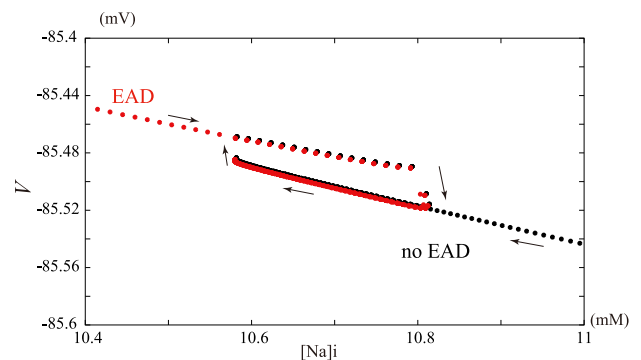


図 3 外力の周期ごとの膜電位と細胞内ナトリウムイオン濃度の値 赤が EAD、黒が正常状態からの遷移を表す。横軸は細胞内ナトリウムイオン濃度を示す。

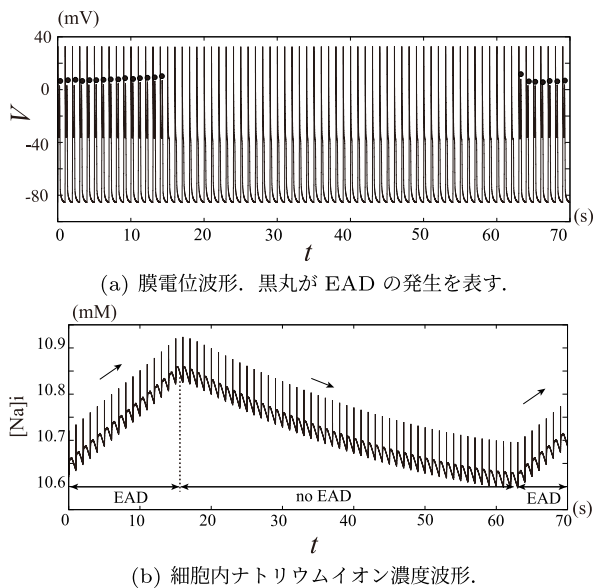
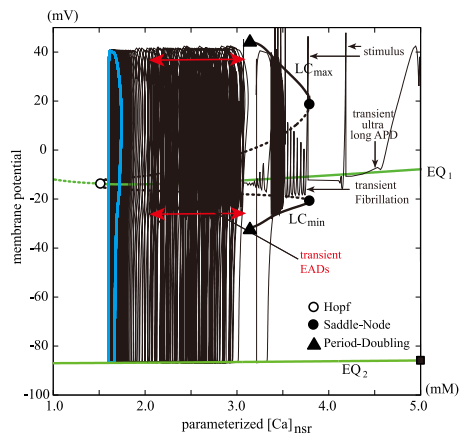
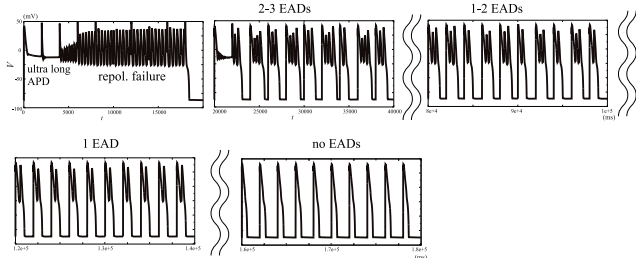


図 4 図 3 に対応する時系列波形



(a) $[Ca]_{nSr}$ をパラメータ化したシステムの 1 パラメータ分岐図と $[Ca]_{nSr}$ が状態変数の場合の解軌道 (細い黒線) の合成図.



(b) (a) の解軌道の膜電位の時間波形.

図 5 $[Ca]_{nSr}$ をパラメータ化したシステムの分岐解析と元のシステムの解軌道の関係

す. この解軌道の膜電位波形を示したのが図 5(b) である. 順番に見ていくと, 解軌道は安定平衡点 (EQ_1) に沿って $[Ca]_{nSr}$ が減少していく. このときに膜電位は 0 mV 付近での静止状態 (図 5(b) では周期的な外力のために一時的に 50 mV 付近まで上昇) となり, 超長期活動電位持続時間 (ultra long APD) が得られる. その後に解軌道はリミットサイクルのサドルノード分岐点を越えることにより, 小さな振幅の振動解となる (図 5(b) の repol. failure). 更に, 時間が経過するとリミットサイクル

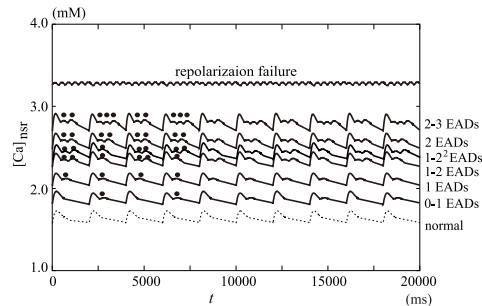


図 6 様々な状態における $[Ca]_{nSr}$ の時系列波形

の周期倍分岐を経て, リミットサイクルが消失し, 再分極 (膜電位が -85 mV 付近まで減少すること) を起こすようになるが, この $[Ca]_{nSr}$ の領域においては様々な EAD が観測される. 最終的には $[Ca]_{nSr} = 1.7$ 付近の正常状態のアトラクタに収束する. 解析を行ったパラメータ領域には様々な安定状態が共存したので, それらの $[Ca]_{nSr}$ の時系列波形を図 6 に示す. 興味深いことに, それらの様々な状態は $[Ca]_{nSr}$ の値で分類できることが分かった ($[Ca]_{nSr}$ が大きいほど心臓にとってはよくない状態). このことを応用すれば, よくない状態 (例えば再分極の失敗: repolarization failure) にあるときに, 強制的に $[Ca]_{nSr}$ の値を 1.5 付近に減少させれば正常状態 (normal) へと制御することができる.

4. まとめ

本稿では著者の近傍 (local) での数値分岐解析アルゴリズム開発の歴史を述べた. 大域的 (global) な話ではないので, 漏れも多いと思うがご容赦願いたい. 数値分岐解析の一例として, 早期後脱分極 (EAD) を題材に心室筋数理モデルの話題を提供した. 低次元モデルでは EAD の発生に関わる分岐解析は数多く行われているが, 高次元モデルにおける分岐解析は非常に数が少ない. ほかの数理モデルも含めて高次元モデルに対する数値分岐解析の需要は大いにあると考えている.

文 献

- (1) <http://indy.cs.concordia.ca/auto/>
- (2) <https://sourceforge.net/projects/matcont/>
- (3) H. Kawakami, "Bifurcation of periodic responses in forced dynamic nonlinear circuits: Computation of bifurcation values of the system parameters," IEEE Trans. Circuits Syst., vol.31, no.3, pp.248–260, 1984.
- (4) K. Tsumoto, T. Ueta, T. Yoshinaga, and H. Kawakami, "Bifurcation analyses of nonlinear dynamical systems: From theory to numerical computations," NOLTA, vol.3, no.4, pp.458–476, 2012.
- (5) O. Morimoto and H. Kawakami, "Bifurcation diagram of a BVP equation with impulsive external force," Proc. NOLTA '94, pp.205–208, 1994.
- (6) 馬越豊, 高坂拓司, 上田哲史, 川上博, "外力と状態で動作するスイッチを含む発振回路の解析," 信学技報, NLP96-169, pp.77–84, 1997.
- (7) T. Yoshinaga, Y. Sano, and H. Kawakami, "A method to calculate bifurcations in synaptically coupled HodgkinHuxley equations," International Jour-

- nal of Bifurcation and Chaos, vol.9, no.7, 1451-1458, 1999.
- (8) 勝田祐司, 川上博, “対称性をもつ非線形自律系に見られる平衡点と周期解の分岐,” 信学論 (A), vol.J75-A, no.6, pp.1035-1044, 1992.
 - (9) 勝田祐司, 川上博, “対称性をもつ非線形非自律系に見られる周期解の分岐,” 信学論 (A), vol.J76-A, no.12, pp.1753-1760, 1993.
 - (10) 北島博之, 川上博, “接線分岐曲線を自動追跡できるアルゴリズムとその Duffing 方程式への応用,” 信会論 (A), vol.J78-A, no.7, pp.806-810, 1995.
 - (11) 北島博之, 川上博, “固定点多様体を追跡する 1 アルゴリズムについて,” 信学論 (A), vol.J79-A, no.5, pp.1122-1124, 1996.
 - (12) T. Ueta, M. Tsueike, H. Kawakami, T. Yoshinaga, and Y. Katsuta, “A computation of bifurcation parameter values for limit cycles,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E80-A, no.9, pp.1725-1728, 1997.
 - (13) 上田哲史, 吉永哲哉, 川上博, 陳関栄, “高次元自律系における Neimark-Sacker 分岐の一計算法,” 信学論 (A), vol.J83-A, no.10, pp.1141-1147, 2000.
 - (14) H. Kawakami and T. Yoshinaga, “Codimension two bifurcation and its computational algorithm,” Bifurcation and Chaos: Theory and Applications, Springer, pp.97-132, 1995.
 - (15) 吉永哲哉, 川上博, “周期的外力を加えた非線形回路にみられる余次元 2 の分岐,” 信学論 (A), vol.J72-A, no.11, pp.1821-1828, 1989.
 - (16) H. Kitajima, T. Yoshinaga, and H. Kawakami, “Codimension two bifurcation observed in a phase converter circuit,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E79-A, no.10, pp.1563-1567, 1996.
 - (17) H. Kitajima and T. Yazawa, “Flip-flip bifurcation in a mathematical cardiac system,” International Journal of Bifurcation and Chaos, vol.29, no.04, 1950045, 2019.
 - (18) 川上博, 松尾次郎, “非線形系にみられる二重漸近運動の分岐,” 信学論 (A), vol.J65-A, no.7, pp.647-654, 1982.
 - (19) T. Yoshinaga, H. Kitajima, H. Kawakami, and C. Mira, “A method to calculate homoclinic points of a two-dimensional noninvertible map,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E80-A, no.9, pp.1560-1566, 1997.
 - (20) C. Mira, D. Fournier-Prunaret, L. Gardini, H. Kawakami, and J.C. Cathala, “Basin bifurcations of two-dimensional noninvertible maps: fractalization of basins,” International Journal of Bifurcation and Chaos, vol.4, no.02, pp.343-381, 1994.
 - (21) H. Kitajima, H. Kawakami, and C. Mira, “A method to calculate basin bifurcation sets for a two-dimensional noninvertible map,” International Journal of Bifurcation and Chaos, vol.10, no.8, pp.2001-2014, 2000.
 - (22) H. Kitajima, T. Yoshinaga, K. Aihara, and H. Kawakami, “Itinerant memory dynamics and global bifurcations in chaotic neural networks,” Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, vol.13, no.3, pp.1122-1132, 2003.
 - (23) Y. Kurata, K. Tsumoto, K. Hayashi, I. Hisatome, M. Tanida, Y. Kuda, and T. Shibamoto, “Dynamical mechanisms of phase-2 early afterdepolarizations in human ventricular myocytes: insights from bifurcation analyses of two mathematical models,” American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology, vol.312, no.1, H106-H127, 2017.
 - (24) K. Tsumoto, Y. Kurata, K. Furutani, and Y. Kurachi, “Hysteretic dynamics of multi-stable early afterdepolarisations with repolarisation reserve attenuation: a potential dynamical mechanism for cardiac arrhythmias,” Scientific Reports, vol.7, no.1, 10771, 2017.
 - (25) H. Kitajima and T. Yazawa, “Bifurcation analysis on generation of early afterdepolarization in a mathe-

- (26) H. Kitajima, T. Yazawa, and R. Barrio, “Fast-slow analysis and bifurcations in the generation of the early afterdepolarization phenomenon in a realistic mathematical human ventricular myocyte model,” Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, vol.34, 123108, 2024.

(NLP 研究会提案, 2025 年 6 月 2 日受付,

2025 年 7 月 7 日再受付)



北島博之 (正員)

1998 徳島大学大学院博士後期課程了。1999 香川大学工学部助手。2015 香川大学工学部教授。数理工学の研究に従事。

Sub-GHz帯LPWANにおける電力検出キャリアセンスとその特性

Energy Detection Based Carrier Sense in Sub-GHz Band LPWANs and Its Characteristics

成枝秀介 Shusuke NARIEDA

アブストラクト IoT (Internet of Things) システムの無線通信インフラとして期待されている技術が、Sub-GHz帯 (我が国では920 MHz帯) を用いるLPWAN (Low Power Wide Area Network) である。著者らはこれまでに、Sub-GHz帯LPWANの特性改善を目的として、キャリアセンス期間中の平均電力を用いる電力検出キャリアセンスの特性を理論的・実験的の両面から性能評価・解析してきた。その結果、ノイズフロア以下の受信信号についても検出可能であり、従来用いられていたキャリアセンス期間中のピーク電力を用いるピーク検出キャリアセンスと比較してLPWANの特性を大きく改善できることを示してきた。本稿では、著者らによるこれまでの解析結果を元に、電力検出キャリアセンスの特性やこれを用いたSub-GHz帯LPWANの特性、誤警報確率などの信号検出パラメータが電力検出キャリアセンスに与える影響など解説する。

キーワード 電力検出キャリアセンス, 信号検出理論, Sub-GHz帯LPWAN

Abstract Sub-GHz band low-power wide-area networks (LPWANs) are expected as wireless communication infrastructure for Internet of Things (IoT) systems. Both theoretically and experimentally, we have analyzed and evaluated the characteristics of the energy detection based carrier sense that can achieve low carrier sense levels for the improvement in sub-GHz band LPWANs. As a result, it has been shown that energy detection for carrier sense detects interference packets with power below the noise floor and significantly improves the characteristics of sub-GHz band LPWANs compared to with conventional peak detection for carrier sense. In this paper, we describe the fundamental characteristics of the energy detection based-carrier sense in sub-GHz band LPWANs using our previous analysis results, which are characteristics of the energy detection based carrier sense, characteristics of sub-GHz band LPWANs with the energy detection based carrier sense, and effects of signal detection parameters, such as target false alarm probability, on the performance of sub-GHz band LPWANs with the energy detection based carrier sense.

Key words Energy detection based carrier sense, Signal detection theories, Sub-GHz band LPWANs

1. はじめに

近年、環境モニタリング⁽¹⁾やスマートメーター^{(2), (3)}, スマートファクトリ^{(4), (5)}といったIoT (Internet of Things) の概念に基づいたシステムが国内外で検討・実装されており、これらを支える基盤技術の一つが無線センサネットワーク⁽⁶⁾である。無線センサネットワークは、物理センサや無線通信機能、信号・データ処理部、バッテリーなどを備える数多くのエンドデバイスと、これらから観測情報を収集するための一つ以上のゲートウェイから構成され、多種多様な物理情報観測・収集機能を実装できる。このような機能を支える無線通信インフラとしては、通信速度こそ低速でよいものの、超多数接続や低コスト、低消費電力通信を実現可能であることが求められる。大容量データ通信が

必要となる5Gなどのセルラシステムや大陸全土、大陸間といった広域通信が必要な衛星通信などとは異なる無線センサネットワークの特徴である。これらを満足するIoT時代の無線センサネットワークの無線通信インフラとして期待されている技術が、低消費電力かつ長距離通信可能といった特長をもつLPWAN (Low Power Wide Area Network) 技術⁽⁷⁾である。LPWANには、LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)⁽⁸⁾やSigFox⁽⁹⁾, Wi-SUN (Wireless Smart Utility Network)⁽¹⁰⁾, NB-IoT (Narrow-Band IoT)⁽¹¹⁾, IEEE 802.11ah (Halow)⁽¹²⁾などの規格・方式があり、その中のLoRaWANやWi-SUNなどの規格・方式は免許不要かつ自営無線構築可能であることが知られている。

我が国におけるSub-GHz帯 (920 MHz帯) を用いるLPWAN通信では、同周波数帯を利用する既存局への干渉を避けるために、空中線電力 (送信電力) や送信時間制限 (1パケット送信時間), 1時間あたりの送信時間総和 (Duty-Cycle), 使用チャネルによってはキャリアセンスが必須となり⁽¹³⁾, 他国とは異なるLPWANの特徴の一つである。我が国での同周波数帯では、送信チャネル帯域幅全体での受信電力の総和 (瞬時値) をキャリアセンスレベルとして定めており⁽¹³⁾, これを検出可能な信号検

成枝秀介 正員 九州工業大学大学院情報工学研究情報・通信工学研究系
E-mail narieda@csn.kyutech.ac.jp
Shusuke NARIEDA, Member (Dept. Computer Science and Electronics, School of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology, Iizuka, Fukuoka, 820-8502 Japan).
電子情報通信学会 基礎・境界サイエンス
Fundamentals Review Vol.19 No.2 pp.60-69 2025年10月
©電子情報通信学会 2025

表 1 ARIB STD-T108⁽¹³⁾で定められた無線パラメータ 空中線電力 20 mW 以下, 単位チャネル帯域幅 200 kHz

キャリアセンス時間	5 ms 以上	128 μ s 以上						
周波数帯域	920.5 ~ 923.5 MHz	922.3 ~ 928.1 MHz						
適用 CH 番号	24 ~ 38	33 ~ 61						
チャネル帯域幅	200 ~ 1000 kHz	200 kHz		400 kHz			600, 800, 1000 kHz	
同時使用 CH	1 ~ 5 ch	1 ch		2 ch			3 ~ 5 ch	
送信時間制限	4 s	200 ms を超え 400 ms 以下	6 ms を超え 200 ms 以下	6 ms 以下	3 ms を超え 200 ms 以下	3 ms 以下	2 ms を超え 100 ms 以下	2 ms 以下
休止時間	50 ms	送信時間の 10 倍 または 2 ms (別 CH 変更時)	2 ms	なし	2 ms	なし	2 ms	なし
一時間あたりの送信時間総和	なし	360 s 以下						

出力がピーク検出である。ピーク検出は一定期間内の最大電力値を元に信号の有無を判定する信号検出技術であり、簡易な計算でキャリアセンスを実行可能であるものの、信号検出結果が雑音の影響を大きく受けることから、キャリアセンスの精度を向上できない。この欠点を克服できる信号検出技術が電力検出 (Energy Detection) である⁽¹⁴⁾。電力検出は一定期間内の信号の電力値 (エネルギー値) を元に信号の有無を判定する信号検出技術であり、ピーク検出ほど雑音の影響を受けず、ピーク検出以上の信号検出精度をもつ。その結果、Sub-GHz 帯 LPWAN での高精度な干渉回避実現が期待できる。これまでに、LPWAN で電力検出に基づくキャリアセンス (電力検出キャリアセンス) を用いたときの特性解析例が幾つか報告されている⁽¹⁵⁾、⁽¹⁶⁾が、キャリアセンスレベルとキャリアセンス時間長の関係を考慮していない⁽¹⁵⁾、簡易モデルによる解析⁽¹⁶⁾などに留まっており、正確な性能解析・評価が行われていなかった。

このような背景の中、著者らはこれまでに電力検出キャリアセンスについて、Sub-GHz 帯 LPWAN での様々な理論的・実験的な性能解析・評価を行ってきた (例えば文献(17)~(23))。本稿では、これらのうち文献(17)、(18)に示した信号検出理論に基づく性能評価・解析結果などを中心に、Sub-GHz 帯 LPWAN での電力検出キャリアセンスの基本的な諸特性について解説する。

2. Sub-GHz 帯 LPWAN

2.1 Sub-GHz 帯 LPWAN の無線パラメータ

我が国における Sub-GHz 帯 LPWAN については、我が国での ISM (Industrial Scientific and Medical) 帯の一つである 920 MHz 帯が割り当てられており、ARIB STD-T108⁽¹³⁾にその詳細が記されている。免許不要である特定小電力無線局としての Sub-GHz 帯 LPWAN では、ARIB STD-T108⁽¹³⁾で空中線電力を 1 mW 以下または 20 mW 以下の二つに大別している。後者は前者と比べ 1 時間あたりの総送信時間などのパラメータ制限が緩和されているものの、5 ms または 128 μ s 以上のキャリアセンスが必要となる。更に、キャリアセンス時間 5 ms と 128 μ s の違いは、周波数帯域や送信時間制限、1 時間あたりの送信時間

総和などの無線パラメータの違いとなって現れる。この様子を表 1 に示す。表 1 では、空中線電力 20 mW 以下、単位チャネル帯域幅 200 kHz のときの、異なるキャリアセンス時間に対する無線パラメータについて示している。表 1 より、キャリアセンス時間 128 μ s と比較して、キャリアセンス時間 5 ms のときに多くの無線パラメータの制約が緩和されていることが分かる。

2.2 キャリアセンス

次に、Sub-GHz 帯 LPWAN でのキャリアセンスについて示す。自パケット送信前に他パケットを検出するための技術がキャリアセンスであり、検出可能な信号電力レベルを定めたものがキャリアセンスレベルである。ARIB STD-T108 では、Sub-GHz 帯でのキャリアセンスについて以下のように規定している (抜粋)。

- (1) 無線設備は新たな送信に先立ち、キャリアセンスによる干渉確認を実行した後、送信を開始すること。
- (2) キャリアセンスは、電波を発射する周波数が含まれる全ての単位チャネルに対して行い、128 μ s 以上行うものであること。
- (3) キャリアセンスレベルは、電波を発射しようとする周波数が含まれる全ての単位チャネルにおける受信電力の総和が給電線入力点において -80 dBm とし、これを超える場合、送信を行わないものであること。ただし、空中線電力が 20 mW の値を超えるものにあつては、その超えた分を -80 dBm から減じた値とする。

上の定義中「キャリアセンスレベル」は給電線入力点の瞬時値で規定されており、また「全ての単位チャネルにおける受信電力の総和」は、送信しようとする帯域幅全体の瞬時的な受信電力の測定値である。これらは、キャリアセンス時間内の最大電力値 (ピーク電力値) を検出することでキャリアセンスを実現できることを示している^(注1)。

(注1)：実環境での LPWAN 上で電力検出キャリアセンスを用いるときには、LPWA モジュールに既に実装されているピーク検出キャリアセンスと併用する必要があると考える。

3. ピーク検出と電力検出

3.1 エンドデバイスでの受信信号モデル

本章では、キャリアセンスの基盤技術となるピーク検出や電力検出 (Energy Detection) の諸特性について示す。初めにエンドデバイスでのキャリアセンスを想定した受信信号モデルを定義する。ここでは、キャリアセンスを用いた干渉パケット信号の検出を二値仮説検定として定義する。エンドデバイスでは、次式に示す複素干渉パケット信号 $w(n)$ をキャリアセンスによって検出しようとする。

$$w(n) = gs(n) \quad (1)$$

ただし g 及び $s(n)$ はそれぞれチャネルゲイン及び平均 0、分散 σ_s^2 である他エンドデバイスの複素送信パケット信号である。これらより $w(n)$ は平均 0、分散 $\sigma_w^2 = g^2\sigma_s^2$ となる。 \mathcal{H}_1 、 \mathcal{H}_0 をそれぞれ他エンドデバイスから干渉パケット信号が存在する/しない仮説とすると、分散 σ_r^2 である複素受信信号 $r(n)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_1 : r(n) &= w(n) + v(n) \\ \mathcal{H}_0 : r(n) &= v(n) \end{aligned} \quad (2)$$

ただし $v(n)$ は平均 0、分散 σ_v^2 の加法性白色ガウス雑音であり、 $s(n)$ と $v(n)$ は互いに独立であると仮定する。

3.2 ピーク検出キャリアセンスの特性

前章で示したように、我が国における 920 MHz 帯の標準規格である ARIB STD-T108⁽¹³⁾では、キャリアセンスレベルを給電線入力点の瞬時値で規定しており、これを実現できる技術がピーク検出に基づくキャリアセンス (ピーク検出キャリアセンス) である。キャリアセンス時間に相当するサンプル数を N_{PD} 、キャリアセンスレベルを ϵ_{PD} とすると、ピーク検出キャリアセンスでは次式のような比較を行い、判定結果を得る。

$$\max_{1 \leq n \leq N_{PD}} |r(n)|^2 \underset{\mathcal{H}_0}{\overset{\mathcal{H}_1}{\geq}} \epsilon_{PD} \quad (3)$$

ピーク検出は非常に簡易な信号検出法であるが、一方で加法性白色ガウス雑音の影響を受けやすい。図 1 及び 2 にピーク検出に基づくキャリアセンスによる信号検出確率特性及び誤警報確率特性をそれぞれ示す。図 1 及び 2 では、チャネル帯域幅 BW [Hz] が $BW = 200$ kHz である拡散率 7 の LoRa 信号を干渉パケット信号と仮定し、エンドデバイスの雑音指数 NF [dB] を $NF = 6$ dB としている。更に、ノイズフロア (雑音電力) を $\mathcal{P}_{N,dBm}$ [dBm] とすると、 $\mathcal{P}_{N,dBm}$ は次式で与えられる。

$$\mathcal{P}_{N,dBm} = -174 + 10 \log_{10}(BW) + NF \quad (4)$$

式 (4) に $BW = 200$ kHz、 $NF = 6$ dB をそれぞれ代入すると、 $\mathcal{P}_{N,dBm} \approx -115$ dBm を得る。図 1 を見ると、しきい値が低く

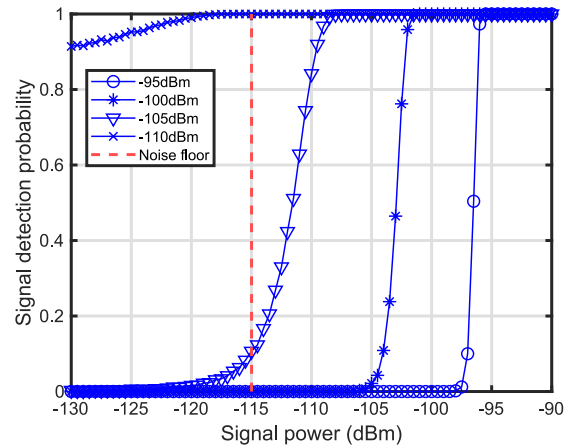


図 1 ピーク検出キャリアセンスの信号検出確率特性
しきい値 -95 dBm、 -100 dBm、 -105 dBm
及び -110 dBm。チャネル帯域幅 200 kHz の
LoRa 信号、雑音指数 6 dB

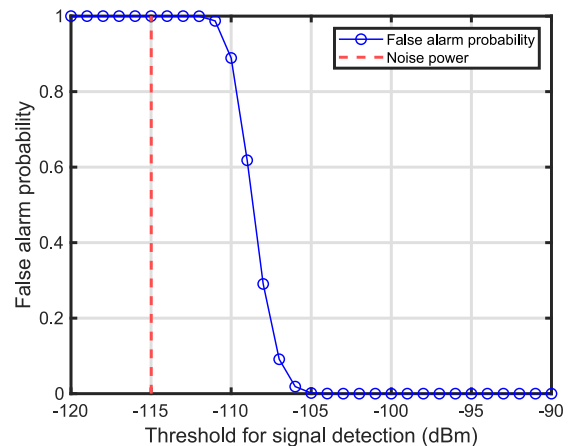


図 2 ピーク検出キャリアセンスの誤警報確率特性
チャネル帯域幅 200 kHz の LoRa 信号、雑音指
数 6 dB

なるにつれて信号検出確率特性がなだらかになるものの、しきい値以下のピーク電力値をもつ信号を検出できているように見える。しかしながら図 2 を見ると、 -108 dBm より低いしきい値のときには誤警報確率特性が大きく劣化していくことが分かる。ピーク検出キャリアセンスでは加法性白色ガウス雑音の影響を受けやすいことがその理由であり、この劣化がノイズフロアより約 9 dB 高いしきい値で生じ始めることが分かる。これらより、ピーク検出キャリアセンスではノイズフロアの影響を強く受けることから、低いキャリアセンスレベルを実現できないことが分かる。

3.3 電力検出とその特性

電力検出はある一定期間の電力値 (エネルギー値) を統計量として用いる信号検出技術であり、ピーク検出と比較してノイズフロアの影響を受けにくい検出方法であることが知られている⁽¹⁴⁾。電力検出での統計量 S_r は次式で与えられる。

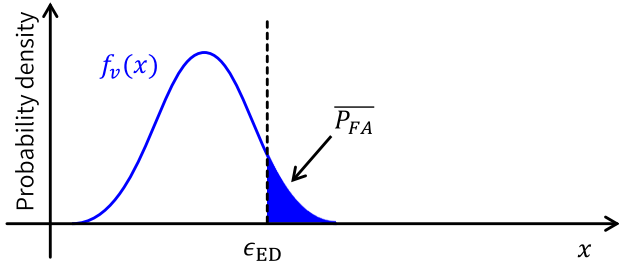


図3 電力検出での確率密度関数 $f_v(x)$ としきい値 ϵ_{ED} , 誤警報確率の設計値 $\overline{P_{FA}}$ の様子

$$S_r = \frac{1}{N_{ED}} \sum_{n=0}^{N_{ED}-1} |r(n)|^2 \quad (5)$$

ただし N_{ED} は電力検出における統計量計算に必要なサンプル数である。このとき S_r は平均 $\tilde{\mu}_r = \sigma_r^2$, 分散 $\tilde{\sigma}_r^2 = \sigma_r^4/N_{ED}$, 自由度 $2N_{ED}$ のカイ2乗分布に従う。 S_r としきい値 ϵ_{ED} を次式のように比較し, 判定結果を得る。

$$S_r \underset{\mathcal{H}_0}{\overset{\mathcal{H}_1}{\gtrless}} \epsilon_{ED} \quad (6)$$

次に, しきい値 ϵ_{ED} を導出する。 \mathcal{H}_0 のときの統計量を S_v とすると, S_v は次式で与えられる。

$$S_v = \frac{1}{N_{ED}} \sum_{n=0}^{N_{ED}-1} |v(n)|^2 \quad (7)$$

S_v も S_r と同様, 平均 σ_v^2 , 分散 σ_v^4/N_{ED} , 自由度 $2N_{ED}$ のカイ2乗分布に従う。 N_{ED} が十分に大きく中心極限定理⁽²⁴⁾が成り立つとき, S_v の確率密度関数 $f_v(x)$ は次式のように平均 σ_v^2 , 分散 σ_v^4/N_{ED} の正規分布に近似できる。

$$f_v(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_v^4/N_{ED}}} \exp\left\{-\frac{(x-\sigma_v^2)^2}{2\sigma_v^4/N_{ED}}\right\} \quad (8)$$

これを用いると, 誤警報確率の設計値 $\overline{P_{FA}}$ は次式のように $f_v(x)$ を ϵ_{ED} から ∞ まで積分することで得られる (図3)。

$$\begin{aligned} \overline{P_{FA}} &= \int_{\epsilon_{ED}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_v^4/N_{ED}}} \exp\left\{-\frac{(x-\sigma_v^2)^2}{2\sigma_v^4/N_{ED}}\right\} dx \\ &= Q\left(\left(\frac{\epsilon_{ED}}{\sigma_v^2} - 1\right) \sqrt{N_{ED}}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

ただし $Q(\mathcal{X}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{\mathcal{X}}^{\infty} e^{-t^2/2} dt$ ⁽²⁵⁾ である。 $Q^{-1}(\cdot)$ を $Q(\mathcal{X})$ の逆関数とすると, しきい値 ϵ_{ED} を次式のように得る。

$$\epsilon_{ED} = \sigma_v^2 \left\{ \frac{Q^{-1}(\overline{P_{FA}})}{\sqrt{N_{ED}}} + 1 \right\} \quad (10)$$

次に, 得られたしきい値 ϵ_{ED} を用いて, 信号検出確率 P_D を導出する。 S_v の確率密度関数と同様, 十分に大きい N_{ED} によって中心極限定理が成り立つと仮定すると, S_r の確率密度関数 $f_r(x)$ は次式で与えられる。

$$f_r(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_r^4/N_{ED}}} \exp\left\{-\frac{(x-\sigma_r^2)^2}{2\sigma_r^4/N_{ED}}\right\} \quad (11)$$

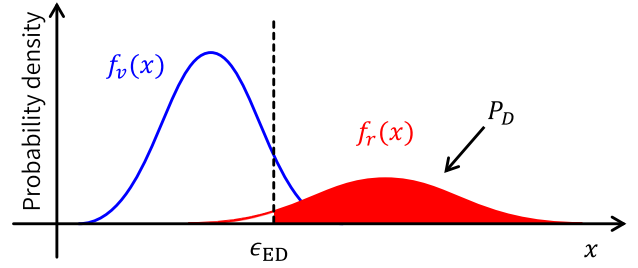


図4 電力検出での確率密度関数 $f_v(x)$ と $f_r(x)$, しきい値 ϵ_{ED} , 信号検出確率 P_D の様子

信号検出確率 P_D は $f_r(x)$ を ϵ_{ED} から ∞ まで積分することで得られる (図4)。

$$\begin{aligned} P_D &= \int_{\epsilon_{ED}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_r^4/N_{ED}}} \exp\left\{-\frac{(x-\sigma_r^2)^2}{2\sigma_r^4/N_{ED}}\right\} dx \\ &= Q\left(\left(\frac{\epsilon_{ED}}{\sigma_r^2} - 1\right) \sqrt{N_{ED}}\right) \\ &= Q\left[\frac{1}{1+\gamma} \left\{Q^{-1}(\overline{P_{FA}}) - \gamma\sqrt{N_{ED}}\right\}\right] \end{aligned} \quad (12)$$

ただし $\gamma = \sigma_w^2/\sigma_v^2$ である。また式 (12) 中 P_D を許容可能な検出確率の最小値 $\overline{P_D}$ に置き換え, 変形すると次式を得る。

$$N = \frac{1}{\gamma^2} \left\{Q^{-1}(\overline{P_{FA}}) - (1+\gamma)Q^{-1}(\overline{P_D})\right\}^2 \quad (13)$$

4. 電力検出キャリアセンス

4.1 緒言

本章では, 電力検出キャリアセンスの基本的な特性について示す。前章で示した電力検出を含む信号検出問題では, 全信号検出期間を干渉パケット信号が占有している/占有していない, を仮定した二値仮説検定の下, 様々な特性が導出されていた。このことは, 干渉パケット信号長 T_{TOA} [s] を $T_{TOA} \approx \infty$ と仮定した上での導出といえ, また T_{TOA} とキャリアセンス時間長 T_{CS} [s] の比を $T_{TOA}/T_{CS} \approx \infty$ と仮定した上での導出, とい換えることもできる。しかしながらキャリアセンスでは, 到来時刻が不明である有限長の干渉パケットを検出しなければならず, $T_{TOA} \approx \infty$, すなわち $T_{TOA}/T_{CS} \approx \infty$ との仮定が成り立たない。そのため, 電力検出キャリアセンスの信号検出確率は前章に示した電力検出のそれとは異なる。

加えて, 電力検出の特性がキャリアセンスに与える影響についても考慮しなければならない。電力検出を用いることでノイズフロア以下の電力をもつ干渉パケット信号を検出可能なキャリアセンス精度を実現できるが, 精度を上げるためにはキャリアセンス時間を長くとらなければならない。図5にキャリアセンスレベルとこれを実現するために必要なキャリアセンス時間の関係を示す。図5より, キャリアセンスレベル -120 dBm, -125 dBm, -130 dBm であるときのキャリアセンス時間はそれぞれ約 1 ms, 10 ms, 100 ms であり, キャリアセンスレベルが 5 dB 低下するとキャリアセンス時間が 10 倍延びていることが分かる。また

$T_{\text{TOA}}/T_{\text{CS}}$ が電力検出キャリアセンスに与える影響について示す。 $\mathcal{P}_{\text{CS,mW}}$ [mW] と $\mathcal{P}_{\text{N,mW}}$ [mW] をそれぞれキャリアセンスレベルと雑音電力とし、かつ $\mathcal{P}_{\text{N,mW}} = 10^{\mathcal{P}_{\text{N,dBm}}/10} \times 1\text{mW}$ とする。式 (13) について、S/N 比である γ をキャリアセンスレベル $\mathcal{P}_{\text{CS,mW}}$ と雑音電力 $\mathcal{P}_{\text{N,mW}}$ の比に置き換え、さらにキャリアセンスに必要なサンプル数をキャリアセンス時間 T_{CS} に置き換えると次式を得る。

$$T_{\text{CS}} = \frac{1}{2BW} \left(\frac{\mathcal{P}_{\text{N,mW}}}{\mathcal{P}_{\text{CS,mW}}} \right)^2 \cdot \left\{ Q^{-1}(\overline{P_{\text{FA}}}) - \left(1 + \frac{\mathcal{P}_{\text{CS,mW}}}{\mathcal{P}_{\text{N,mW}}} \right) Q^{-1}(\overline{P_{\text{D}}}) \right\}^2 \quad (14)$$

式 (14) について、キャリアセンスレベルを変化させたときの、異なる T_{TOA} に対する $T_{\text{TOA}}/T_{\text{CS}}$ を描いたものを図 6 に示す。図 6 より、 $T_{\text{TOA}} = 61.7\text{ms}$, 370.7ms , 1318.9ms の特性に対してキャリアセンスレベルがそれぞれ -124dBm , -128dBm , -131dBm を下回ると $T_{\text{TOA}}/T_{\text{CS}}$ が 10 を下回っていることが分かる。これらより、Sub-GHz 帯 LPWAN での実際のキャリアセンスにおいては、 $T_{\text{TOA}} \approx \infty$, すなわち $T_{\text{TOA}}/T_{\text{CS}} \approx \infty$ との仮定が成り立たないことが分かる。本章では、電力検出キャ

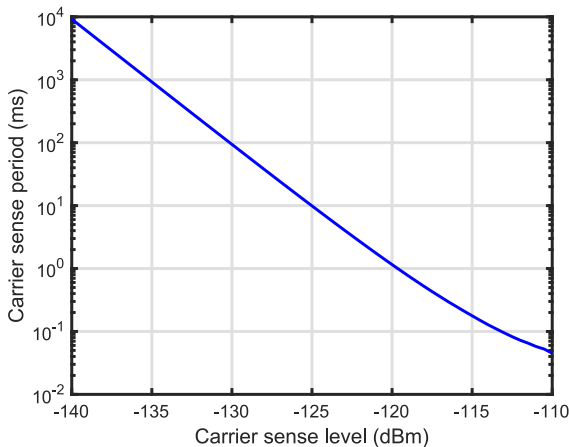


図 5 キャリアセンスレベルとキャリアセンス時間の関係 $\overline{P_{\text{D}}} = 0.99$, $\overline{P_{\text{FA}}} = 10^{-4}$, $NF = 6\text{dB}$, $BW = 200\text{kHz}$, LoRa 信号の拡散率 7

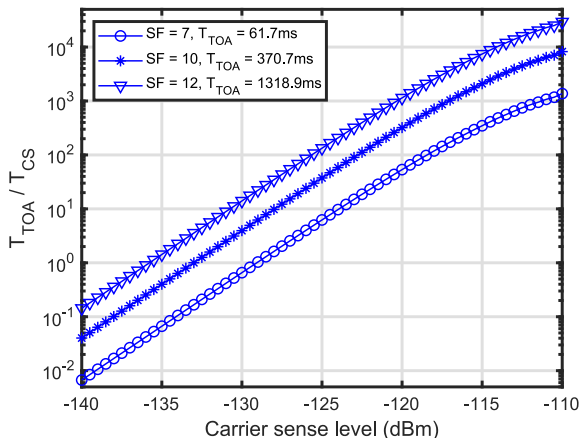


図 6 キャリアセンスレベルと $T_{\text{TOA}}/T_{\text{CS}}$ の関係

リアセンスの特性並びに Sub-GHz 帯 LPWAN での電力検出キャリアセンスの諸特性について示す。また導出過程などについては本論文では割愛しているため、詳細は文献 (17) を参照されたし。

4.2 電力検出キャリアセンスとその特性

N_{TOA} と N_{CS} をそれぞれ干渉パケット信号のサンプル数 ($N_{\text{TOA}} = T_{\text{TOA}} \cdot 2BW$), キャリアセンスに要するサンプル数 ($N_{\text{CS}} = T_{\text{CS}} \cdot 2BW$) とし、他エンドデバイスからのパケットの到来時刻が不明であるとき、電力検出キャリアセンスでの信号検出確率 P_{CS} は次式で与えられる。

$$P_{\text{CS}} = \frac{1}{N_{\text{TOA}} + N_{\text{CS}}} \left[2 \sum_{n=1}^{\min(N_{\text{TOA}}, N_{\text{CS}})} P_{\text{D,A}}(n) + (|N_{\text{TOA}} + N_{\text{CS}}| + 1) P_{\text{D,A}}(n) \min(N_{\text{TOA}}, N_{\text{CS}}) \right] \quad (15)$$

ただし $\min(X, Y)$ は X と Y の最小値を返す関数である。また $P_{\text{D,A}}(n)$ は長さ n のパケットに対する信号検出確率であり、 $P_{\text{D,A}}(N_{\text{TOA}})$ は次式で与えられる。

$$P_{\text{D,A}}(N_{\text{TOA}}) = Q \left\{ \left(\frac{\mathcal{P}_{\text{CS,mW}}}{\mathcal{P}_{\text{N,mW}} + \min\left(1, \frac{N_{\text{TOA}}}{N_{\text{CS}}}\right) \mathcal{P}_{\text{RX,mW}}} - 1 \right) \sqrt{N_{\text{CS}}} \right\} \quad (16)$$

ただし $\mathcal{P}_{\text{RX,mW}}$ [mW] は干渉パケット信号電力であり、前章の σ_w^2 を置き換えたものであることに注意されたし。図 7 にキャリアセンスレベルを変化させたときの、異なる $T_{\text{TOA}}/T_{\text{CS}}$ に対する信号検出確率特性を示す。図 7 では、 $T_{\text{CS}} = 10.24\text{ms}$, $\overline{P_{\text{D}}} = 0.99$, $\overline{P_{\text{FA}}} = 10^{-4}$, $NF = 6\text{dB}$, $BW = 200\text{kHz}$ としたときの $T_{\text{TOA}}/T_{\text{CS}} = 16, 4, 1, 0.25$ に対する信号検出確率特性の数値実験値と理論値 (式 (15)), 電力検出の理論式 (式

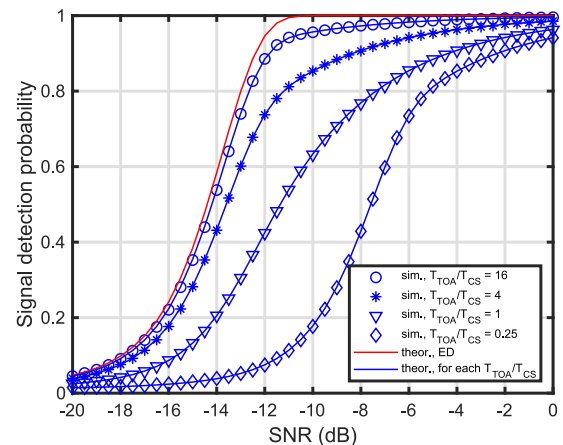


図 7 $T_{\text{TOA}}/T_{\text{CS}}$ を変化させたときの信号検出確率特性 $T_{\text{CS}} = 10.24\text{ms}$, $\overline{P_{\text{D}}} = 0.99$, $\overline{P_{\text{FA}}} = 10^{-4}$, $NF = 6\text{dB}$, $BW = 200\text{kHz}$

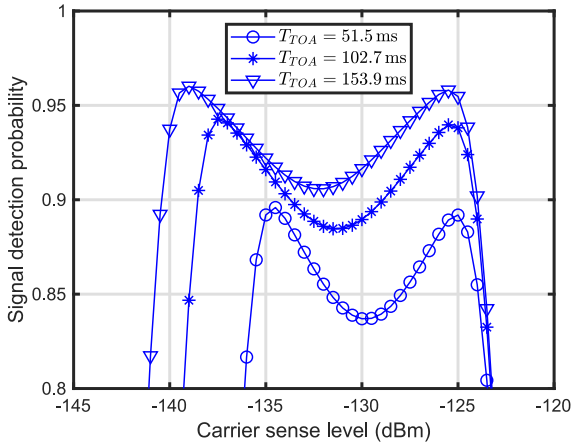


図8 キャリアセンスレベルに対する信号検出確率特性
 $\overline{P_D} = 0.99$, $\overline{P_{FA}} = 0.01$, $BW = 200$ kHz,
 $NF = 6$ dB, $T_{TOA} = 51.5$ ms, 102.7 ms,
 153.9 ms 及び $\mathcal{P}_{RX,dBm} = -125$ dBm

(12) 中 $\gamma = \sigma_w^2 / \sigma_v^2$ において σ_w^2 と σ_v^2 をそれぞれ $\mathcal{P}_{CS,mW}$ と $\mathcal{P}_{N,mW}$ に置き換えた式より得られた値を示している。図7より、 $T_{TOA}/T_{CS} = 16$ のときの特性は電力検出の理論値とおおむね近いものの、 T_{TOA}/T_{CS} が小さくなるにつれて電力検出の理論値と比べて特性も劣化することが分かる。

図8にキャリアセンスレベルを変化させたときの信号検出確率特性を示す。図8では、 $\overline{P_D} = 0.99$, $\overline{P_{FA}} = 0.01$, $BW = 200$ kHz, $NF = 6$ dB, $T_{TOA} = 51.5$ ms, 102.7 ms, 153.9 ms 及び $\mathcal{P}_{RX,dBm} = -125$ dBm としたときの式(15)を示している。図8より、 T_{TOA} が短くなるにつれて特性が劣化していることが分かる。これは、干渉パケットの短さのために信号検出期間を占有しにくくなるのが理由である。特性そのものについては文献を参照されたし。また T_{TOA} が短くなるにつれて有効なキャリアセンスレベルの範囲が狭くなっていることも分かる。このことは、低すぎるキャリアセンスレベルのためキャリアセンスが短い干渉パケットを捕捉できないことを示している。

5. 電力検出キャリアセンスを用いた LPWAN

5.1 LPWAN モデル

本章では、前節に示した電力検出キャリアセンスを用いた Sub-GHz 帯 LPWAN の諸特性を示す。評価のためのモデルとして、複数エンドデバイスと一つのゲートウェイで構成され、円形の通信エリアをもつ LPWAN を想定する。エンドデバイスではパケット送信直前にキャリアセンスを行い、平均 T_{TX} [s] 間隔でパケットを送信する。ゲートウェイでは受信確認の ACK パケットをエンドデバイスに返さない。またゲートウェイでの受信電力は、エンドデバイスからの送信電力から伝搬損失分のみ減衰するシンプルなチャンネルモデルを想定する。ゲートウェイ・エンドデバイス間の伝搬損失 L [dB] は次式で与えられる。

$$L = 10 \log_{10} (d^{\alpha_{GE}} f_c^2 \times 10^{-2.8}) \quad (17)$$

表2 実験諸元

パラメータ名称	変数	数値
エンドデバイス分布	-	一様分布
エンドデバイス数	-	200
通信エリア半径	-	1500 m
path loss exponent (GW・ED 間)	α_{GE}	2.7 ⁽²⁶⁾
path loss exponent (ED 間)	α_{EE}	3.3 ⁽²⁶⁾
送信電力	-	13 dBm
平均パケット送信間隔 (Poisson 分布)	T_{TX}	450 sec
搬送波周波数	f_c	920 MHz
チャンネル帯域幅	BW	200 kHz
使用チャンネル数	-	1
拡散率	-	7
ペイロード長	-	6 byte
パケット送信時間	T_{TOA}	61.7 ms
受信感度	-	-123 dBm
最大送信試行回数	-	3 回
許容可能な信号検出確率	$\overline{P_D}$	0.99
誤警報確率の設計値	$\overline{P_{FA}}$	10^{-4}
エンドデバイスの雑音指数	NF	6 dB

ただし d [m], α_{GE} 及び f_c [MHz] はそれぞれ距離、ゲートウェイ・エンドデバイス間の path loss exponent 及び搬送波周波数である。また、エンドデバイス間の伝搬損失 Φ は次式で与えられる。

$$\Phi = 10 \log_{10} (d^{\alpha_{EE}} f_c^2 \times 10^{-2.8}) \quad (18)$$

ただし α_{EE} はエンドデバイス間の path loss exponent である。

このような LPWAN モデルを用いて、表2に示す実験諸元により数値実験を行った。数値実験では、200個のエンドデバイスが一様分布の確率密度関数に従って半径1500mの通信エリア内に配置される。エンドデバイス・ゲートウェイ間、エンドデバイス同士の path loss exponent はそれぞれ $\alpha_{GE} = 2.7$, $\alpha_{EE} = 3.3$ としている⁽²⁶⁾。エンドデバイスは送信電力13dBm、平均パケット送信間隔 (Poisson 分布) 450 ms、搬送波周波数920 MHz、チャンネル帯域幅200 kHz、拡散率7、パケット長 $T_{TOA} = 61.7$ ms、受信感度 -123 dBm の LoRa 信号によってパケットを送信する。またエンドデバイスでの最大送信試行回数は3回、許容可能な信号検出確率を $\overline{P_D} = 0.99$ 、誤警報確率の設計値を $\overline{P_{FA}} = 10^{-4}$ 及びエンドデバイスでの雑音指数を $NF = 6$ dB とした。

5.2 数値実験による検証結果

図9にキャリアセンスレベルに対するパケット到着率特性を示す。図9では、1) 電力検出キャリアセンスを用いたときの特性、2) キャリアセンスレベルにかかわらず $T_{CS} = 128 \mu s$ としたときの特性、3) キャリアセンスを用いないときの特性、の三つを比較している。2) は比較検証のために作り出したほぼ理想的な状態であることに注意されたし。図9より、1) の特性について、キャリアセンスレベルが低くなるにつれて特性が良好になることが分かる。しかしながら、-128 dBm を下回ると特性が劣化している。キャリアセンスレベルが低くなるにつれて2) の特性は良好になることから、前節で示したキャリアセンス期

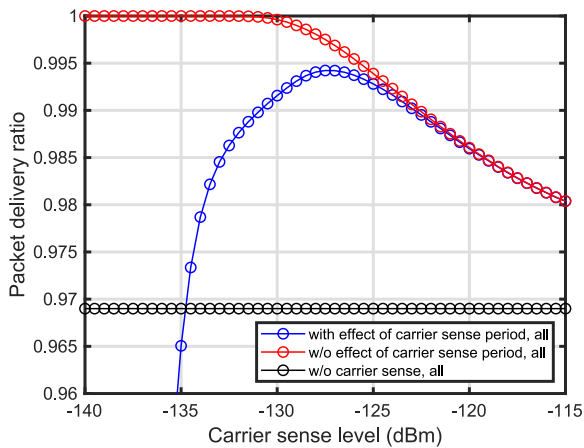


図9 キャリアセンスレベルに対するパケット到着率特性

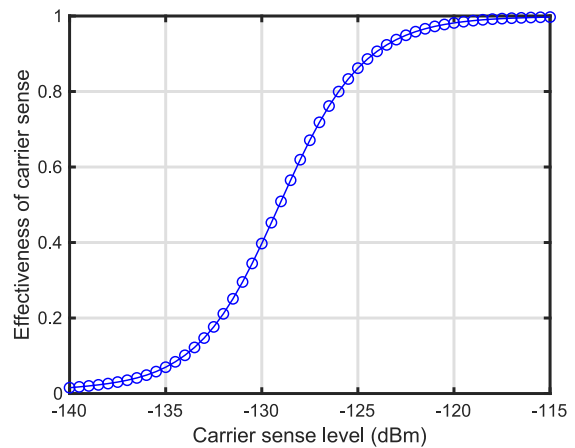


図11 キャリアセンスレベルに対するキャリアセンス効果特性

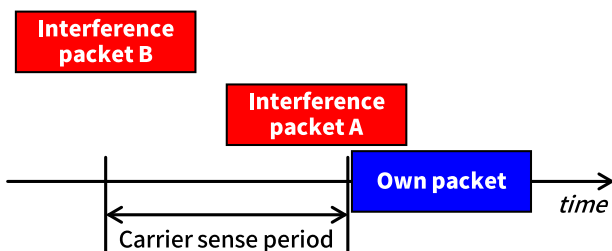


図10 実際には衝突しない干渉パケット例。パケットAとBともにキャリアセンス時間内の干渉パケット。パケットAは自パケットと衝突するが、パケットBは自パケットと衝突しない

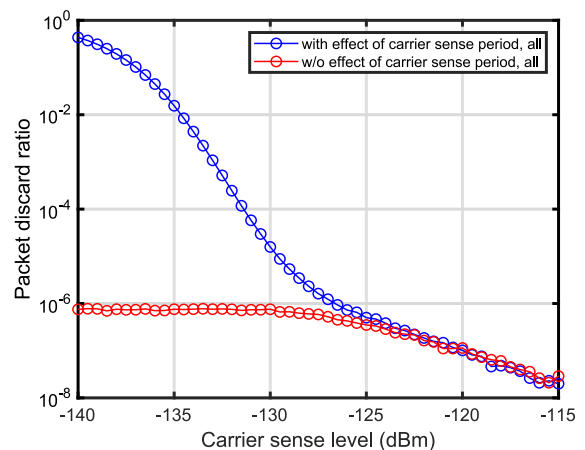


図12 キャリアセンスレベルに対するパケット廃棄率特性

間と干渉パケット長の関係により特性が劣化していることが分かる。

これに加えて、ほかの劣化要因、例えば実際には衝突しない干渉パケットの検出がLPWAN特性に与える影響について検証する。図10に実際には衝突しない干渉パケット例を示す。図10では、自パケット送信において、二つの干渉パケットAとBが到来している様子を示している。このとき、干渉パケットAは自パケット送信時に衝突するため検出しなければならない干渉パケットとなるが、干渉パケットBは実際には衝突しないため検出でならない干渉パケットとなる。しかしながら、二つの干渉パケットの一部がキャリアセンス時間内に含まれていることから、それぞれの電力値によっては干渉パケットA、または干渉パケットBのみ検出されてしまうかもしれない。ここでは、これらがLPWAN特性に与える影響を検証する。

図11にキャリアセンスレベルに対するキャリアセンス効果特性を示す。図11は、実際に衝突する干渉パケット（例えば図10中干渉パケットAのみ）を検出したときを1（キャリアセンス効果が高い）、実際には衝突しない干渉パケット（例えば図10中干渉パケットBのみ）を検出したとき0（キャリアセンス効果が低い）とし、各キャリアセンスレベルでの全エンドデバイスでの平均値を数値実験により求めたものである。図11より、キャリアセンスレベルが高いときにはキャリアセンス効果が高いが、キャリアセンスレベルが低くなるにつれてキャリアセンス効果が低くなることが分かる。このことは、（例えば）近隣エン

ドデバイスからの高い電力値の干渉パケットなどによって、実際には衝突しない干渉パケットについても検出してしまうことを示している。これが与える影響を図12に示す。図12では、キャリアセンスレベルに対する最大送信試行回数を超えたときに廃棄されるパケットが生じる確率を示している。図12より、キャリアセンスレベルが約-127 dBmを下回ると、パケット廃棄率が増加することが分かる。これらより、ネットワーク内パケット長に合わせたキャリアセンスレベル設計が必要になることが分かる。

6. 信号検出パラメータが与える影響

6.1 緒言

電力検出の特性を決定付ける重要なパラメータの一つに、誤警報確率の設計値 $\overline{P_{FA}}$ や許容可能な信号検出確率 $\overline{P_D}$ といった信号検出パラメータが挙げられる。誤警報確率とは干渉信号が存在しないにもかかわらず存在する (\mathcal{H}_1) と判定してしまう確率であり、加法性白色ガウス雑音の存在により $1 > \overline{P_{FA}} > 0$ となる。図13と14に信号検出における誤警報確率と信号検出確

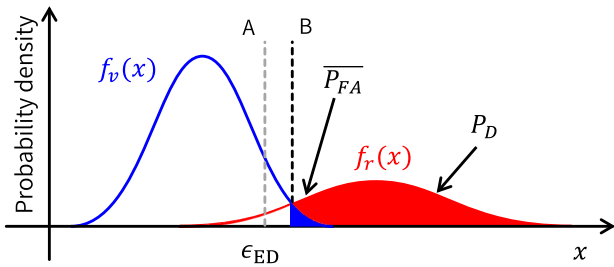


図 13 誤警報率の設計値 $\overline{P_{FA}}$ を小さくとしたときの、信号検出における誤警報率と信号検出確率の関係

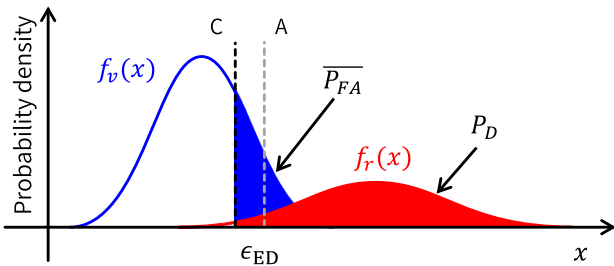


図 14 誤警報率の設計値 $\overline{P_{FA}}$ を大きくとしたときの、信号検出における誤警報率と信号検出確率の関係

率の関係を示す。信号検出においては、一般的には $\overline{P_{FA}}$ を小さくするとしきい値が大きくなり（図 13 中しきい値 A がしきい値 B に移動）、その結果信号検出精度が劣化する。一方、 $\overline{P_{FA}}$ を大きくするとしきい値が小さくなり（図 14 中しきい値 A がしきい値 C に移動）、その結果信号検出精度が向上する。本章では、これら信号検出パラメータが電力検出キャリアセンスを用いた Sub-GHz 帯 LPWAN に与える影響を数値実験による検証結果を用いて示す。

6.2 数値実験による検証結果

本節で示す数値実験結果では、誤警報率の設計値 $\overline{P_{FA}}$ が LPWAN 特性に与える影響について検証する。具体的には、干渉パケットが到来しないときに、1) 誤警報率により存在する (\mathcal{H}_1) と判定され得るケース、2) 誤警報率にかかわらず確実に存在しないと判定されるケース、の双方の特性の違いを数値実験によって検証する。2) については比較検証のための誤警報率の影響を排除した理想状態であることに注意されたし。また本節での数値実験には、基本的には前章で示した表 2 を実験諸元として用いるが、結果を分かりやすく示すために平均パケット送信間隔を $T_{TX} = 180\text{s}$ とした。

初めに、誤警報率の設計値を変化させたときのパケット到着率特性について、異なる許容可能な信号検出確率を $\overline{P_D} = 0.9, 0.99, 0.999$ に対する特性を図 15 に示す。図 15 では、先に示した 1) と 2) 双方のケースでのパケット到着率を検証しており、1) については同図中 “with effect of $\overline{P_{FA}}$ ”, 2) については同図中 “w/o effect of $\overline{P_{FA}}$ ” と示した特性が該当する。図 15 より、1) と 2) 双方の特性ともに誤警報率の設計値が高くなるにつれ

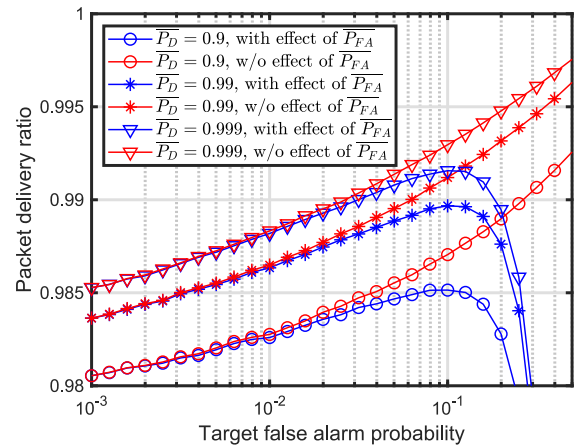


図 15 誤警報率の設計値に対するパケット到着率特性

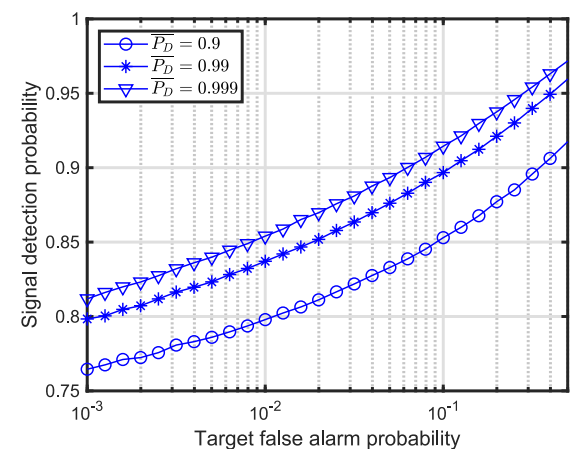


図 16 誤警報率の設計値に対する実際の信号検出確率特性

てパケット到着率が良好になることが分かる。このことは、誤警報率の設計値が高くなるにつれて信号検出精度が向上することに起因する。しかしながら 1) の特性については、誤警報率の設計値が約 10^{-1} を超えるとパケット到着率が急激に劣化する一方、2) の特性ではパケット到着率が劣化していない。これらより、干渉パケット未到来時においても高い誤警報率によってエンドデバイスが干渉パケット到来と判断してしまい、その結果自パケットを送信できず 1) でのパケット到着率が劣化していることが分かる。

次に、図 15 で示した結果について、別の角度から検証してみる。図 16 に誤警報率の設計値を変化させたときの干渉パケット到来時の信号検出確率特性を示す。図 16 においても図 15 と同様、許容可能な信号検出確率が $\overline{P_D} = 0.9, 0.99, 0.999$ であるときの結果を示している。図 16 より、誤警報率の設計値が高くなるにつれて、干渉パケット到来時の信号検出確率特性が良好になることが分かる。これより、信号検出確率特性が良好であるにもかかわらず、先に示した干渉パケット未到来時の高い誤警報率の影響により図 15 の特性が劣化していることが分かる。また図 17 に誤警報率の設計値に対する平均送信試行回数特性を示す。図 17 より、2) の特性は誤警報率の設計値によらず一定であるものの、1) の特性は誤警報率の設計値が高

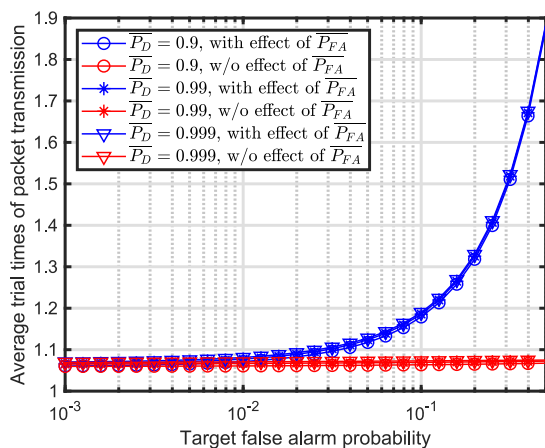


図 17 誤警報率の設計値に対する平均送信試行回数特性

くなるにつれて平均送信試行回数が増加している。これについても干渉パケット未到来時の高い誤警報率の影響によるものと考えられる。

これらより、電力検出キャリアセンスでの誤警報率の設計値は何らかの最適値をもち、無線パラメータに応じた設計が必要であることが分かる（本章で示した数値実験での無線パラメータでは $\overline{P_{FA}} \approx 0.1$ ）。

7. おわりに

著者らはこれまでに、Sub-GHz 帯 LPWAN での高精度な干渉回避実現のために、信号検出精度の高い電力検出（Energy Detection）を用いたキャリアセンスについて、理論的かつ実験的な側面から性能評価・解析を行ってきた。本稿では、特に理論的な側面での性能評価・解析から得られた電力検出キャリアセンスの特性やこれを用いた Sub-GHz 帯 LPWAN の特性、誤警報率などの信号検出パラメータが電力検出キャリアセンスに与える影響について解説した。今後は、電力検出キャリアセンスの応用例、例えば干渉パケット・定期的な電波雑音の識別技術やチャンネル選択技術などの検討を進める予定である。

文 献

- (1) J. Botero-valencia, L. Castano-Londono, D. Marquez-Viloria, and M. Rico-Garcia, "Data reduction in a low-cost environmental monitoring system based on LoRa for WSN," *IEEE Internet Things J.*, vol.6, no.2, pp.3024–3030, 2019.
- (2) Q.H. Lai and C.S. Lai, "Healthcare with wireless communication and smart meters," *IEEE Consum. Electron. Mag.*, vol.12, no.4, pp.53–62, 2023.
- (3) J. Lloret, J. Tomas, A. Canovas, and L. Parra, "An integrated IoT architecture for smart metering," *IEEE Commun. Mag.*, vol.54, no.12, pp.50–57, 2016.
- (4) M. Shahid, A. Ahmed, P. Zhibo, R. Ammar, T.K. Fung, and R. Jonathan, "Massive Internet of Things for industrial applications: Addressing wireless IoT connectivity challenges and ecosystem fragmentation," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol.11, pp.28–33, Jan. 2017.
- (5) R. Mattia, F. Paolo, F. Alessandra, and S. Emiliano, "Evaluation of the IoT LoRaWAN solution for distributed measurement applications," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol.66, pp.3340–3349, Dec. 2017.
- (6) I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol.40, no.8, pp.102–114, 2002.
- (7) U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low power wide area networks: An overview," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol.19, no.2, pp.855–873, Secondquarter 2017.
- (8) <https://lora-alliance.org/>.
- (9) <https://www.sigfox.com/en>.
- (10) P. Beecher, "Comparing IoT networks at a glance," Wi-SUN Alliance, White Paper, Dec. 2017. Accessed: May 28, 2021.
- (11) Y.P.E. Wang, X. Lin, A. Adhikary, A. Grovlen, Y. Sui, Y. Blankenship, J. Bergman, and H.S. Razaghi, "A primer on 3GPP narrowband Internet of Things," *IEEE Commun. Mag.*, vol.55, no.3, pp.117–123, March 2017.
- (12) "IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks–Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 2: Sub 1 GHz License Exempt Operation," *IEEE P802.11ah/D5.0*, March 2015 (Amendment to IEEE Std 802.11REVmc/D4.0), pp.1–632, 2015.
- (13) ARIB STD-T108, v. 1.2, Jan. 2018.
- (14) H. Urkowitz, "Energy detection of unknown deterministic signals," *Proc. IEEE*, vol.55, no.4, pp.523–531, 1967.
- (15) J. Ortín, M. Cesana, and A. Redondi, "Augmenting LoRaWAN performance with listen before talk," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.18, no.6, pp.3113–3128, 2019.
- (16) S. Narieda, T. Fujii, and K. Umebayashi, "Effect of LBT time on LoRa network performance: Signal detection theorem based analyses," 2019 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), pp.1–2, 2019.
- (17) S. Narieda and T. Fujii, "Energy detection based carrier sense in LPWAN," *IEEE Access*, vol.11, pp.79105–79119, 2023.
- (18) S. Narieda and T. Fujii, "On signal detection parameters for energy detection based carrier sense in LPWANs," *IEICE Commun. Express*, vol.13, no.6, pp.218–221, 2024.
- (19) S. Narieda and T. Fujii, "Analyses of hidden and exposed nodes in LPWAN with energy detection based carrier sense," 2024 IEEE 21st Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), pp.159–164, 2024.
- (20) S. Narieda and T. Fujii, "On execution at end devices for energy detection based carrier sense in LPWAN," 2024 IEEE 21st Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), pp.807–810, 2024.
- (21) S. Narieda and T. Fujii, "Characteristics of energy detection for carrier sense implemented on LPWA modules," *IEEE Sensors J.*, vol.24, no.23, pp.39779–39788, 2024.
- (22) S. Narieda and T. Fujii, "Self-tuning of signal detection level for energy detection based carrier sense in LPWANs," *Sensors*, vol.24, no.11, pp.3368–3387, 2024.
- (23) S. Narieda and T. Fujii, "Characteristics of LoRaWAN with energy detection based carrier sense," 2024 International Conference on Information Networking (ICOIN), pp.458–462, 2024.
- (24) A. Papoulis, *Probability, Random Variables and*

- Stochastic Processes, 4th ed., McGraw-Hill, 2002.
- (25) J.G. Proakis, Digital Communications, 4th ed., McGraw-Hill, 2001.
- (26) 土屋正昌, 三上満, 黒野正裕, “スマートメータ用無線通信回線における電波伝搬特性の測定と伝搬モデルの検討—住宅・市街・郊外地域における電波伝搬特性の測定・評価—,” 電中研報告, R11031, June 2012.

(SIS 研究会提案, 2025 年 6 月 16 日受付,
2025 年 7 月 2 日再受付)



成枝 秀介 (正員)

1999 琉球大学工学部電気電子工学科卒, 2001 同大学院理工学研究科博士前期課程電気電子工学専攻修了, 2006 大阪府立大学大学院工学研究科博士後期課程電気・情報系専攻修了, 博士 (工学). 2001 株式会社情報工房システム技術本部シミュレーションシステム部, 2006 矢崎総業株式会社矢崎技術研究所基盤技術研究グループ, 2009 明石工業高等専門学校電気情報工学科講師, 2012 同准教授, 2018 三重大学大学院工学研究科情報工学専攻准教授. 現在, 九州工業大学大学院情報工学研究院情報・通信工学研究系教授. 信号検出理論とその応用, 無線信号処理, IoT ネットワーク, 無線センサネットワークなどの研究に従事.

画像伝送におけるセマンティック通信

Semantic Communication for Image Transmission

須藤克弥 Katsuya SUTO

アブストラクト 情報をもつ意味の伝達に焦点を当てるセマンティック通信は、情報理論に基づく通信方式とは異なる新たな通信パラダイムとして注目されている。近年の人工知能技術、特に深層学習や知識表現の進展により、タスクに必要な意味のみを抽出・符号化・伝送することが可能となり、通信の効率化・低遅延化・知的なインタラクションの実現が期待されている。本稿の前半では、セマンティック通信の理論的背景、深層学習に基づく実装例、ユースケースを紹介する。本稿の後半では、画像伝送におけるセマンティック通信にとって必要な機能やその実装例を紹介する。特に、セマンティック画像伝送の実現に有効なアプローチである情報源通信路深層結合符号を概説する。

キーワード セマンティック通信、セマンティック画像伝送、深層学習、情報源通信路深層結合符号

Abstract Semantic communication, which focuses on conveying the meaning of information, has garnered significant attention as a novel communication paradigm. Recent advancements in artificial intelligence, particularly in deep learning and knowledge representation, have enabled effective methods for extracting, encoding, and transmitting the semantics relevant to a given task. These developments promise enhanced communication efficiency, reduced latency, and more intelligent interactions. The first part discusses the underlying theory, representative deep-learning-based approaches, and key application scenarios. In the latter part we focus specifically on semantic communication for image transmission, outlining the necessary functional components and corresponding implementation examples. In particular, we demonstrate that deep joint sourcechannel coding (DJSCC) offers an effective and promising approach for enabling semantic image transmission.

Key words Semantic communication, Semantic image transmission, Deep learning, Deep joint sourcechannel coding

1. はじめに

1948年にShannonによって定式化された情報理論は、データの最小単位であるビットをいかにして正確かつ高速に伝送するかを主たる課題とし、通信路容量の数学的限界を提示した⁽¹⁾。以来、この限界に迫るための誤り訂正符号や変調方式に関する数多くの研究が活発になされ、現代のデジタル通信技術の基盤が確立されている。しかしながら、情報量の爆発的な増加とAI技術の急速な発展に伴い、これまでの通信技術の限界が顕在化している。Shannonの情報理論は、「送信者は常に受信者にとって何が重要かを知っており、受信者は常に送信者からのデータに関心をもち、それを受け取る準備ができています」という前提の下で設計されているが、実際には伝送されたデータが受信者にとって意味をもたないことや特定のタスクにとって有用でないことが発生する。このセマンティックな側面を考慮すること

で、これまでにはない高効率な通信技術が実現できるものと期待されている。

Weaverは通信が抱える三つのレベルの問題を提唱した⁽²⁾。

レベルA：工学的問題

送信シンボルをどのように正確に伝送するか？

レベルB：意味論的問題

送信シンボルはどのように望ましい意味を伝えるか？

レベルC：効果の問題

受信した意味はどのように望ましい行動に影響を与えるか？

Shannonの情報理論は、意図的にレベルAのみに焦点を当てた体系化であるが、セマンティックエンコーダ・デコーダ、セマンティックノイズの概念を加えることで、レベルBやCにまで拡張できるとWeaverは主張している。図1に、Shannonの情報理論を拡張したセマンティック通信モデルを示す。Shannonの情報理論に基づき最適化された工学的な送受信機に対して、セマンティックエンコーダで意味付けをした特徴量を入力し、ビットレベルで正確に受信できた特徴量をもとに情報源を復元するモデルである。ここで、重要なことはセマンティックエンコーダとデコーダをどのように設計するかである。Carnap・Bar-Hillelは意味を定量的に評価する方法としてセマンティック情報理論を導入した⁽³⁾。原子文（出来事を記述し、真意の確定が可能な基本命題）を分析単位とし、原子文の意味的エントロピーを論理

須藤克弥 正員 北海道大学大学院情報科学研究院

E-mail k.suto@ist.hokudai.ac.jp

Katsuya Suto, Member (Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University, Kita 14, Nishi 9, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, 060-0814, Japan).

電子情報通信学会 基礎・境界サイエンス

Fundamentals Review Vol.19 No.2 pp.70-77 2025年10月

©電子情報通信学会 2025

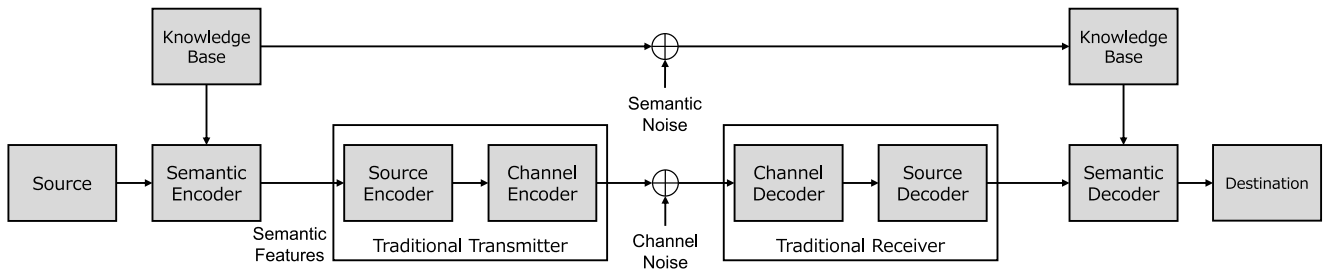


図1 セマンティック通信モデル レベル A に基づく送受信機に対し、レベル B・C に基づくセマンティックエンコーダを組み合わせた例。

的確率により計算する。J. Bao らはセマンティックノイズ及びセマンティック通信路の概念を定義し、Shannon の符号化定理を拡張することで、セマンティック容量を導出することに成功している⁽⁴⁾。しかしながら、セマンティックエンコーダ・デコーダの実現に必要な機能を概念的に提示することにとどまっておらず、実用的なセマンティック通信システムを構築することは困難とされてきた。

この問題に対して、近年の深層学習の発展により、効果的なセマンティックエンコーダ・デコーダを設計することが可能となっている。図1に示す知識ベース (Knowledge Base) は深層学習におけるデータセットであり、そのデータセットで学習されたニューラルネットワーク (NN: Neural Network) がセマンティックエンコーダ・デコーダに該当する。特に、大規模言語モデル (LLM: Large Language Model) や画像認識技術の進歩は目覚ましく、テキストや画像、音声といったマルチモーダルなデータから人間の脳が行う意味や特徴の抽出を機械的に行うことで、高性能なセマンティックエンコーダ・デコーダを実現している⁽⁵⁾、⁽⁶⁾。

深層学習に基づくセマンティック通信は数多くの研究がなされており、その全てを紹介することは難しい。本稿では、その基礎となるセマンティック通信の理論的解釈を紹介するとともに、画像伝送における深層学習に基づくセマンティック通信を体系的に紹介することで、本分野の研究を始める方の手助けとなることを期待する。最近の研究動向については、体系的にセマンティック通信を整理した解説論文⁽⁷⁾、情報理論視点での解釈が豊富な解説論文⁽⁸⁾、包括的に研究事例を紹介しているサーベイ論文⁽⁹⁾、情報源通信路深層結合符号に焦点を当てた解説論文⁽¹⁰⁾を参照されたい。

2. セマンティック通信

セマンティック通信は、情報理論による解析が古典的に行われ、近年の深層学習の発展により通信方式としての実装が進められている。ここでは、それぞれの研究事例について概説する。

2.1 情報理論的解釈

セマンティックの側面を考慮したエントロピーの評価は、Shannon の情報理論の概念を拡張して定式化されている⁽⁴⁾。そこで、Shannon の情報理論におけるエントロピーと相互情

報量の概説から始める。ある情報源が確率変数 X で表現され、取りうる値が x_1, x_2, \dots, x_n で、それぞれの生起確率が $P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_n)$ であるとき、情報源が生成するメッセージの平均情報量 (エントロピー) は以下で示される。

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (1)$$

このエントロピーは、その情報源から得られる情報を表現するために必要な平均ビット数の理論的最小レートを示す。相互情報量 $I(X; Y)$ は送信情報 X のエントロピー $H(X)$ と受信情報 Y が与えられた場合の X の不確実性 $H(X|Y)$ を用いて、

$$I(X; Y) = H(X) - H(X|Y) \quad (2)$$

で示される。これら二つの指標を組み合わせることで、ノイズを制約条件とした最大データレートを分析することが可能となる。しかしながら、これらの情報理論的指標はセマンティック通信の解析には適していない。例えば、送信情報が「にんげん」で1文字誤りが発生して「にんじん」を受信するケースと、4文字誤りが発生して「ひとびと」を受信するケースでは、前者は信頼性が高い通信であるが、セマンティックの観点からは後者のほうがより意味の近い情報を伝送できる。

セマンティックに基づく性能解析を行うことを目的として、セマンティックエンコーダを複数の要素 (W, K, I, M) でモデル化する。ここで、それぞれの要素は

- W : 観測によって得られる世界モデル
- K : 情報源の知識ベース
- I : 知識ベースに基づく情報源の推論
- M : メッセージエンコーダ

として定義される。あるメッセージ x の意味が真である可能性を当てはまる世界の集合の合計確率に基づいて算出する論理的確率を用いて意味の情報量を測定する。ここで、 x に対して推論 I により x が真となる集合を $W_x = \{w \in W | w \models x\}$ と定義する。ここで、 $w \models x$ はモデル w が命題 x を満たすことを示す。また、 W 内の各要素に対する確率を $\mu(w)$ とし、このとき、論理的確率 $m(x)$ とセマンティックエントロピー $H_s(x)$ は

$$m(x) = \frac{\mu(W_x)}{\mu(W)} = \frac{\sum_{w \in W, w \models x} \mu(w)}{\sum_{w \in W} \mu(w)} \quad (3)$$

$$H_s(x) = -\log_2(m(x)) \quad (4)$$

で与えられる^(注1)。

送信機と受信機で同様の推論モデルを保持しており、 $P(X|W)$ の条件付き確率のセマンティック符号化が存在することを仮定すると、離散無記憶通信路におけるセマンティック通信路容量は次式で定義される。

$$C_s = \sup_{P(X|W)} \{I(X;Y) - H(W|X) + \overline{H_s(Y)}\} \quad (5)$$

ここで、 $H(W|X)$ は符号化におけるセマンティック曖昧性、 $\overline{H_s(Y)}$ は受信メッセージのセマンティックエントロピーの期待値を示す。セマンティック通信路容量は Shannon 通信路容量 $\sup I(X;Y)$ と比較して、 $H(W|X)$ と $\overline{H_s(Y)}$ に応じて大小が変化する。つまり、セマンティック曖昧性の低いセマンティックエンコーダと、強力な推論能力をもつセマンティックデコーダを設計することで、物理的な通信路容量が小さくても有効なセマンティック通信を実現できることを示唆している。実際に、レベル A に基づく通信方式と比較して、既存の深層学習に基づくセマンティック通信は、低信号対雑音比においてより顕著な性能向上を実現している⁽⁵⁾、⁽¹¹⁾。

2.2 深層学習に基づく実装

セマンティックエンコーダ・デコーダは、知識ベースに基づく情報源の推論と逆推論を設計する必要があり、理論的なアプローチでの実装には限界がある。これに対し、深層学習に基づくセマンティック通信の研究が進んでいる。深層学習に基づくアプローチは以下の利点をもつ。

- 意味情報の効果的な抽出：深層学習の発展により、効果的な NN アーキテクチャが提案されるとともに、テキスト、音声、画像の大量のデータセットが整備されている。そのため、十分な知識ベース K による曖昧性が低い推論モデル I が設計可能である。

- NN でレベル A・B・C の機能ブロックを実装でき、送受信機全体を一括で最適化できる。通信システムの所望の目的に応じた損失関数を適切に設計するだけで最適化が可能である。

- 深層学習を用いたアプローチは、レベル A で設計された従来の符号化（例、ターボ符号）と比較して、平均処理実行時間を短くすることが可能である。

ここでは、テキスト伝送向けのセマンティック通信を設計し、古典的な通信方式と比較して低信号対雑音比において有効な意味を伝送できることを検証した論文⁽⁵⁾について概説し、その原理を理解したい。論文⁽⁵⁾では、深層学習に基づくセマンティック通信に関して本質的な問いに対する答えを示している。

- 問 1. ビットの背後にある意味をどのように定義するか？
- 問 2. 文のセマンティックエラーをどのように測定するか？
- 問 3. セマンティック符号化と通信路符号化をどのように一括設計するか？

問 1 に対して、Transformer をベースにした深層学習に基づく自然言語処理モデルを提案している。特に、マルチヘッドセ

ルフアテンション機構を用いることで、文の長さに依存せず意味を理解できる。従来の統計的な自然言語処理が、長い文や構文の処理に困難を抱えていた問題を解決しており、効果的なセマンティック通信を実現している。

問 2 に対して、セマンティックエラーを評価する方法として、元の文 s と復元した文 \hat{s} のセンテンス類似度を提案している。

$$\text{sim}(\hat{s}, s) = \frac{B_{\Phi}(s) \cdot B_{\Phi}(\hat{s})^T}{\|B_{\Phi}(s)\| \cdot \|B_{\Phi}(\hat{s})\|} \quad (6)$$

ここで $B_{\Phi}(\cdot)$ は数十億のパラメータを含む巨大な事前学習モデル BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers)⁽¹²⁾を示す。一般的に利用される BLEU (Bilingual Evaluation Understudy Score) が単語レベルの誤りによって評価値が変わるのに対し、BERT は文単位の類似度を評価できるため、意味の評価に適している。

問 3 に対して、セマンティック符号化と通信路符号化を独立に設計した場合、通信路符号化が達成可能なビット誤り率やシンボル誤り率によっては、意味を十分に復元できない可能性がある。そのため、セマンティック符号化と通信路符号化を一括で最適化する必要がある。この問題に対し、本論文では、従来の通信システムにおける全ての物理層ブロックを統合し、送信機と受信機を一括で最適化するエンドツーエンド学習を行っている。更に、通信路符号化とセマンティック符号化の異なる目的に対してシステム全体を最適化するため、相互情報量とクロスエントロピーによる 2 段階学習手法を提案している。まず初めに、相互情報量推定モデルを学習する。これにより高いデータレートを達成するデータ分布を取得する。次に、学習した相互情報量推定モデルを活用し、クロスエントロピーと相互情報量の組み合わせ損失関数を用いてシステム全体をエンドツーエンド学習する。この仕組みにより、セマンティックエラーが少ない推論モデルを構築しつつ、推論モデルに影響を与えない通信路誤りを達成する通信システムを実装できる。

深層学習に基づくセマンティック通信は、画像、テキスト、音声、ビデオの伝送向けに実装がなされている。これから本分野の研究を始める方の参考までに、表 1^{(13)~(19)}にセマンティック通信の設計に利用される代表的なデータセットをまとめる。データセットは、その特徴によって使い分けが必要になる。例えば、CIFAR-10 は高精細な画像伝送のためのモデルとしては適切ではないが、軽量のモデルを設計するためには十分である。設計したいセマンティック通信の目的に合わせて適切なデータセットを利用されたい。

3. セマンティック通信のユースケース

これまでの情報通信の主要なユースケースは H2H (Human-to-Human) 通信であり、人間が理解できる意味を伝送することがセマンティック通信の目的である。一方、デジタルツインやサイバーフィジカルシステムに代表されるように人間と機械が連携して社会サービスが構築されるコネクテッドインテリジェンスの現代においては、H2M (Human-to-Machine) や M2M (Machine-to-Machine) 通信まで範囲を広げてセマンティック

(注1)：知識ベースによる制限下での評価については元論文⁽⁴⁾を参照されたい。

表 1 深層学習に基づくセマンティック通信で使われる代表的なデータセット

データセット名	モダリティ	概要
CIFAR-10/ CIFAR-100	画像	10 もしくは 100 クラスの 32x32 ピクセルカラー画像。軽量のデータであるため、モデルの初期実装や FPGA 上に実装できる軽量のモデルの学習に利用 ⁽¹³⁾ 。
ImageNet	画像	約 1400 万枚、2 万以上のクラスの画像データセット ⁽¹⁴⁾ 。画像ごとにラベルが存在するため、意味を抽出する符号化を直接的に設計可能。
COCO	画像	約 33 万枚、80 クラスの画像データセット ⁽¹⁵⁾ 。ImageNet と異なり、1 枚画像に複数のオブジェクトを含むため実社会に近い画像。
European Parliament	テキスト	欧州議会の発言記録コーパスであり、21 言語が利用可能。論文 ⁽⁵⁾ などで利用。
WMT Datasets	テキスト	ニュース記事、Web 文書のコーパス。英日の言語ペアを含む。論文 ⁽¹⁶⁾ などで利用。
Librispeech	音声	男女、異なるアクセントを含む約 1000 時間の英語音声データ。論文 ⁽¹⁷⁾ などで利用。
LJSpeech	音声	一人の女性話者によって録音された約 24 時間の英語音声データ。論文 ⁽¹⁸⁾ などで利用。
Video CamVid	ビデオ	701 フレームで構成されるドライビング映像とアノテーション。論文 ⁽¹⁹⁾ などで利用。

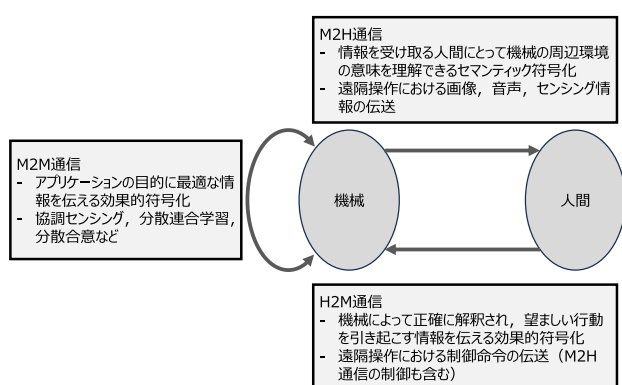


図 2 ユースケースに基づくセマンティック通信の目的

通信を設計する必要がある。図 2 は、H2M、M2M 通信それぞれにおけるセマンティック通信の目的を示している。

M2M セマンティック通信では、人間が直接介入することなく、複数の機械が連携することで特定のセンシング・推論タスクを実行する。このユースケースでは、個々の通信における意味よりもシステム全体として意図されたタスクを効果的に実行することが求められる。この有効性に特化した符号化（効果的符号化）の具体的な事例を列挙する。協調センシングに基づく推論では、複数信号源から推論タスクの実行に最も貢献する情報や特徴を抽出して、伝送する⁽²⁰⁾。レート歪み理論を一般化した Information bottleneck 法⁽²¹⁾は、効果的符号化を実現する方法である。分散連合学習においては、勾配の量子化や勾配のスパース性に着目した圧縮が可能であり、最終的なモデル構築までの遅延を低減しつつ精度を担保するためにセマンティック通信が使われる。松村らは、情報源通信路深層結合符号を用いたモデル伝送を提案している⁽²²⁾。

H2M セマンティック通信により最も性能改善が期待されるアプリケーションは遠隔監視・操作である。機械から人間方向の通信（M2H 通信）では、機械が観測し、伝送されたマルチモーダルセンシング情報の意味を人間が理解することが求められる。したがって、レベル B の側面から通信方式を設計する必要があり、これまでに数多くの研究がなされている。画像⁽²³⁾、点群⁽²⁴⁾、音声⁽²⁵⁾、それらの統合データ⁽⁶⁾から意味を抽出して

伝送することで、無線環境を問わず高いロバスト性と低遅延で通信が可能となり、遠隔操作の制御性を向上することができる。一方、人間から機械方向の通信（H2M 通信）では、人間が伝送した制御情報を機械が正確に解釈し適切に行動することが重要である。したがって、レベル C の問題である。この問題においては、制御命令の正確さが重要である一方、制御命令の遅延も制御性能に大きく影響を与える。論文⁽²⁶⁾では、VoI (Value of Information) と AoI (Age of Information) を評価関数としたセマンティック通信を提案している。論文⁽²⁷⁾では、生成 AI を活用したエージェントを導入することにより、軽量の制御命令で高レベルなタスクを実行できる手法を提案している。

これまでのセマンティック通信では、M2H 通信と H2M 通信がそれぞれ独立に研究されている。しかしながら、遠隔操作のようなユースケースでは、双方向の通信が相互に影響を与えるため、一つのシステムとして最適化するようなアプローチの研究が必要になるであろう。例えば、遠隔操作者が自身に必要な情報を M2H 通信で取得することを目的として、H2M 通信で制御命令を伝送することにより、遠隔操作の効果を最大化できる。

4. セマンティック画像伝送

表 2 は、従来の画像伝送と比較したセマンティック画像伝送の特徴を示す。従来の画像伝送は、ピクセル単位での情報を再現することを目的として、解像度（空間周波数）を変更することで所望のデータレートを達成する。これに対し、セマンティック画像伝送は、意味を再現することを目的として、データレートに応じて意味のレベルを変更する。深層学習に基づくセマンティック画像伝送の研究事例について、意味の定義による分類を行い、セマンティック画像伝送が本質的に備えるべき機能やその実装例を明らかにする。

4.1 画像再構成

画像再構成を目的としたアプローチは、従来の画像伝送と同じようにピクセルレベルの画像品質を最大化することが主目的である。本アプローチの代表的な研究例は、2019 年に発

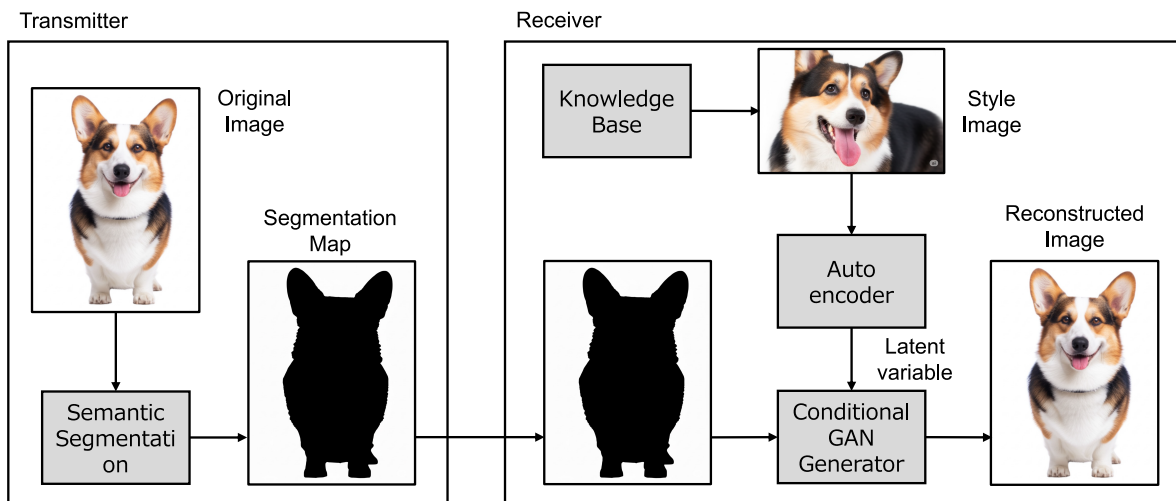


図 3 領域再構成を目的としたセマンティック画像伝送システムの例

表 2 従来・セマンティック画像伝送の比較

	従来の画像伝送	セマンティック画像伝送
目的	ピクセル情報を忠実に再現	ピクセル情報の損失を許容するが、意味を理解
圧縮の観点	視覚的特性を利用	AI による意味理解
圧縮の制御	解像度を変更	意味のレベルを変更 (画像再構成を含む)
応用例	写真共有, 映像配信	自動運転, 遠隔操作, 遠隔医療

表された情報源通信路深層結合符号化 (DJSCC: Deep Joint Source-Channel Coding)⁽²⁸⁾である (詳細は 5 章で説明する)。情報源通信路深層結合は符号化変調によって信号を生成し、シンボル誤りが生じた信号を利用して画像を復元するため、ピクセル情報を忠実に再現するものではなく、画像空間全体の意味を効率よく伝送することを目的としている。画像空間全体の情報が必要な遠隔操作や遠隔医療のアプリケーションにおいて有効なアプローチである。また、セグメンテーションマップを活用した手法も提案されており⁽²⁹⁾、NN 構造や損失関数を工夫することで領域再構成の目的に資する情報源通信路深層結合を設計可能である。

4.2 領域再構成

領域再構成を目的としたアプローチは、画像を意味的領域に分割し、必要な領域だけ伝送する。物体をクラスごとに分類するセマンティックセグメンテーション、物体ごとに分類するインスタントセグメンテーション、バウンディングボックスで物体を分類する YOLO (You Only Look Once) を用いて受信者が必要とする意味的領域を抽出する。図 3 は、セマンティックセグメンテーションを用いたセマンティック画像伝送システムの例を示す。送信機は、情報源画像にセマンティックセグメンテーションを適用し、物体クラスをラベル付けしたセグメンテーションマップを生成し、伝送する。受信機は、セグメンテーシ

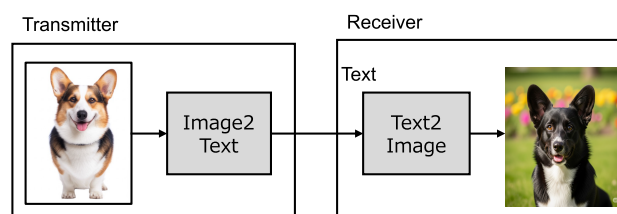


図 4 画像・テキスト変換を用いたセマンティック画像伝送システムの例

ンマップから情報源画像の復元を行うが、色情報が失われているため、知識ベースに保存された同様のラベルの画像 (スタイル画像) を用いる。自己符号化器を用いてスタイル画像からその特徴量 (潜在変数) を抽出し、条件付き敵対的生成ネットワーク (Conditional Generative Adversarial Network) などを用いて、補色した画像を再構成する。画像再構成よりも高い圧縮性能を期待できるが、意味付けする物体数が多い場合は圧縮性能が限定的であること、知識ベースに情報源画像と同様の特徴がない場合には再構成精度が限定的であることに注意する必要がある。論文⁽²³⁾において、詳細な実装と性能評価結果が示されているので参照されたい。また、物体の位置と輪郭だけを意味として認識したいようなアプリケーションの場合は、セグメンテーションマップをそのまま再構成するセマンティック通信の研究事例も存在する⁽²⁹⁾。

4.3 画像理解

画像理解を目的としたアプローチは、画像の内容を自然言語で表現し、その言語情報を圧縮して送信する。図 4 は、画像・テキスト変換を用いたセマンティック画像伝送システムの例を示す。画像・テキスト変換には BLIP⁽³⁰⁾、テキスト・画像変換には拡散モデル⁽³¹⁾が利用されることが多い⁽³²⁾。図 4 の例では、「コーギーがおすわりをしている」という画像のキャプションを伝送し、画像を復元する。しかしながら、キャプションが含む特徴が十分ではなく、毛色が黒く、背景が花畑になっており、情報源画像を正しくは復元できていない。本アプローチで

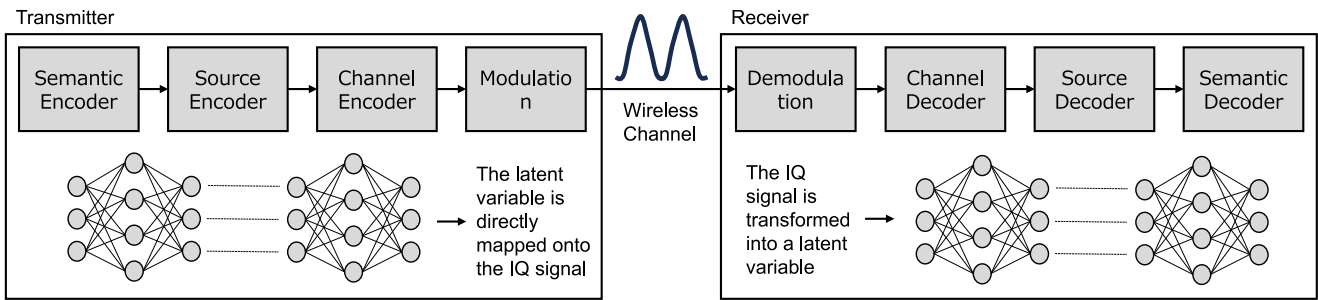


図 6 情報源通信路深層結合符号化に基づく通信システム セマンティック、情報源、通信路符号を NN で構成し、出力される潜在変数のペアで IQ 信号を生成。

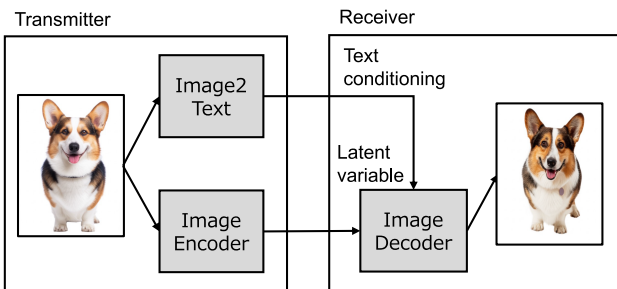


図 5 画像・テキスト変換を補助的に用いたセマンティック画像伝送システムの例

は、キャプションに含む特徴量を変えることで、データレートと映像品質を制御できる。

図 5 は、画像キャプションを補助的に利用したセマンティック画像伝送システムの例である⁽³³⁾。このシステムの特徴は、前述した画像再構成、領域再構成を目的としたエンコーダ・デコーダと統合できる点である。画像キャプションによって意味を補足することで、セマンティック曖昧性を減少でき、画像エンコーダの圧縮率を高くできる。図 3 での実装例と比較すると、知識ベースの代わりに、画像キャプションによって色情報を補足できる。画像キャプションと知識ベースのセマンティック曖昧性を評価することで最適なシステムを構成できる。

2025 年に発表された最新の研究成果⁽³⁴⁾では、情報源通信路深層結合符号化によるエンコーダ・デコーダと拡散モデルにノイズ除去を組み合わせたシステムが提案されている。通信路に加わるノイズと拡散プロセスの類似性から、拡散モデルをノイズ除去として利用できるが、画像キャプションと画像エッジ情報を意味情報として与えることで、無条件のノイズ除去を条件付きノイズ除去に変換し、性能を向上している。信号対雑音比が -15 dB と低い状況においても、視覚的認識と意味をもつ画像を復元できることを示している。画像再構成、領域再構成、画像理解と伝送する意味によって分類できるが、上記の事例のように意味を組み合わせるとより高性能なセマンティック画像伝送を実現する研究が盛んになるだろう。

5. 情報源通信路深層結合符号化

情報源通信路深層結合符号化に基づく通信システムを図 6 に示す。情報源通信路深層結合符号化の特徴は、送受信機のセマン

ティック、情報源、通信路符号化の機能を自己符号化器型の NN で構成する点である。つまり、エンコーダで生成した潜在変数を伝送し、ノイズを含んだ潜在変数をデコーダに入力し、画像を復元するモデルである。自己符号化器を用いるため、特徴が類似する入力を潜在空間において距離が近い点に配置し、小さなノイズに対して、意味的に似た再構成が得られる。通信路を含んだ形でエンドツーエンド学習することで、所望のノイズレベルに対してロバストな再構成能力を獲得できる。これらの理由によりノイズを含んだ場合でも画像を正確に復元できる。フェージング環境におけるロバスト性に対しては、二次変調に OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)、NN に基づく通信路推定、通信路等化を採用した情報源通信路深層結合符号化が提案されている⁽³⁵⁾。

情報源通信路深層結合符号化のもう一つの特徴は、潜在変数のペアの値を IQ 空間の振幅とする疑似アナログ変調を採用している点である。元々は、離散フーリエ変換で生成した空間周波数スペクトルに対して疑似アナログ変調する Softcast⁽³⁶⁾で採用されたものである。情報源通信路深層結合符号化では、通信路を含んだエンドツーエンド学習が可能であるため、IQ 空間に対するノイズの影響を低減できることからより有効なアプローチである。また、通信路符号化後に生成した潜在変数で信号点を配置するため、符号化変調の機能をデータ駆動で最適化できる。通信システム全体の機能を最適化できることから、筆者も含む国内外の研究者が注目している技術である。2025 年の最新の研究成果では、Shannon 限界のデータレートにおいて BPG (Better Portable Graphics) で画像圧縮した場合と比較して、低信号対雑音比環境において情報源通信路深層結合符号化は高い性能を達成できることを示している⁽¹¹⁾。つまり、情報源と通信路符号化を分離して設計する場合、情報源通信路深層結合符号化よりも性能のよい情報源符号化を設計することが困難であることを示唆している。

5.1 変調

論文(35)で提案されている OFDM を組み合わせた情報源通信路深層結合符号化をソフトウェア無線機に実装し、電波暗室で距離と減衰器で EVM (Error Vector Magnitude) を変更して PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) を測定した結果を図 7 に示す。256QAM は、疑似アナログ変調で信号点を決定した

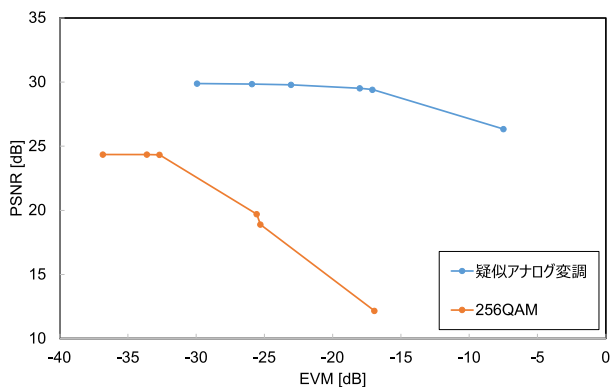


図7 EVM と PSNR の関係

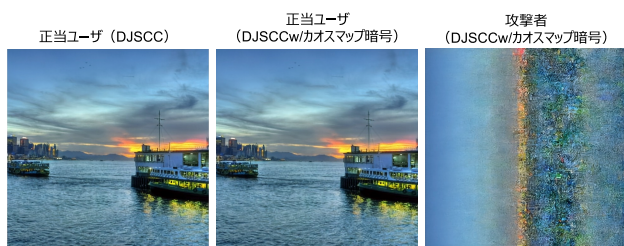


図8 カオスマップ暗号を用いた視覚的セキュリティ

後に、256 個の信号点で量子化するため、量子化誤差により同 EVM において低い画像品質になる。また、シンボル誤りによって EVM に対する PSNR の減少率が大きくなるのが分かる。疑似アナログ変調を利用することが望ましいが、実用的な通信システムとの整合性が重要である。そこで、論文(37)は、コンステレーションの制約を考慮した情報源通信路深層結合符号化を提案している。また、論文(38)は、信号対雑音比に応じてコンステレーションの形状や分布を動的に制御することで高い画像品質を達成できることを示している。

5.2 セキュリティ

情報源通信路深層結合符号化を含むセマンティック通信においても暗号化は重要である。現在の通信システムは符号化後に暗号化するためビット系列を前提としているが、情報源通信路深層結合符号化では連続値に対する暗号化が必要である。この問題に対し、論文(39)は、LWE (Learning With Errors) に基づく暗号化手法を提案している。また、論文(40)では、カオスマップ暗号化を用いた情報源通信路深層結合符号化を提案している。図8に示すように、カオスマップ暗号化で潜在変数構造をランダム化することで、攻撃者は画像の意味を認識できない。一方、鍵をもった正当ユーザは視覚的な劣化なく画像を復元できる。

6. おわりに

本稿では、セマンティック通信及びセマンティック画像伝送について概説した。特に、情報源通信路深層結合符号化はセマンティック画像伝送を実現する有効なアプローチであることを

示した。5章では、変調とセキュリティの研究事例について紹介したが、軽量のエンコーダの設計やマルチモーダルデータへの対応、セマンティックな視点での再送制御、システム全体のタスク最適化設計など未だ解決していない問題も多く、今後もますます盛り上がりを見せていくことだろう。本分野の研究者及び興味をもつ読者の研究活動への一助になれば幸いである。

謝辞 本研究の一部は JST ASPIRE JPMJAP2346 の支援を受けたものである。

文 献

- (1) C.E. Shannon, "A mathematical theory of communication," Bell Syst. Tech. J., vol.27, no.3, pp.379–423, July 1948.
- (2) W. Weaver, "Recent contributions to the mathematical theory of communication," ETC: a review of general semantics, vol.10, no.4, pp.261–281, 1953.
- (3) R. Carnap and Y. Bar-Hillel, "An outline of a theory of semantic information," RLE Technical Reports, 247, pp.1–49, Oct. 1952.
- (4) J. Bao, P. Basu, M. Dean, C. Partridge, A. Swami, W. Leland, and J.A. Hendler, "Towards a theory of semantic communication," Proc. 2011 IEEE Network Science Workshop, pp.110–117, June 2011.
- (5) H. Xie, Z. Qin, G.Y. Li, and B.-H. Juang, "Deep learning enabled semantic communication systems," IEEE Trans. Signal Process., vol.69, pp.2663–2675, April 2021.
- (6) F. Jiang, L. Dong, Y. Peng, K. Wang, K. Yang, C. Pan, and X. You, "Large AI model empowered multimodal semantic communications," IEEE Commun. Mag., vol.63, no.1, pp.76–82, Jan. 2025.
- (7) Q. Lan, D. Wen, Z. Zhang, Q. Zeng, X. Chen, P. Popovski, and K. Huang, "What is semantic communication? A view on conveying meaning in the era of machine intelligence," J. Commun. Inf. Netw., vol.6, no.4, pp.336–371, Dec. 2021.
- (8) D. Gündüz, Z. Qin, I.E. Aguerri, H.S. Dhillon, Z. Yang, A. Yener, K.K. Wong, and C.-B. Chae, "Beyond transmitting bits: Context, semantics, and task-oriented communications," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.41, no.1, pp.5–41, Jan. 2023.
- (9) Z. Lu, R. Li, K. Lu, X. Chen, E. Hossain, Z. Zhao, and H. Zhang, "Semantics-empowered communications: A tutorial-cum-survey," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol.26, no.1, pp.41–79, Firstquarter 2024.
- (10) D. Gündüz, M.A. Wigger, T.-Y. Tung, P. Zhang, and Y. Xiao, "Joint source-channel coding: Fundamentals and recent progress in practical designs," Proc. IEEE, pp.1–32, 2024.
- (11) K. Yang, S. Wang, J. Dai, X. Qin, K. Niu, and P. Zhang, "SwinJSCC: Taming swin transformer for deep joint source-channel coding," IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw., vol.11, no.1, pp.90–104, Feb. 2025.
- (12) J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee, and K. Toutanova, "BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding," arXiv preprint arXiv: 1810.04805, Oct. 2018.
- (13) H. Yoo, T. Jung, L. Dai, S. Kim, and C.-B. Chae, "Demo: Real-time semantic communications with a vision transformer," Proc. 2022 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), pp.1–2, May 2022.
- (14) O. Russakovsky, J. Deng, H. Su, J. Krause, S. Satheesh, S. Ma, Z. Huang, A. Karpathy, A. Khosla, M. Bernstein, A.C. Berg, and L. Fei-Fei, "ImageNet

- large scale visual recognition challenge,” *Int. J. Comput. Vis.*, vol.115, no.3, pp.211–252, Dec. 2015.
- (15) T.-Y. Lin, M. Maire, S. Belongie, J. Hays, P. Perona, D. Ramanan, P. Dollár, and C.L. Zitnick, “Microsoft COCO: Common objects in context,” *Computer Vision – ECCV 2014, Lecture notes in computer science*, pp.740–755, Springer International Publishing, Cham, 2014.
 - (16) H. Xie, Z. Qin, X. Tao, and K.B. Letaief, “Task-oriented multi-user semantic communications,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.40, no.9, pp.2584–2597, Sept. 2022.
 - (17) T. Han, Q. Yang, Z. Shi, S. He, and Z. Zhang, “Semantic-preserved communication system for highly efficient speech transmission,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.41, no.1, pp.245–259, Jan. 2023.
 - (18) Z. Weng, Z. Qin, X. Tao, C. Pan, G. Liu, and G.Y. Li, “Deep learning enabled semantic communications with speech recognition and synthesis,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.22, no.9, pp.6227–6240, Sept. 2023.
 - (19) W. Gong, H. Tong, S. Wang, Z. Yang, X. He, and C. Yin, “Adaptive bitrate video semantic communication over wireless networks,” *Proc. 2023 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, pp.122–127, Nov. 2023.
 - (20) Y. Sheng, H. Ye, L. Liang, and S. Jin, “Semantic communication for cooperative perception based on the importance map,” *Proc. 2023 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, pp.177–182, Nov. 2023.
 - (21) N. Slonim and N. Tishby, “Agglomerative information bottleneck,” *MIT Press Advances in Neural Information Processing Systems*, vol.12, pp.617–623, 1999.
 - (22) I. Matsumura and K. Suto, “Wireless resource efficient distributed learning with deep joint source-channel coding,” *Proc. 2024 IEEE Global Communications Conference*, pp.1–6, Dec. 2024.
 - (23) M.U. Lokumarambage, V.S.S. Gowrisetty, H. Rezaei, T. Sivalingam, N. Rajatheva, and A. Fernando, “Wireless end-to-end image transmission system using semantic communications,” *IEEE Access*, vol.11, pp.37149–37163, April 2023.
 - (24) X. Liu, H. Liang, Z. Bao, C. Dong, and X. Xu, “A semantic communication system for point cloud,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.74, no.1, pp.894–910, Jan. 2025.
 - (25) Z. Weng and Z. Qin, “Semantic communication systems for speech transmission,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.39, no.8, pp.2434–2444, Aug. 2021.
 - (26) W. Wu, Y. Yang, Y. Deng, and A. Hamid Aghvami, “Goal-oriented semantic communications for robotic waypoint transmission: The value and age of information approach,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.23, no.12, pp.18903–18915, Dec. 2024.
 - (27) P. Li and A. Aijaz, “Task-oriented connectivity for networked robotics with generative AI and semantic communications,” *arXiv preprint arXiv: 2503.06771*, March 2025.
 - (28) E. Bourtsoulatzé, D. Burth Kurka, and D. Gündüz, “Deep joint source-channel coding for wireless image transmission,” *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol.5, no.3, pp.567–579, Sept. 2019.
 - (29) Q. Pan, H. Tong, J. Lv, T. Luo, Z. Zhang, C. Yin, and J. Li, “Image segmentation semantic communication over internet of vehicles,” *Proc. 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp.1–6, March 2023.
 - (30) J. Li, D. Li, C. Xiong, and S. Hoi, “BLIP: Bootstrapping language-image pre-training for unified vision-language understanding and generation,” *Proc. the 39th International Conference on Machine Learning*, vol.162, pp.12888–12900, July 2022.
 - (31) J. Ho, A. Jain, and P. Abbeel, “Denoising diffusion probabilistic models,” *Proc. 34th International Conference on Neural Information Processing Systems*, pp.6840–6851, 2020.
 - (32) X. Wei, H. Tong, N. Yang, and C. Yin, “Language-oriented semantic communication for image transmission with fine-tuned diffusion model,” *arXiv preprint arXiv: 2409.17104*, Sept. 2024.
 - (33) G. Cicchetti, E. Grassucci, J. Park, J. Choi, S. Barbarossa, and D. Comminiello, “Language-oriented semantic latent representation for image transmission,” *Proc. 2024 IEEE 34th International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP)*, pp.1–6, 2024.
 - (34) M. Zhang, H. Wu, G. Zhu, R. Jin, X. Chen, and D. Gündüz, “Semantics-guided diffusion for deep joint source-channel coding in wireless image transmission,” *arXiv preprint arXiv: 2501.01138*, Jan. 2025.
 - (35) M. Yang, C. Bian, and H.-S. Kim, “OFDM-guided deep joint source channel coding for wireless multipath fading channels,” *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol.8, no.2, pp.584–599, June 2022.
 - (36) S. Jakubczak and D. Katabi, “Softcast: one-size-fits-all wireless video,” *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol.40, no.4, pp.449–450, Aug. 2010.
 - (37) T.-Y. Tung, D.B. Kurka, M. Jankowski, and D. Gündüz, “DeepJSCC-Q: Constellation constrained deep joint source-channel coding,” *IEEE J. Sel. Areas Inf. Theory*, vol.3, no.4, pp.720–731, Dec. 2022.
 - (38) M. Wang, J. Li, M. Ma, and X. Fan, “Constellation design for deep joint source-channel coding,” *IEEE Signal Process. Lett.*, vol.29, pp.1442–1446, June 2022.
 - (39) T.-Y. Tung and D. Gündüz, “Deep joint source-channel and encryption coding: Secure semantic communications,” *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC) 2023*, pp.5620–5625, 2023.
 - (40) Y. Fu and K. Suto, “Visually secure deep joint source-channel coding with chaotic map against deep known-plaintext attack,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol.6, pp.1847–1858, March 2025.

(ITS 研究会提案, 2025 年 6 月 15 日受付,
2025 年 7 月 4 日再受付)



須藤 弥 (正員)

2016 東北大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。博士 (情報科学)。2016 ウォータールー大学博士研究員, 2018 電気通信大学大学院情報理工学研究科助教。2023 電気通信大学大学院情報理工学研究科准教授。2025 北海道大学大学院情報科学研究科准教授。深層学習を用いたセマンティック通信、電波伝搬グラフ表現に関する研究に従事。

生体認証技術の研究開発における総合知

Convergence Knowledge in Research and Development of Biometrics Technologies

長坂晃朗 Akio NAGASAKA

アブストラクト 生体認証の一つである指静脈認証技術の研究開発を例にとり、技術の創生から社会実装に至るまでの様々な挑戦を、昨今注目されている総合知の観点から考察しつつ解説する。生体計測と画像認識の融合による指静脈認証の世界初の実用化から、精度と使い勝手を磨いての製品化、価値観の異なる市場での競争から学びを得た新技術の開発と金融機関での採用、そして更なる社会実装の拡大を目指しセキュリティ技術と融合して実現した大規模生体認証基盤サービスまで、一連の開発史について概説していく。

キーワード 生体認証, 総合知, 指静脈認証, 公開型生体認証基盤 (PBI)

Abstract Taking the research and development of finger vein authentication technology, which is one of the biometric authentication technologies, as an example, we will explain various challenges from the creation of the technology to its social implementation from the perspective of convergence knowledge, which has been attracting attention in recent years.

Key words Biometrics, Convergence knowledge, Finger vein, Public biometric infrastructure (PBI)

1. はじめに

2021年に施行された科学技術・イノベーション基本法では、人文・社会科学と自然科学を含む、あらゆる「知」の融合による「総合知」を活用して社会課題に対応していくという方針が示された。それに基づき内閣府が策定した第6期科学技術・イノベーション基本計画⁽¹⁾では、「総合知」を、多様な「知」が集い、新たな価値を創出する「知の活力」を生むことと定義し、「総合知」を推し進めることが科学技術・イノベーションの力を高めるとして重要性を掲げている。

本稿は、2024年6月の研究会での「総合知」をテーマとしたセッションの企画を受けて、筆者が携わってきた生体認証技術の研究開発を取り上げ、その過程で経験した「知」の融合とそこからの学びについて講演を行った内容をまとめたものである。生体認証とは、人間の身体の特徴を比較することで、本人かどうかを正確に見極める本人確認のための技術である。原理からして、人間の身体特徴を観測するための計測技術と、計測したデータを処理し、本人の特徴と一致するか否かを判定する情報技術 (IT) との融合が起点となっている。計測データの特性い

み合わせればよいというものではない。また、常に正しく本人と認識するためには、計測する身体特徴が安定で、一人一人異なることを検証する必要がある。そこには医学的・解剖学的知見が求められる。世界人類が広く利用できるようにと考えれば人類学の知見も必要になるし、社会実装の観点からは、身体の一部を提示することや提示方法に関する文化的受容性も考慮する必要がある。更には、身体特徴は個人の究極のプライバシーデータであるから、安全に管理されなければならない。データ保護のための暗号化技術や漏洩を防ぐセキュリティ技術も欠かせない。このように、主要な専門領域を並べただけでも、多様な「知」の融合によって支えられた技術であることがわかる。

本稿では、生体認証技術の中でも、筆者が開発に携わってきた指静脈認証技術を題材にして、その創生から社会実装に至るまでの研究開発の歴史を辿りながら、どのような局面で総合知の考え方が活き、ブレークスルーに貢献してきたかについて具体事例を示しつつ紹介する。本稿が、新たな社会課題の解決に向けた「知」の融合の在り方を考えるヒントとなれば幸いである。

2. 生体認証技術と総合知

冒頭で述べたように、生体認証技術とは、人間の身体特徴を用いた本人確認技術である。身体の一部を鍵やパスワードのように用いることができ、何かを持ち歩く必要もなければ忘れてしまう心配もない。家の施錠から様々なITサービスのログインまで身一つでこなすことができる。身体のどの部位の特徴(以下、生体特徴)を用いるかで図1に示すように様々な種類があり、身近なところではスマートフォンに使われている指紋認証や

長坂晃朗 正員：シニア会員 株式会社日立製作所研究開発グループ
E-mail akio.nagasaka.pc@hitachi.com
Akio NAGASAKA, Senior Member (Advanced Artificial Intelligence Innovation Center, Research & Development Group, Hitachi, Ltd., 185-8601 Japan).

電子情報通信学会 基礎・境界サイエンス
Fundamentals Review Vol.19 No.2 pp.78-86 2025年10月
©電子情報通信学会 2025

種類	部位	抽出情報	特徴
指紋	皮膚表面の凹凸		<ul style="list-style-type: none"> 長い歴史、犯罪捜査にも利用可能 皺の存在は共通、細部の違いで判別 肌荒れしたり、傷があると使えない
虹彩	虹彩の凹凸模様		<ul style="list-style-type: none"> 皺の存在は共通、細部の違いで判別 睫毛が覆ったり、光が映り込むと使えない、瞳が黒く目の細い人は難
網膜	眼の奥の血管模様		<ul style="list-style-type: none"> パターン全体が大きく違う 装置を覗き込んで目に光を入れる操作が、利用者の心理的負担大
顔	顔(目鼻口)の形		<ul style="list-style-type: none"> 顔を見せるだけの簡単操作 環境条件や表情、加齢などで容易に特徴が変化し精度が低い
静脈	指の内部の血管模様		<ul style="list-style-type: none"> パターン全体が大きく違う 生体内部のため安定で盗まれにくく、特徴のない人が少ない

図 1 生体認証の種類と特徴

顔認証に馴染みがある方も多いかもしい。指紋認証は、指先の手のひら側にある細かな皺が形成する紋様、すなわち指紋が人それぞれ異なることに着目した個人認証技術であり、顔認証は同様に顔が異なることに着目した認証技術である。ほかにも目の虹彩の皺模様に着目した虹彩認証や、網膜内を走る血管が形成する紋様を用いた網膜認証、手の形を使う掌形認証、そして指や手のひら、手の甲の皮下を走る静脈の紋様に着目した静脈認証などがある。

このように、用いる生体特徴によって多種多様な方式がある生体認証であるが、図 1 にも示したように、それぞれ得手不得手がある。それゆえ、より目的に合う、あるいは完璧な生体認証を求めて、様々な生体特徴に着目した生体認証の研究が進められてきた。とはいえ、どのような生体特徴でも認証技術として使えるわけではない。生体認証として利用するためには、生体特徴は必ず次の三つの条件を満たす必要がある。

- ① 普遍性：万人所有、誰もがもっている特徴である
- ② 唯一性：万人不同、本人以外は同じ特徴をもたない
- ③ 永続性：終生不変、時間の経過とともに変化しない

すなわち、人であれば誰もが共通してもっていて、より詳細に見れば個人ごとに必ず違いがあり、同じ人物の特徴は終生変わらないということである。この条件が満たされない生体認証は、本人と他人を容易に取り違えたり、何日か経ったら認証できなくなったりし、実用に全く値しない。それゆえ丁寧な検証が求められる。

この検証にあたっては、対象が生体であるがために、人の医学的・解剖学的・遺伝学的知見が不可欠である。また、対象とする生体特徴が万人を区別するのに十分な差異があるのか統計的な検証も求められる。そして、このような生体特徴が安全かつ実用的なコストで安定して計測できなくてはならない。生体認証は近年 IT ソリューションの一要素として組み込まれることが多いため、情報技術のイメージが強いが、本来はこのように医学・計測・情報の 3 分野にまたがる総合技術である。

これからお話ししていく指静脈認証は、まさにこの異分野融合によって生まれた技術である。

3. 指静脈認証とは

指静脈認証は、2000 年に世界で初めて日立が実用化に成功し

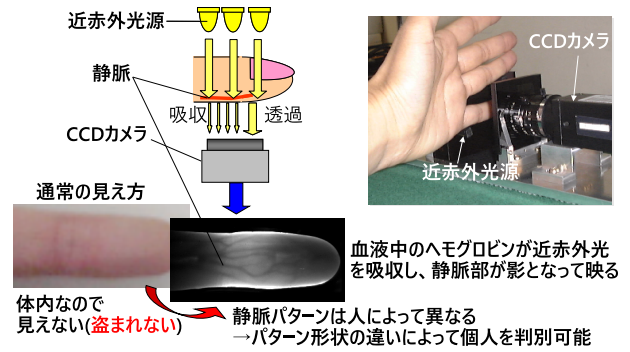


図 2 指静脈認証の原理

た、日本発祥の生体認証技術である。指をかざすだけで本人かどうかを瞬時に判定することができ、施設出入口での入退管理や金融機関の ATM (現金自動預払機: Automatic Teller Machine) における本人確認などで広く使われている。最近では、財布もカードも持たずに手ぶらで決済ができるサービスも始まり、本人確認が厳格に行えることから、酒や煙草などの購入時の年齢確認まで 1 回で行えるなど利便性の高さも特長である。

指静脈認証は、その名前のとおり、指の中を走る静脈を生体特徴として用いた生体認証技術である。その原理を図 2 に示す。指に近赤外光を透過させると、血液中のヘモグロビンが周囲の生体組織に比べて強く近赤外光を吸収する性質があるため、相対的に静脈部分が暗い影のようになってカメラで撮影される。このようにして撮影された静脈の形作る線紋様、すなわち静脈パターンは人それぞれに異なるため、画像認識によりパターン形状を比較することで誰のパターンであるかを判別できる。

尚、静脈パターンに着目した生体認証は指静脈が初めてではない。1984 年に英国の Rice 氏が自分の手に浮き出た静脈の紋様を見て、それが個人によって異なるのではないかと考え、特許を出願している⁽²⁾。1990 年初頭には、透過光を用いた生体イメージング技術の研究の中で、個人認証への応用の可能性も指摘された⁽³⁾。1997 年には、韓国の BK Systems 社が静脈認証として初となる手の甲の静脈による製品を発表し⁽⁴⁾、追いかけるように米 Advanced Biometrics 社も手のひらの静脈を用いた製品の発表を行っている。90 年代後半は、競うようにして静脈認証の研究が行われ、手の甲、手のひら、指の 3 方式が相次いで実用化に至った。

この時期、静脈認証が同時多発的に注目されたのは、当時主流の指紋認証や顔認証で見えていた課題に対して、正面から向き合える強みをもっていただけと考えられる。例えば、指紋認証は、小型で安価な製品を作れる反面、皮膚表面にある特徴であるため、手荒れや傷によって簡単に特徴が変化し、認証ができなくなることも多い。それに対し、静脈認証は、体内にある生体特徴であって傷つきにくく、しかも可視光下では観測することができないので容易に盗まれないという特長がある。また、顔認証は、顔をカメラに向けるだけで認証できるという手軽さが強みである。しかし、同一人物でも表情一つで見た目が大きく変わる一方で、逆に人間が見ても区別がつかないほど似ている双子を見分けなければならないなど本質的な難しさがある。特に深層学習が登場する以前の顔認証は精度に関して大きな課題

を抱えていた。これについては、その後、最高水準の顔認証技術を作り上げた NEC の今岡氏もその著書で当時を述懐している⁽⁵⁾。これに対し、静脈は、その形作るパターンが双子であっても形状が大きく異なるため、原理からして高精度な個人識別を実現しやすい。

このように、基本特性に優れた指静脈認証であるが、そのポテンシャルを引き出し、広く社会のあちらこちらで使えるレベルに仕立て上げるには、以下に述べていく研究開発の積み重ねが必要だった。

4. 研究開発から社会実装へ

4.1 開発史概観

指静脈認証の開発史の概要を図3に示す。開発のフェーズは大きく四つに分けられる。最初が基本原理の確立までの基礎研究のフェーズである。次が実環境でも安定して使えるよう技術を磨いていく製品化フェーズ、そして利便性向上など商品力を高め展開先を広げる拡大展開フェーズが続く。最後に、多くの人々が不安なく利用できるようにする社会実装フェーズである。指静脈認証の研究開発では、各フェーズに合わせた技術開発を推進し、2002年の入退管理向けの製品化で生体認証市場での足場を作り、2004年発表の新製品で金融機関での大型採用を決めるなど、市場からのフィードバックを得ながら、段階的にフェーズをシフトしていった。

4.2 基本原理の確立—世界初の実用化

指静脈認証の研究は、1997年に日立の社内横断プロジェクトとして始まった。当時、インターネットの商用利用が急進しており、将来的にネットバンキングなど高度な個人認証が重要になると予見し、その必須技術を先取りして押さえておくという目的で生体認証の研究プロジェクトが発足した。このとき、指紋認証などについては、既に社内でも検討していた部署があったため、既存の方式とは異なる生体認証方式を考えようということ、光や超音波を使った生体の計測技術の研究チームが参加した。

このチームでは、1988年から光CTの研究を行っていた。

CTとは、Computed Tomography、すなわちコンピュータ断層撮影の略語で、特にX線を用いた検査装置は、人体を輪切りにした画像が撮影でき、切開せずに体内の臓器などの状態を診断できる、現代医療に欠かせない機器となっている。一方で、X線は被ばくの悪影響が懸念されるため、安全な可視光や近赤外光を用いる光CT技術への関心が高まっていた。しかし、X線と光では生体内での進行特性が大きく異なることもあって、光CTの研究は苦戦した。X線の場合は、体内をまっすぐ貫通するので、X線が通った経路から体内状況の推定がしやすい。一方の光の場合は、体内で散乱するため、同様の推定は難しかった。そのため、チームとしては、せっかく培ってきた光計測の技術を、難航する光CT以外にも活用できないかと考え始めていた。そこに、ちょうどプロジェクトの発足が重なった。ちなみに、このとき検討されていた活用対象としてはほかに光脳機能計測(NIRS: Near-infrared spectroscopy)もあり、こちらも後年、光トポグラフィとして事業化に成功している。

こうして光計測技術の蓄積が活かせる生体認証の模索が始まった。CTという医療分野の研究チームだけに、生体に関する医学的知見もあり、認証に使えるような生体特徴を探すことは難しくなかった。このときプロジェクトとして合意していた方向性は、ネットバンキング向けに使えるよう情報機器との親和性を重視し、小型で比較的安価に作れる装置の実現だった。そこで最終的にターゲットに選定したのが、指の静脈だった。静脈の撮影には、光計測技術が活かせるうえ、指ぐらゐのサイズの生体部位を計測するのであれば装置も小型になる。こうして目標が定めれば、指静脈の撮影までに多くの時間はかからなかった。光CTのときは異なり、指の静脈は皮下の浅い部分にあるので、散乱の影響が小さく、静脈だけが対象なら撮影は比較的容易だった。しかしながら、そこから個人認証が可能になるまでには想定以上に長い時間を必要とした。撮影できることと認証できることとの間に、大きなギャップがあったためである。

指静脈認証は、生体計測と画像認識の融合技術である。しかし、この時期は視座が計測側に大きく寄っていた。計測においては、普通には見えないものを可視化することに価値があり、静脈をいかに鮮明に精細に映し出すかが重要だった。ところが認証となると、それだけでは済まない。相手は生体というナマモノである。生体自体も揺らいでいるし、指のかざし方一つでも静脈の見え方が変わる。そうした変化を踏まえた静脈パターンの一致判定ができなければ、静脈を幾ら鮮明に計測できても認証には至らない。至るためには、静脈を余さず撮影することより、再現性の高い情報をいかに引き出すか、すなわち画像認識の視座が強く求められていた。

そして2000年に至り、指静脈認証の開発に画像認識を専門とする研究チームが参画することになった(図4)。当時、日立の中央研究所には、同じ敷地内に様々な専門分野の研究者が集まっていた。毎年開催されていた社内の研究発表会などを通じて異分野の研究者どうしが互いの技術に触れ、議論する機会も多々あったし、部署対抗のスポーツ大会といったイベントで部署の垣根を越えて交流することも珍しくなかった。画像認識チームの参加は、そうした異分野交流で培われた人間関係を通じて、困っ

年代	1997	2000	2003	2004	2006	2025
開発フェーズ	基礎研究 基本確立	製品化 高精度化	拡大展開 利便性向上	社会実装 小型・大規模		
製品・試作	原理検証	指差込型	上方開放型	小型卓上型 情報保護	大規模対応複数指型	
日立の事業状況	指静脈認証実用化成功(世界初) (2000)	入退管理向け事業開始 (2002)	開放型発売(2004) 大手金融機関で採用決定(2005)	日立生体認証統合基盤サービス (2020)		

図3 指静脈認証の開発史

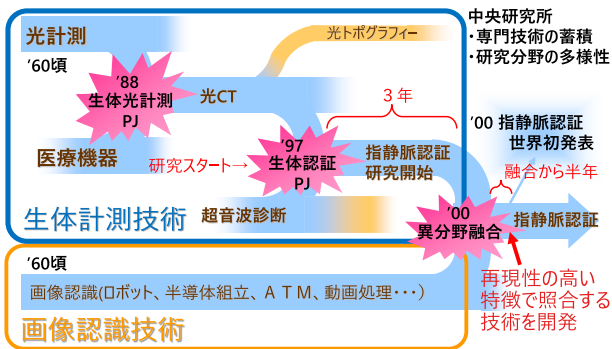


図 4 計測 × 認識の融合

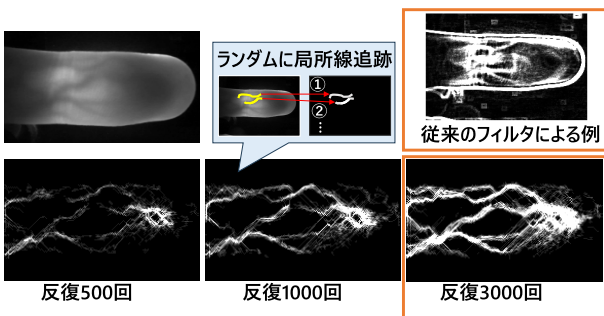


図 5 多点反復線追跡に基づく静脈抽出

ているなら協力しましょうの精神で、流れるように決まった。画像認識の研究者が加わったことで、認証がうまくいかない理由が、画像解析の過程で次第に明確になっていった。特に深刻な問題だったのは、撮影画像に明るさのムラや局所的に不鮮明な部分が存在し、それらが変動することだった。静脈の安定抽出には、そうしたムラの影響を受けにくい手法である必要がある。そこで考え出されたのが、図5に示すように、全体にムラがある画像中でも十分に均一とみなせる局所的な範囲について、その範囲内での相対的な静脈らしさに着目して抽出する方法である⁽⁶⁾。上記範囲を画像内でランダムに変えて何度も静脈抽出を繰り返し、その結果を累積することで、最終的に静脈パターン全体を浮かび上がらせる。条件を変えて多数回反復することで、ある範囲では抽出ミスがあったとしても統計的に補われて安定な抽出結果が得られる。これにより、従来のフィルタによる静脈抽出に比べても潰れの少ない良好な結果が得られるようになった。本手法をまとめた論文は、静脈認証研究の先駆として現在までに千件を超える引用がある。

このような認識手法の開発と同時に、認識チーム側から提案して行ったことがある。指の静脈画像の大量収集である。指静脈が生体認証として使えるのか実態を確認し、精度を客観的に評価するためには大量のサンプルが欠かせないとの考えからである。

そこで会社行事として毎年行われる集団健診を利用して大量のサンプルを集めることを計画した。健診場所である体育館には一度にたくさんの人が集まるので、そこに指静脈の計測装置を持ち込み、待ち時間にボランティアを募れば、容易にサンプルを採取できだろうと考えたのである。この目論見は当たり、その年、約700名分にも上る大量のサンプルデータの収集に成

功した。

この結果、協力者の誰もが静脈パターンをもち、形も異なることを確認できた。また、基準となる指静脈画像のデータベースが構築できたことで、以後の静脈抽出手法の検討において、手法の改善前後の精度比較が正確にできるようになった。これにより、手法検討のスピードも一気に加速した。データを集めることは認識技術の研究においては基本中の基本であるが、画像認識チームはそれを基本どおりに実行した形であった。

このサンプルデータは、計測チームとも共有した。計測側の研究者も画像認識側に踏み込んで手法検討を引き続き行い、2週間から1か月おきに、両チーム合同の検討会議が開催され、互いに進捗状況を報告し合った。この検討会議の存在によって、適度な競争意識も生まれ、より高い精度を目指す動機付けとなる一方、生体計測と画像認識の文化が交わり合い、互いの考え方に深みや厚みを加えていく好循環もできた。

かくして画像認識チームが参加して半年ほどで、指静脈認証は、指紋認証に匹敵する認証精度を達成するに至った。これは、前述の700名分の大量サンプルによる評価で定量的に検証された。これが、指静脈認証が世界で初めて認証技術と称せるだけの実用水準に到達した瞬間だった。そして2000年9月、読売新聞夕刊に「指紋より“静脈紋”」の見出しで技術内容が紹介された。

4.3 高性能化への挑戦—世界最高水準の精度達成

指静脈認証の新聞発表の後、日立社内の各部門に外部から問い合わせが相次いだ。こうした反響が追い風になり、製品化に向けた気運が急速に高まっていった。

しかし、従来にない特長は確かに注目を集めたものの、そこから製品まではまだ大きな隔りがあった。認証を行う指をどのようにしてかざすのか、誰でも使える操作性になっているのか、応答時間はどれくらいか、などなど、実際に使ううえで必要な機能について検討すべきことは多々残されていた。それも、単に「使える」だけでなく「これを使いたい」と思わせるだけの魅力と完成度がなければ、市場では容易に受け入れられないと考えられた。それらを見極め、課題を明確化し、技術に落とし込んで解決していくことが研究者にも求められた。

課題の明確化にあたっては、様々なアプローチを駆使して真の課題に近づこうとした。主には、(1) 仮説検証、(2) 実験検証、(3) 顧客検証、の三つである。

(1) は机上での思考実験であり、可能性のある課題を原理に鑑みて仮説として導き解決していく、研究としては王道というべき進め方である。(2) は自分で使い倒してみることであり、開発技術を実際に運用し、そこから抽出された新たな課題をボトムアップに解消していく方法である。(1) だけでは気づきにくい問題点が見える。その具体例の一つとして、認証装置を自作し、研究室の扉に取り付けて運用を行った。入室の際に毎日毎回使用することで研究者自身が精度や使い勝手を体感した。自分で使っていないと、外から貴重な知見を得ても真には理解できないことがあり、それを防ぐ意味もある。また同様に気づきにく

い課題を洗い出すため、データの拡充にも力を入れた。健診に合わせたデータ収集を3年間継続実施し、静脈パターンのリアルな経時変化や技術改良の効果を確認するとともに、製品化事業部の側でも追加の収集を行って条件の多様化を図った。

そして(3)は購入する側の意見を広く集めることである。とりわけ導入の決定権をもつステークホルダーに意見を請い、導入決断のための条件や横展開の可能性を引き出し、新たな課題を抽出した。そこで心掛けたのは、研究者自身が顧客先に向いて直に意見を聞くことである。又聞きでは現場の生の感覚は伝わってこない。更には持ち運び可能な小型のデモ用装置を自作し、客先での実演も行った。動くものを見せると、発してくれる言葉がより具体的なものになる。また同じ狙いで、展示会へも積極的に出展した。幅広いバックグラウンドをもつ人が集まる展示会で研究者自身が説明することで、新技術に対する一般の人々の見方、使い勝手の印象など率直な感想が得られた。研究者だけでは知りえない知を引き出すことができ、これも一種の総合知といえよう。

以上の取り組みにより、製品化にあたって、何に挑戦し、何を優先的に解決すべきなのか、目指すべき目標が明確に定まった。このとき掲げた目標は次の3点である。

- (a) 迷わず使える操作性
- (b) 誰もが利用可能なこと
- (c) 圧倒的な基本性能

最初の(a)は、優れたユーザインタフェースとそれを可能にする装置デザインである。そして、それらが生体計測の原理とも整合する必要がある。日立の研究所内には、家電をはじめとする各種製品の意匠を手掛けるデザイン部門も同居し、デザイナーとも容易に話ができる環境にあった。試作機の自作にあたっては、デザイナーとも協力しながら、指静脈撮影用の光源とカメラが正しく取り、指も置きやすいデザインを考えていった。最初の原理検証用の装置は、剥き出しのカメラと光源の間に指を入れるだけの簡素な構造で、指を支える治具も申し訳程度のため、人によって置き方が定まらない代物だった。まずはそのままの構造で小型化し、若干見栄えのするきょう体に収めた試作機を作り、上述の顧客訪問や展示会への出展を実施した。そこで得た意見や自ら使ってみて感じた使いにくさをフィードバックし、次の試作機のデザインに反映させていった。このとき、きょう体内に入れてしまう回路基板などは、見た目よりも機能で研究者自身が設計・製作するなど、とにかく素早くカタチにすることを心掛けた。いわゆるラピッドプロトタイピングであり、カタチにして試してみても初めて見える課題も多々あって、一つのプロトができるたびに加速度的に完成度が高まっていった。最終的にできた試作機の基本構造は、現在の製品にもほぼ変わらずに受け継がれている。

次の(b)は、静脈を映し出す計測性能の強化に関わる。(a)を満たしつつも、誰の指であっても安定に静脈を撮影できなくてはいけない。これについて実は事件が一つあった。前述した多様な実験データの蓄積の成果というべきか、当初の計測方式では人によって静脈がどうしても淡くボケたようにしか映らないケースがあることが分かった。計測チームで対策方法を種々検

討するのだが、問題となった指はいつまでも映りの悪いままの日々がしばらく続いた。そんなある日、自分たちでも何かできないかと模索していた認識チームの側で発見があった。よくあるリモコンを指にあてて撮影すると静脈が鮮明に見えたのである。ちなみに、このリモコンは、画像認識の研究設備として使っていたビデオデッキの付属品であり、研究室に日常的に置かれていた。それを手に取り、光源替わりに指にあて、静脈を映してみれば、その見え方が違うことが分かった。リモコンは近赤外光を発する。しかし、試作機で採用していた光源とは波長が大きく異なっていた。気付いてしまえば、その違いが原理的にも静脈を鮮明に撮影する鍵であることが分かり、一気に問題は解決した。異分野融合は、一方の分野では玄人、他方では素人という研究者が協力しあう場である。玄人部分を合わせ、いいとこ取りするのが本来の趣旨だが、上記のように、素人が玄人側に踏み入って自由な発想で行動することで何かが起きることもある。そうした偶発的な何かをもたらす苗床としての可能性も、異分野融合のもつ価値といえるかもしれない。

最後の(c)は、言い訳のない高い基本性能を達成することである。既存の生体認証がひしめく中で新規参入組が勝ち抜くには目新しさはもちろん基本性能でも圧倒的な優位性が不可欠となる。そこで、世界最高レベルの精度と応答速度の達成を目標とした。精度については、試作装置運用時のデータや2002年に発売した第一号製品の評価を分析、認証阻害要因の究明と対策を行った。そこで分かったのは、寒暖や喫煙による静脈の膨張収縮や装置への指の置き方のばらつき、指の太さの個人差によって、撮影される静脈画像が一律ではないことだった。そこで、膨張収縮に影響されずに静脈の中心線を安定に捉えられる手法を新たに考案した(図6)。静脈を横切る画素列の輝度変曲率に着目することで、ムラのある静脈撮影画像に対しても安定に中心線を求めることができる⁽⁷⁾。また、前述の計測方法の改良により静脈が鮮明に得られるようになったことで、静脈抽出を何度も繰り返して安定性を高める必要性が薄れ、高速化にもつながった。高速化では、照合処理にも手を入れ、静脈パターンを静脈・背景・不定の3値でビットマップ表現することにより、パターンの変動を許容しながらビット演算を用いた高速照合を実現した。これによって、千人が登録しても0.1秒で瞬時に応答可能となった。このとき生まれた認証手法は、その後、第三者機関である米 International Biometric Group による公開テストでも高い性能が認められ、世界最高水準との評価を得た。

そして2003年9月、新技術を搭載した指静脈認証装置が発売された。本製品は、主に入退管理向けで、従来の指紋認証の置き換えをはじめ、好調なセールスを記録した。その高い性能が

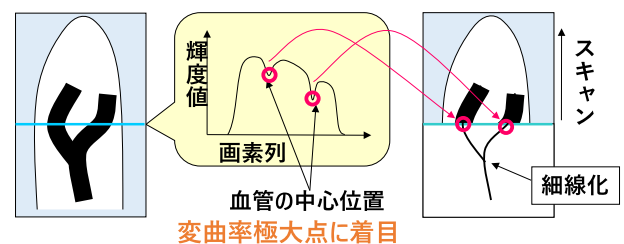


図6 輝度変曲率に基づく静脈抽出

口コミでも広がり、新規需要も取り込んで、2004年度には先発の手の甲方式を抜いて静脈認証部門で市場シェアトップとなり、間もなく生体認証全体でも国内トップシェアを獲得した（富士経済グループの調査による）。

4.4 利便性の強化—金融機関での採用へ

2003年1月に施行された本人確認法による金融機関での本人確認強化の義務付けや、偽造カードによる不正預金引出しの被害増加が深刻な社会問題となり、2003年末頃から、金融機関での生体認証導入の気運が高まっていった。日立としても金融分野を新たなビジネスタargetに設定した。

入退室向けで成功を取ってきたこともあり、追い風を感じつつの商戦参入であったが、金融機関側の反応は今一つ芳しくなかった。理由は、指静脈認証の独特の装置形状にあった。認証性能を優先し基本原理に忠実な形状としたため、装置の中央部分に設けた狭い空隙に指を差し入れて認証を行う形になっていた。その、狭いところに差し入れる操作に抵抗感をもつものではないかと懸念されたのである。

それまでターゲットとしてきた入退管理の市場では、多くは会社の方針で導入が決まり、利用者はその社員という形だった。ステークホルダーは管理者であり、精度が高く、不具合が少ないことに高い訴求力があつた。実際、そうした意見に応える形で研究開発を進めてきた。穴に入れる構造も、光計測における外光の影響を排除できるため、安定な運用のために積極的に採用したものだった。一方、今回の用途では、利用者は自社の社員ではなく、そのお客様であり、利用に抵抗を感じさせてはビジネスにも支障が生ずる。つまり、市場の特性の違いが、訴求していくべきポイントを根本から覆していた。

そこに、手強い競合相手が現れた。2003年に富士通が発表した非接触型手のひら静脈認証である。この新たな静脈認証は、静脈パターンを使って認証する点では指静脈認証と共通だが、大きな違いは、何もない宙に手を浮かせて認証が行える「非接触」を当初打ち出していたことだった。開放的で見た目の印象に優れるこの製品は強力なライバルとなり、指静脈の苦戦を尻目に、あれよあれよという間に金融ATM向け生体認証の導入第一号を勝ち取った。

この敗戦は、指静脈陣営にとって方向性を考え直すよい機会となった。何をすれば顧客が欲しいと思うのか、競合相手が明確化してくれたともいえたからである。協創に限らず、このような競争によって知が共有されることもまた総合知のあり方の一つなのだろう。

克服すべき課題が明確になったことで、水面下で基礎研究を進めていた新技術に白羽の矢が立ち、この機に製品化されることが決定した。上方開放型の指静脈認証技術である。従来の穴に入れる構造から、何もない上方から指をかざすだけの開放感のある構造に転換し、指ならではの設置場所を選ばない小型サイズも実現した。

この開放型の開発にあたっては、競合相手のやり方に安易に迎合し、自らの強みを失うことのないよう気を配った。指静脈

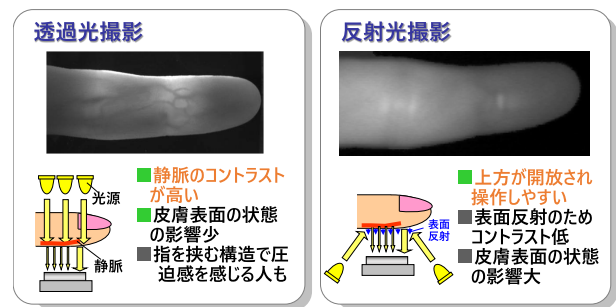


図7 透過光方式と反射光方式の違い

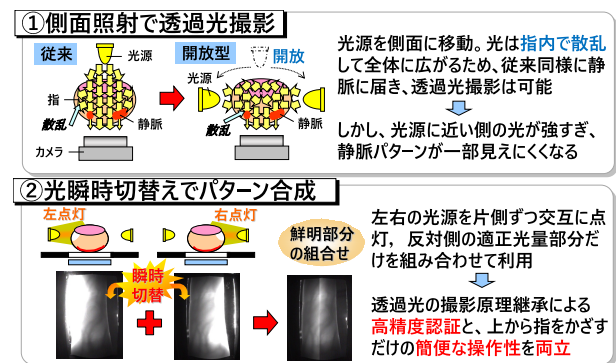


図8 開放型指静脈認証技術

認証も同じ静脈認証であるので、同じ装置構造にすれば、手のひら方式のような高い開放感を容易に実現できた。しかし、その場合、指静脈認証の高い精度を支えてきた透過光撮影方式が使えなくなるという問題点があつた。透過光撮影方式は、図7に示すように、指の背面から光を照射し、透過してきた光をカメラで撮影する静脈計測方式である。一方、手のひら静脈認証が採用したのは反射光撮影方式で、カメラと同じ側から光を照射し、手のひらで反射して戻ってきた光をカメラで撮影する。光源とカメラを同じ側に配置できるので上方が開放される特徴がある。ただし、反射光方式は、照射した光の多くが皮膚表面で反射してしまい、皮下まで入って戻ってくる静脈観測用の光が相対的に弱くなる。そのため、静脈のコントラストは低くなり、皮膚表面の手荒れなどの影響も受けやすい。訴求点が異なるとはいえ、指静脈認証のアイデンティティである高精度を手放すことは避けなかった。

そこで透過光撮影と上方開放を両立させる方法を様々に模索した。そうして誕生したのが、側面照射開放型指静脈認証技術である（図8）。光源を側面に移動して上方を開放、指には横から光を当てる。このとき、光は指内で散乱して全体に広がるため、従来同様に腹側の静脈まで届き、透過光撮影が可能になる。光CTの研究で苦しめられた光の散乱を逆手にとった形である。しかし、まだ問題がある。開放感を高めるために、光源を低い位置、すなわち指の真横に配置すると、カメラで撮影した指の画像は、光源に近い側の光が強すぎ、静脈パターンが一部見えにくくなる。そこで、左右の光源を片側ずつ交互に点灯して2枚撮影し、光源の反対側の適正光量部分だけを組み合わせることで、静脈パターン全体を得ることを考えた⁽⁸⁾。これにより、透過光の撮影原理継承による高精度認証と、上から指をかざすだけの開

放的で簡便な操作性を両立することが可能になった。この技術は、平成 19 年度の全国発明表彰において文部科学大臣発明賞を受賞している。

一方、金融機関のような、老若男女様々な人々が使う公共向けの技術として、改めて検証すべきことがあった。静脈認証は生体認証方式として新しく、生体認証の 3 要素である普遍性・唯一性・永続性については、生体に対する一般的な知見と採取データからの統計的知見に大きく依拠していた。そこで大学の医学部と連携し専門的な見地からの検証を行った。例えば、血管の形成は個体発生過程における確率的な環境要因によって進み、遺伝的要因は末梢に行くほど少なくなるため、指静脈パターンは万人が異なる、認証が対象としている血管は血流が常時確保されており加齢に伴い消失することはない、などである。実際、金融 ATM に搭載された認証装置は、導入から 20 年近く経った今でも、筆者が導入後まもなく窓口で登録したデータでそのまま利用できている。

また、企業とは無関係な第三者機関による公正な精度評価が重要との観点から、2006 年に横幹連合と日立の間で調査委託契約を締結した。横幹連合は、文理にまたがる 40 を超す学会が、自然科学と並ぶ技術の基礎である「横断型基幹科学」の発展と振興を目指して団結して誕生した団体である。この契約に則り、指静脈パターンの相互距離の分布から、指静脈パターンの多様性の高さと個人認証への適用性が統計学的に検証された⁽⁹⁾。

かくして競合相手に負けない強みを技術開発と連携によって磨き、2004 年 3 月、開放型のプレス発表を大々的に行った。テレビ取材にも対応し、積極的な情報発信で指静脈認証の認知度向上に努めた。営業活動にあたっては例によって研究者も同行、技術内容のプレゼンと質疑応答、試作機によるデモ実演でサポートを行った。

そして 2005 年 1 月、慎重に導入を検討してきた複数のメガバンクが一斉に指静脈認証の採用を決定したとの観測記事が新聞一面を賑わせた。3 月には公式に発表され、メガバンクでの勢力図が確定した。これにより生体認証付 ATM の市場シェアは 1 年で激変した。初年度の 2 割強から 2008 年には 8 割超に急伸し、指静脈認証は金融 ATM 向け生体認証のデファクトスタンダードといえるまでになった。

4.5 安全性の強化—社会インフラへ

金融機関での大型導入によって指静脈認証の公共適用への道が大きく拓けることになった。社会の IT 化が加速しサイバー犯罪やテロ脅威が深刻化する中で、社会インフラの安全を確保する手段として、指静脈をはじめとする生体認証はその重要なピースになると考えられた。そこで 2007 年、安心安全な決済を目指し、大手クレジットカード会社と組んで「指静脈マネー」の実証実験を行い、先進的な試みとして海外からも注目された⁽¹⁰⁾。利用者は店舗のレジなどで指をかざすだけで支払いができ、カードの偽造や現金の盗難の心配なしに買い物ができる。

しかし、このサービスは思うようには広まらなかった。その反省を踏まえ、生体認証が社会インフラとして広く使われるに

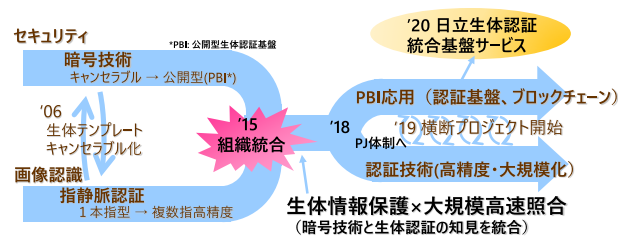


図 9 セキュリティ × 認識の融合

は、次の三つの課題があると分析した。

- (1) 様々なサービスからの共通利用
- (2) 生体情報のプライバシー・セキュリティの確保
- (3) 認証時の利便性の向上

(1) に関し、多くの生体認証システムは、生体情報を単一のシステム内で管理することで安全性を確保している。しかし、このモデルでは複数のサービスシステムで生体認証を使う際に、システムごとの生体情報登録が必須となる。この登録の手間が生体認証普及の阻害要因の一つとなっており、様々なサービスから共通利用可能な認証基盤が必要と考えられた。たくさんの方が共通利用する大規模な認証基盤となれば、それだけ不正のリスクも増える。究極の個人情報といえる、かけがえのない生体情報を不正から徹底して守る必要がある。それが上記の (2) である。最後の (3) が、誰もが迷わずに使いこなすことができ、ストレスなく反応が得られる使い勝手の良さである。特に、大人数が登録している中でも瞬時に本人かどうかを見分ける高速応答性は欠かせない。

上述のような生体情報の安全性を確保するためのセキュリティ技術は、計測とも認識ともまた分野を異にする技術領域である。暗号処理やそのシステム構築に専門的な知識が必要であり、指静脈認証の研究開発においても早くからセキュリティの知見をもつ研究チームが関わり、将来を見据えて検討を行っていた (図 9)。例えば、2005 年頃には、単なる情報の暗号化にとどまらず、仮に指静脈認証の登録データが流出することがあっても、流出したデータを無効にできるキャンセラブル認証技術⁽¹¹⁾を開発し、2010 年には世界初の実用化を達成している。その流れを汲む研究チームが、上記課題を捉えて新たに提案したのが、テンプレート公開型生体認証基盤 PBI である⁽¹²⁾。

PBI は、広く知られている公開鍵暗号基盤 (PKI: Public Key Infrastructure) をベースに、生体情報を復元不可能な形に変換し、公開鍵として利用することで、生体情報を安全に集中管理可能にする技術基盤である (図 10)。従来の生体認証では、暗号化はするものの、生体情報自体は保存されるため、暗号化キーが解読されると生体情報に戻され、悪用されるリスクがある。PBI では、漏洩したとしても生体情報そのものではないので悪用はできず、さまざまなサービスからの共通利用を安心して行える。尚、生体情報は、観測条件によって変動が生じやすく、認証ごとにデータにゆらぎがある。PBI では、ゆらぎを含む生体情報からゆらぎのない安定した鍵を抽出することで、生体情報に一定の誤差を許容して本人かどうかを判定できるようにしている⁽¹³⁾。

この PBI を擁する研究チームと認識チームとが 2015 年に組織として統合されることになった。セキュリティ関係の人材を

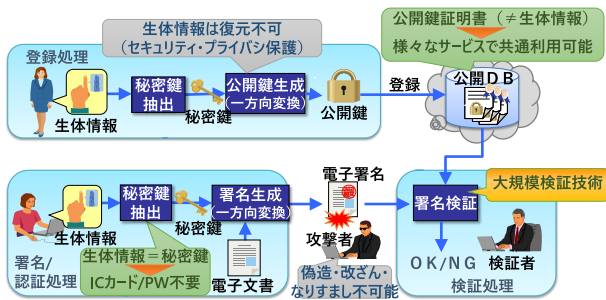


図 10 公開型生体認証基盤 (PBI)



図 11 複数指静脈認証装置 C-1

まとめという社内組織改編だったが、これを機に社会インフラを目指した生体認証基盤の確立という方向性を明確にし、それに向けた技術開発を加速した。その後、組織としては2018年にまた分かれるものの、2019年には事業部も含めた社内横断プロジェクトを始動し、緊密な連携は続いた。特に、大規模認証に向けた技術開発が、一体感をもって進められた。

大規模生体認証において課題となるのは、用いる生体特徴が大人数を見分けられるだけの十分な情報量をもつことと、大人数の生体特徴を高速に照合できることである。前者については、1本の指を使うだけでも高い精度を有する指静脈認証を、複数指分使うことで更に高精度化する新技術を開発し、製品化につなげた(図11)。本技術では、誰でも使える操作性を重視し、使う指が増えても操作が煩雑にならないよう、指をまとめて1回かざすだけで認証できるようにした。ただし、従来からの透過光方式では、まとめてかざした指の1本1本について適切に光を透過させて撮影することが難しいため、新たに二波長同時照射型の反射光方式を開発した。この方式では、赤外と可視の二波長の光を指に同時照射し、分光処理により生体表面の情報を分離して静脈パターンの高感度計測を可能にした。これにより、精度と操作性の両立を実現した。生体特徴の撮影方式の変更や複数指化ではPBI側の対応も必要だったが、技術の基礎検討段階から連携できたことで効率的に開発が進められた。

一方、後者の高速照合については、安全性を高めたPBI照合においては、1件あたりの処理時間が小さくなく、100万人といった規模で照合を行うと応答が大幅に遅くなるという課題があった。そのため、登録された膨大な生体情報の中から、何らかの高速な手段を使って照合対象を適切な数まで絞り込む必要が

ある。そこで、認識チームは指静脈の生体特徴の観点から、PBIチームは安全な高速絞り込み方法の観点から知をもち寄り、生体情報保護と高速処理を両立させる技術を開発した。

そして2020年、生体認証を業種の垣根を越えて共通利用できる日立生体認証統合基盤サービスが始まった。来るべきデジタルアイデンティティ時代の共通基盤となることを目指し、現在、先進顧客と協力しながら社会実装を拡大しているところである。2022年の東京都内のホテルにおける、ワクチン接種証明まで一度の認証でできるチェックインの実証実験や、福島県での「手ぶらキャッシュレス実証事業」などを経て、2024年には大手鉄道会社と連携し、スーパーやホテル、電器店、コンビニ、鉄道などの異業種横断の手ぶら決済の本格運用が始まり、2025年には対象店舗の拡大がアナウンスされた。

5. まとめ

本稿では、指静脈認証の開発を例にとり、技術の創生から社会実装に至るまでの様々な挑戦を、総合知、すなわち知の融合の観点から考察しつつ解説した。生体計測と画像認識の融合による世界初の指静脈認証の実用化から、内外から集めた知と、技術の徹底的な掘り下げによる使いやすく高精度な製品の開発、価値観の異なる市場での競争から学びを得た開放型認証技術の開発と金融機関での採用、そして更なる社会実装の拡大を目指しセキュリティ技術と融合して実現した大規模生体認証基盤サービスまでの流れを概説した。

こうして振り返ると、自前主義を捨て、広く外に知を求めて一丸となったときにブレークスルーを勝ち取ってきたように思う。古来、兵法でも、勝つためには「天地人」、すなわち「天の時、地の利、人の和」が備わることが重要であり、その最たるは「人の和」だと説く。異なる知見をもった人々が、天の時を見誤らずにタイミングよく結集し、それぞれの強み、すなわち地の利を、和をもって遺憾なく発揮すれば、勝利は間違いないだろう。総合知を活かし、イノベーションへと導くための鍵は、そのあたりにあるのではないか。

文 献

- (1) 内閣府、第6期科学技術・イノベーション基本計画、<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index6.html>, 2021.
- (2) J. Rice, "Method and apparatus for the identification of individuals," 英国特許出願 8407249 号, 1984.
- (3) 清水孝一, "光による生体透視—光CTとイメージングの可能性," 病態生理, vol.11, no.8, pp.620-629, 1992.
- (4) A.H. Choi and C.N. Tran, "Hand vascular pattern technology," Handbook of Biometrics, pp.253-270, Springer US, Boston, MA, 2008.
- (5) 今岡仁, "顔認証の教科書," プレジデント社, 東京, 2021.
- (6) N. Miura, A. Nagasaka, and T. Miyatake, "Feature extraction of finger-vein patterns based on repeated line tracking and its application to personal identification," Machine Vision and Applications, vol.15, pp.194-203, 2004.
- (7) N. Miura, A. Nagasaka, and T. Miyatake, "Extraction of finger-vein patterns using maximum curvature points in image profiles," IEICE Trans. Inf. & Syst.,

vol.90, no.8, pp.1185–1194, 2007.

- (8) 長坂晃朗, 宮武孝文, 三浦直人, 鹿志村祐一, “個人認証装置及び個人認証方法,” 日本国特許, 第 3770241 号, 2006.
- (9) T. Yanagawa, S. Aoki, and T. Ohyama, “Human finger vein images are diverse and its patterns are useful for personal identification,” MHF Prepr. Ser., vol.12, pp.1–7, 2007.
- (10) E. Strickland, “Blood and money,” IEEE Spectrum, vol.49, no.6, pp.36–41, 2012.
- (11) K. Takahashi, “Unconditionally provably secure cancelable biometrics based on a quotient polynomial ring,” International Joint Conference on Biometrics (IJCB 11), 2011.
- (12) 加賀陽介, 松田友輔, 高橋健太, 長坂晃朗, “安全・安心・便利な社会を実現する生体認証基盤,” 日立評論, vol.97, no.06-07, pp.362–363, 2015.
- (13) K. Takahashi, T. Matsuda, T. Murakami, and G. Hanaoka, “Signature schemes with fuzzy private keys,” International Journal of Information Security, vol.18, pp.581–617, 2019.

(BioX 研究会提案, 2025 年 5 月 23 日受付,
2025 年 6 月 26 日再受付)



長坂晃朗 (正員: シニア会員)

1989 北大・工・電気卒, 1991 同大学院修士課程了。同年(株)日立製作所中央研究所入社。以来, 映像認識, 生体認証, AI などの研究に従事。現在, 同社研究開発グループ先端 AI イノベーションセンター主管研究員, 博士(工学)。平成 8 年度学術奨励賞, 平成 19 年度全国発明表彰文部科学大臣発明賞, 平成 19 年度業績賞, 平成 21 年度文部科学大臣表彰科学技術賞, 2017 マイルストーン各受賞。電子情報通信学会バイオメトリクス研究会 (BioX) 専門委員。

Software-Defined Vehicle (SDV) におけるセキュリティ課題とその展開

Security Issues and Evolution in Software-Defined Vehicle (SDV)

倉地 亮 Ryo KURACHI

アブストラクト Software-Defined Vehicle (SDV) は、ソフトウェアによって機能が定義される次世代自動車であり、そのアーキテクチャはゾーン型へと移行しつつある。本稿では、まず従来型車両との構造的な違いと、SDV を支える仮想化、マイクロサービス、OTA といった技術基盤を解説する。次に、コネクティビティの増大やサプライチェーンの複雑化に伴い拡大するサイバー攻撃の脅威を分類し、具体的な攻撃シナリオを論じる。その上で、SBOM による構成の透明化、Uptane や in-toto を用いたサプライチェーン全体の信頼性確保、HSM/TEE といったハードウェアセキュリティに至る多層的な対策技術を詳述する。最後に、UN-R155 などの国際標準への対応や DevSecOps 体制の構築といった産業的課題と今後の展望を考察する。

キーワード ソフトウェア定義車両、自動車セキュリティ、ゾーンアーキテクチャ、サプライチェーンセキュリティ、SBOM、Uptane、ISO/SAE 21434

Abstract The software-defined vehicle (SDV) is a next-generation automobile whose functions are defined by software, with its architecture shifting towards a zonal structure. In this paper, we first explain the structural differences of SDV from conventional vehicles and the enabling technologies it such as virtualization, microservices, and over-the-air (OTA) updates. We then categorize the expanding cybersecurity threats arising from increased connectivity and supply chain complexity, and discuss specific attack scenarios. Furthermore, we detail multilayered countermeasures, including transparency with Software Bill of Materials (SBOM), ensuring supply chain integrity with Uptane and in toto, and hardware security with HSM/TEE. Finally, we consider industrial challenges and future prospects, such as compliance with international standards like UN-R155 and the establishment of a DevSecOps framework.

Key words Software-defined vehicle, Automotive security, Zonal architecture, Supply chain security, SBOM, Uptane, ISO/SAE 21434

1. はじめに

近年、社会全体でのデジタル化が急速に進展する中、自動車産業においても 100 年に一度の大きな転換期を迎えている。この変化の原動力になっているのが、Connected (コネクテッド)、Autonomous (自動運転)、Shared/Service (シェアリング/サービス)、Electric (電動化) の頭文字を組み合わせた CASE と呼ばれる新たな潮流である。従来の自動車は、ハードウェア中心の設計思想のもと、電子制御ユニット (Electronic Control Unit, ECU) ごとに専用の機能を担い、それらを組み合わせて車両全体の動作を実現する分散型のリアルタイムシステムとして発展してきた。しかし、CASE に代表されるような高度な機能を実現するためには、従来のアーキテクチャでは限界がある。その

ため、車両全体をソフトウェアによって統合的に制御・管理する Software-Defined Vehicle (SDV) という概念が、近年急速に注目を集めている。

SDV とは、車両の機能や性能の多くをソフトウェアで柔軟に定義・制御できるようにしたアーキテクチャのことである⁽¹⁾。これは単なる ECU の統合や機能追加の枠を超え、ソフトウェアを中核としたプラットフォーム設計への転換を意味する。この転換により、機能のアップデートが走行中の車両にも適用可能となり、パーソナライズされたユーザ体験、継続的な性能改善、サービスタイゼーション (Mobility as a Service, MaaS) の実現が可能となる。例えば、従来の車両では、新しい機能を利用するためには販売店での部品交換や追加作業が不可欠であった。これに対し、SDV ではソフトウェアの更新のみで新機能を即座に導入できるようになる。このアプローチにより、車両の製品ライフサイクル全体を通じた価値の最大化が実現可能となり、ユーザの多様なニーズに応じたパーソナライズや各種サービスの柔軟な提供が期待されている。

SDV におけるソフトウェア中心のアーキテクチャは、車両の機能をより柔軟かつ迅速に拡張・変更できるだけでなく、複数車種間での機能共通化や機能移植も容易にする。これにより、開発

倉地 亮 正員 名古屋大学大学院情報学研究科
E-mail kurachi@necs.i.nagoya-u.ac.jp
Ryo KURACHI, Member (Graduate School of Informatics, Nagoya University, Aichi, 464-8601 Japan).
電子情報通信学会 基礎・境界サイエンス
Fundamentals Review Vol.19 No.2 pp.87-96 2025 年 10 月
©電子情報通信学会 2025

工数の削減や開発サイクルの短縮による開発コストの大幅な削減が期待される。実際に、一部の海外自動車メーカでは、このようなソフトウェア重視の開発体制を積極的に導入し、Over-the-Air (OTA) による機能強化やセキュリティパッチの迅速な適用など継続的な車両機能の改善が実用化されつつある⁽²⁾、⁽³⁾。

SDVの台頭により、自動車産業はソフトウェアエンジニアリング主導のビジネスモデルへとシフトしつつある。これは、従来のハードウェア完成品の一括販売から、クラウド接続型サービスや機能のサブスクリプション提供へと収益構造が変化していくことを意味する。このような変化は、自動車メーカに新たな機会とリスクの両面をもたらしている。更に、このようなソフトウェア主導の構成は、従来にはなかったセキュリティ上の課題を生み出している。車両が常時インターネットと接続され、クラウド基盤との通信や外部アプリケーションとの連携を行うようになることで、攻撃者にとっての侵入口 (Attack Surface) が飛躍的に増加する。特に、仮想化された実行環境、マイクロサービス、OTAによるソフトウェア更新といった新しい技術は、利便性を高める一方で、複雑なセキュリティ管理を要求することとなる。より具体的には、海外で報告された事例として、モバイルアプリ経由で車両ロックを解除された事例⁽⁴⁾や、OTA更新の不具合により機能不全を起こした事例がある⁽⁵⁾。また、クラウド上でホストされるアプリケーション群がマルウェアやゼロデイ攻撃に晒されることで、それを利用する複数の車両に波及的な影響を与える可能性もある。したがって、SDVの普及とともに、そのセキュリティ設計、運用、そして監視のあり方も抜本的な見直しが進められているといえる。

このような背景のもと、本解説論文では、SDVの基本概念と構成技術、それに伴うセキュリティリスクとセキュリティ強化技術について包括的に整理する。特に、SDVに固有のセキュリティ要求やその実装におけるトレードオフ、過去の攻撃事例と教訓、そして将来的な展望に焦点を当て、読者に深い理解を提供することを目的とする。

本稿は以下の構成で論を進める。第2章では、SDVの基本概念とアーキテクチャを解説し、従来型車両からの進化とそれがもたらす価値を明らかにする。続く第3章では、仮想化やマイクロサービス、OTAといったSDVを支える中核的な技術基盤と、それに伴う産業動向を掘り下げる。第4章では、本稿の核心であるSDVのセキュリティに焦点を当て、特有のリスクと、SBOMやUptane、ハードウェアセキュリティといったセキュリティ強化技術を説明する。そして第5章では、国際標準や業界連携、法的・倫理的課題といった、より広範な産業的課題と今後の展望を論じる。

2. SDVの基本概念と背景

2.1 従来型車両の構造と限界

SDVの革新性を正しく理解するためには、まず従来型自動車の構造とそこに内在する課題を把握する必要がある。現在の自動車は、「走る」「曲がる」「止まる」といった基本的な機能に加

え、エンジン制御、空調、運転支援システムなど、多くの機能が電子制御によって実現されている。以降では、この分散型ECUアーキテクチャの特徴と、その限界について概説した上、SDVの概念や特徴を説明する。

2.1.1 分散型ECUアーキテクチャ

従来型の車両では、機能ごとに独立したECUと呼ばれる電子制御ユニットを搭載するのが一般的である。例えば、エンジンを制御するECU、ブレーキを制御するECU、エアバッグを制御するECUといったように、特定の機能を実現するための専用のコンピュータが車両の各所に分散して配置されている。特に高級車では、その数が100個を超える場合も珍しくない。これらの無数のECUが協調して動作することで、車両全体の機能が実現されている。このアーキテクチャは、機能ごとに開発・検証が行えるため、特定の機能の信頼性を確保しやすいという利点があった。

2.1.2 車載ネットワークの役割と課題

分散配置されたECU群は、相互に情報をやり取りするために車載ネットワークで接続されている。その代表例がController Area Network (CAN)⁽⁶⁾である。CANは、比較的低速ながらも高い信頼性を特徴とし、長年にわたり自動車の標準的な通信プロトコルとして利用されてきた。エンジン制御やブレーキ制御など、特に高い信頼性が求められるシステムはCANで接続され、一方でカーナビゲーションやオーディオといった情報・娯楽 (インフォテインメント) 系のシステムでは、より高速な通信が可能な別のネットワークが用いられるなど、用途に応じて複数のネットワークが使い分けられている。

しかし、自動車の高機能化に伴い、この分散型ECUアーキテクチャは幾つかの深刻な課題に直面することになる。第一に、ECUの数が爆発的に増加した結果、それらを接続するワイヤハーネス (電線) も増え、重量とコストの増大を招いた。これは特に、燃費や航続距離が重視される電気自動車 (EV) において大きな問題となる⁽⁷⁾。第二に、機能の追加や変更が極めて困難であるという点である。新たな機能を追加する際には、ECUや配線の増設だけでなく、既存システムとの連携確認のために大規模な再設計と検証が必要となる。加えて、日本の道路運送車両法では、安全性や環境性能に関わる部分を変更する場合、原則として型式認証の取得や改造申請が求められてきた。このため、ソフトウェアによる性能向上や運転支援機能の拡張も容易ではなかった。ただし、2020年には制度改正が行われ、条件を満たせば、無線通信によるOTAによる機能追加・変更が法的に認められるようになった⁽⁸⁾。

2.2 SDVの概念と設計思想

前節で述べた従来型車両の課題を根本的に解決するために登場したのが、SDVという新しい設計思想である。SDVは、ハードウェアとソフトウェアを分離し、ソフトウェアを中心に車両の価値を創造することを目指す。

2.2.1 ソフトウェアが価値を定義する

SDV の最も本質的な特徴は、ソフトウェアがクルマの価値を定義するという点にある。これは、自動車の性能、機能、そしてユーザー体験が、もはやハードウェアの物理的な制約によってではなく、その上で動作するソフトウェアによって決定されることを意味する。例えば、保安基準・型式認証の範囲内であれば、モータの出力特性をソフトウェアで変更して加速性能を向上させたり、新しい運転支援機能を OTA で追加することが可能になる。これにより、自動車は購入後も継続的に進化し、ユーザーは常に最新の機能とサービスを楽しむことができるようになる。この成長するクルマというコンセプトこそ、SDV が目指す姿といえる。

2.2.2 ハードウェアとソフトウェアの分離

このコンセプトを実現するための鍵となるのが、ハードウェアとソフトウェアの分離（デカップリング）である⁽⁹⁾。従来型車両では、特定の機能は特定の ECU というハードウェアと密接に結びついていた。これに対し SDV では、汎用的な高性能コンピュータを車両に搭載し、その上で様々なソフトウェアを動作させるという、現代の PC やスマートフォンに近いアプローチをとる。これにより、ソフトウェアの開発とハードウェアの開発を独立して進めることが可能になる。ソフトウェア開発者は、ハードウェアの物理的な構成を意識することなく、新しいアプリケーションを開発し、迅速に車両に展開できる。この柔軟性と拡張性が SDV の革新性を支える基盤となる。

2.3 SDV アーキテクチャ全体像

SDV の設計思想を具現化するのが、Electrical/Electronic (E/E) アーキテクチャの刷新である。従来の分散型から、より中央集約的で階層化されたアーキテクチャへと移行する。その主流となりつつあるのがゾーンアーキテクチャである。

2.3.1 中央集約型 HPC とゾーン ECU

ゾーンアーキテクチャでは、車両全体を物理的な位置に基づいていくつかのゾーン（例えば、フロント、リア、左、右）に分割する。そして、各ゾーンにはゾーン ECU と呼ばれる比較的高性能な ECU を配置する。このゾーン ECU は、そのゾーン内に存在するセンサ（カメラ、レーダなど）やアクチュエータ（モータ、ライトなど）の入出力を集約し、基本的な制御を担う⁽⁷⁾。

そして、車両全体の頭脳として機能するのが、極めて高い処理能力をもつ High-Performance Computer (HPC) である。HPC はセントラルコンピュータ（あるいは、セントラル ECU）とも呼ばれ、自動運転や先進運転支援システム (ADAS)、インフォテインメントといった、高度で複雑な演算処理を要求されるアプリケーションソフトウェアを実行する。各ゾーン ECU から集約された情報は、高速な車載イーサネット（例えば、T1S⁽¹⁰⁾ や TSN⁽¹¹⁾）などを通じて HPC に送られ、HPC 上のソフトウェアが状況を判断し、ゾーン ECU に必要な指示を送ることで、車両全体の制御が行われる。

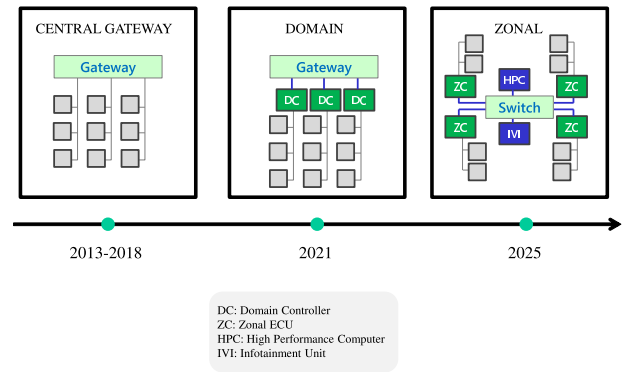


図1 BMW社におけるE/Eアーキテクチャの変遷⁽¹²⁾

2.3.2 ドメイン型からゾーン型へ

このゾーンアーキテクチャへの移行は、E/Eアーキテクチャの大きな進化を意味する。従来型アーキテクチャとゾーンアーキテクチャの中間的な形態として、ドメイン型アーキテクチャが存在する。これは、パワートレイン、シャシー、ボディ、インフォテインメントといった機能のドメイン（領域）ごとに、ドメインコントローラと呼ばれる高性能な ECU を配置して、そのドメイン内の ECU を統括する方式である。ドメイン型は ECU の集約を進めた点で一步前進であったが、依然として機能ごとにハードウェアが分かれているため、ドメインをまたがるような新機能の追加が難しいという課題があった。それに対しゾーンアーキテクチャは、物理的な位置に基づいてハードウェアを整理し、機能の実装は HPC 上のソフトウェアに完全に委ねる。これにより、ワイヤハーネスの大幅な削減による軽量化とコストダウン、そしてハードウェアの構成に縛られない真に柔軟な機能開発が可能となる。

図1は、BMW社のE/Eアーキテクチャの変遷を示したものである⁽¹²⁾。この図からは、個々の ECU が個別に接続されていた初期の構成から、機能ドメインごとに ECU をまとめるドメイン型へ、そして最終的には物理的な位置（ゾーン）で ECU を統合し、HPC が全体を統括するゾーン型へと、段階的に中央集約化が進んできた歴史が見て取れる。特に最新の ZONAL 構成では、HPC、ゾーン ECU、インフォテインメント ECU、そして周辺の小型 ECU という4種類の ECU で車両全体が構成されており、SDV の設計思想を具現化した先進的な事例といえる。

2.4 SDV がもたらす価値

SDV は単なる技術的な進化に留まらず、ユーザー、自動車メーカー、そして社会全体に新たな価値をもたらす。

2.4.1 継続的な機能進化とユーザー体験の向上

ユーザーにとっての最大の価値は、OTA による継続的な機能進化である。購入時には存在しなかった新しいインフォテインメント機能が追加されたり、自動運転の性能が向上したりと、クルマが時間とともに成長していく。これにより、製品のライフサイクル全体を通じて価値が維持・向上し、ユーザーは陳腐化しない愛車を長く楽しむことができる。また、スマートフォンア

アプリのように、サードパーティ開発者が提供する多様なアプリケーションを車内で利用できるようなになれば、移動時間は更に快適で生産的なものへと変わるだろう。

2.4.2 サービタイゼーションと新たなビジネスモデル

自動車メーカーにとっては、SDV はビジネスモデルの変革を促す。従来の「クルマを売って終わり」という売り切り型のビジネスから、ソフトウェアやサービスを継続的に提供することで収益を上げる継続収益型ビジネスへの転換が可能になる。例えば、特定の ADAS 機能を月額課金制で提供したり、走行データに基づいた保険商品を開発したりと、新たな収益源の創出が期待される⁽¹³⁾。このようなサービスの提供（サービタイゼーション）は、メーカーとユーザとの関係をより長期的なものへと変えていくだろう。

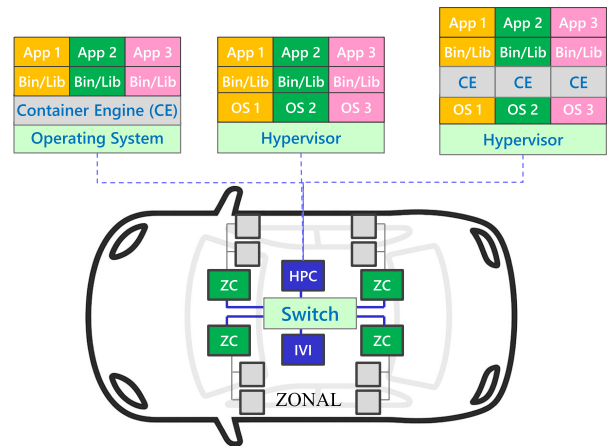


図 2 HPC における仮想化・コンテナ化の構成例⁽¹²⁾、⁽¹⁴⁾

に、安全性やリアルタイム性が要求される制御系と、インフォテインメントのような汎用システムを同時に動作させる場面で有効といえる。

3. SDV を支える技術基盤と産業動向

3.1 車両基盤技術の進化

SDV の実現においては、異なる機能安全レベルや性能要件をもつソフトウェアを、単一の HPC 上に統合することが不可欠である。そのためには、安全性と効率性を両立する高度な実行環境が必要となる。この要件を満たす手段として、仮想化をはじめとする車両基盤技術の導入が検討されている。

3.1.1 仮想化技術とハイパーバイザ

仮想化とは、一つの物理的なコンピュータ（ハードウェア）上で、複数の独立した仮想的なコンピュータ（ゲスト OS）を同時に動作させる技術である。これを実現するのがハイパーバイザと呼ばれるソフトウェア層である⁽¹⁴⁾。SDV の HPC では、ハイパーバイザを利用することで、例えば、厳格なリアルタイム性と機能安全が求められるメータ表示や運転支援システムの OS と、Linux や Android といった汎用 OS 上で動作するインフォテインメントシステムの OS を、一つの HPC 上で完全に分離して実行することが可能になる。これにより、互いのシステムが干渉することなく、安全性を確保しながら、異なる要求をもつ複数の機能を統合できる。万が一、インフォテインメントシステムに不具合が発生しても、運転に不可欠なシステムには影響が及ばない。このようにリソースを効率的に活用しつつ、安全性（セーフティ）と情報保護（セキュリティ）を両立させる上で、仮想化技術は不可欠な役割を担う。

図 2 は、HPC における仮想化の構成例を示している。近年、SDV の HPC では、異なる機能安全要求や性能要件をもつ複数のソフトウェアを、同一のハードウェア上で安全かつ効率的に統合するために、ハイパーバイザ型の仮想化が用いられることが想定されている。ハイパーバイザ型では、ハイパーバイザと呼ばれるソフトウェア層がハードウェア資源を直接管理し、その上に複数のゲスト OS（リアルタイム OS や汎用 OS など）を独立して実行する。これにより、異なる機能を厳格に分離しながら、同一の HPC 上で安全性と機能の共存を実現できる。特

3.1.2 マイクロサービスとコンテナ

従来、車載ソフトウェアは、全ての機能を一体化して開発・実装するモノリシックな構造が一般的であった。この手法では、一部の機能を修正・追加する場合でも、ソフトウェア全体を再構築・再検証する必要があり、開発効率が著しく低下する。一方、SDV では、市場ニーズや規制要件の変化に迅速に対応し、ソフトウェアを頻繁かつ柔軟に更新できることが求められる。この要求に応えるアプローチとして、アプリケーションを機能ごとに独立した小さなサービスの集合体として開発するマイクロサービスアーキテクチャが注目されている⁽¹⁴⁾。例えば、地図表示、音楽再生、音声認識などの機能をそれぞれ独立したマイクロサービスとして実装することで、各サービスを個別に開発・テスト・更新できるようになり、開発効率と保守性が飛躍的に向上する。

これらのマイクロサービスを効率的に配備・実行するための基盤技術がコンテナである。コンテナは、アプリケーションとその実行環境（ライブラリ群や設定ファイル）を一つの単位としてパッケージ化し、ホスト OS 上で軽量かつ高速に動作させる技術である。ハイパーバイザによる仮想化が OS 単位で仮想マシンを構築するのに対し、コンテナは OS カーネルを共有しつつ、プロセス単位で分離を実現するため、リソース消費が少なく、起動も高速である⁽¹⁵⁾。これにより、開発者は自身の PC やクラウド上で開発・検証したコンテナを、そのまま車両の HPC 上に展開し、実車での動作確認や運用を迅速かつ確実に行うことが可能となる。SDV 開発では、このような開発手法を活用することで、開発から実装・保守までの一貫したソフトウェアライフサイクルを実現することが期待される。

3.2 クラウド連携と開発手法の変革

SDV は、単なる車両内の閉じたシステムではなく、クラウドとの常時接続を前提とし、外部リソースやサービスを活用することで、継続的な機能拡張と最適化を実現するものである。この

構造の転換に伴い、ソフトウェア開発と運用の手法そのものも抜本的に見直す必要がある。SDVにおける継続的なソフトウェア更新と、その品質・安全性を確保するためには、従来の自動車開発とは異なる、迅速かつ高信頼な開発・運用プロセスの構築が不可欠である。この要求に応える手段の一つが、Continuous Integration/Continuous Delivery (CI/CD) の導入である。

3.2.1 CI/CD と DevSecOps

迅速かつ継続的なソフトウェア更新を実現するためには、開発プロセスそのものの変革が不可欠である。そこで導入されるのが、CI/CD という考え方である。CIは、開発者が書いたコードを頻繁に中央のリポジトリに統合し、自動的にビルドとテストを実行するプロセスを指す。CDは、テストを通過したコードを自動的に本番環境（この場合は車両）にリリースできる状態に保つプロセスである。このCI/CDパイプラインを構築することで、開発からデプロイまでの時間が大幅に短縮され、OTAによる頻繁なアップデートが可能となる。

更に、この高速な開発サイクルの中でセキュリティを確保するために、DevSecOpsというアプローチが重要になる⁽¹⁶⁾。これは、開発 (Development)、セキュリティ (Security)、運用 (Operations) を一体化させ、開発の初期段階からセキュリティを組み込む考え方である。コードの脆弱性スキャンや、セキュリティ要件のテストをCI/CDパイプラインに自動で組み込むことにより、安全なソフトウェアを迅速に開発する体制が必要不可欠になる。

3.3 OSSの活用とサプライチェーンの変化

SDVの高度で複雑なソフトウェアは、もはや一社の自動車メーカーやサプライヤだけで開発することは困難である。Open Source Software (OSS) の活用と、それに伴う新たなサプライチェーンの構築が不可欠となっている。

3.3.1 車載ソフトウェア標準と OSS

過去20年にわたり、車載ソフトウェアの分野では、AUTomotive Open System ARchitecture (AUTOSAR)⁽¹⁷⁾と呼ばれる業界団体が中心となり、ソフトウェアアーキテクチャとAPIの標準化が推進されてきた。AUTOSARは、ECUに搭載されるソフトウェアの構造とインタフェースを標準化することで、ソフトウェアの再利用性を高め、開発効率の向上とシステムの信頼性確保を目的としている。SDV時代においても、機能安全などが求められる領域ではAUTOSARが引き続き重要な役割を担うことが想定される。しかしながらその一方で、インフォテインメントや自動運転といった高度なアプリケーション領域では、AUTOMOTIVE GRADE LINUX (AGL)⁽¹⁸⁾やAndroid Auto⁽¹⁹⁾、Robot Operating System (ROS)⁽²⁰⁾といったOSSが積極的に活用されつつある。これらのOSSは、豊富な機能や開発者コミュニティ、エコシステムといった強みを持ち、メーカーはこれらを活用することで、革新的なアプリケーションを迅速に開発することが可能になる。

3.3.2 サプライチェーンの水平分業化

OSSの活用は、従来の自動車産業の垂直統合的なサプライチェーンにも変化を促している。これまでは、自動車メーカーを頂点に、特定の機能部品を開発・供給する階層的なサプライヤ構造（ティア構造）が一般的であった⁽²¹⁾。しかしSDV時代には、OSやハイパーバイザ、ミドルウェア、アプリケーションといったソフトウェアのレイヤごとに、専門的な技術をもつ様々なプレイヤーが参入する水平分業モデルへと移行していく可能性が高い。半導体メーカー、クラウドプロバイダ、ソフトウェア企業が、新たなパートナーとして自動車メーカーと協業し新たなサービスを構築したり、エコシステムを形成していくことになる。この変化は、新たなイノベーションを促進する一方で、ソフトウェアの出所が複雑化し、サプライチェーン全体での品質・セキュリティ管理がより一層重要になることを意味する。

3.4 技術的課題とトレードオフ

これまで述べてきたようなIT分野の先進技術を自動車に導入する際には、自動車ならではの厳しい要求事項との間で生じるトレードオフを乗り越えなければならない。

3.4.1 リアルタイム性と機能安全

自動車の電子制御システム、特にブレーキやステアリングといったクリティカルな機能には、極めて高いリアルタイム性が求められる。つまり、定められた時間内に処理が必ず完了することが保証されなければならない。また、システム故障が人命に関わる事態を引き起こさないよう、機能安全規格ISO 26262への準拠が必須となる⁽²²⁾。一方で、Linuxのような汎用OSや、仮想化・コンテナといった技術は、元来リアルタイム性を最優先に設計されているわけではない。これらの技術を車載システムに適用するためには、リアルタイムOSとの共存や、性能を保証するためのスケジューリング技術、故障検知・分離の仕組みなど、安全性と信頼性を担保するための特別な配慮と技術的な工夫が不可欠となる⁽²³⁾。

3.4.2 性能、コスト、セキュリティのバランス

SDVは、高度な演算処理能力を要求するが、車両に搭載できるHPCの性能や消費電力、そしてコストには自ずと限界がある。高性能な半導体を採用すればコストが上昇し、多くの機能を詰め込めば消費電力が増大し、バッテリーが枯渇したり、EVの航続距離に影響を与える。また、セキュリティ対策を強化すれば、その分プロセッサへの負荷が増加し、システムの性能に影響を与える可能性がある。このように、SDVの開発においては、性能、コスト、消費電力、そしてセキュリティといった、互いにトレードオフの関係にある要素を、車両全体のコンセプトに合わせていかに最適なバランスで設計するかが、エンジニアの腕の見せどころとなる。この複雑な多目的最適化問題の解決こそが、SDVを実現する上での大きな挑戦である。

4. SDVにおけるセキュリティリスクと強化技術

4.1 攻撃対象領域の拡大と脅威の変化

SDV への移行は、自動車のサイバーセキュリティにおけるゲームのルールを根本的に変えるものと考えられる。攻撃者が狙うことができる侵入口や攻撃対象領域が物理的なものからソフトウェアへと大きくシフトし、その範囲もかつてない規模に拡大する⁽²⁴⁾。

4.1.1 コネクティビティの増大

従来型車両の攻撃対象は、整備用の On-Board Diagnostics, version 2 (OBD-II) ポートや、USB、Bluetooth といった物理的なインタフェースに限定されることが多かった。しかし、SDV はクラウドとの常時接続が前提となる。セルラ通信 (4G/5G)、Wi-Fi といった多様な通信経路は、利便性を向上させると同時に、攻撃者にとって遠隔から車両に侵入するための新たな扉を開くことになる。もはや攻撃者は、車両に物理的にアクセスする必要はない。世界中のどこからでも、ネットワーク越しに攻撃を仕掛けることが可能になるのである。

4.1.2 ソフトウェアと API の複雑化

SDV の機能は、大規模で複雑なソフトウェアによって実現される。インフォテインメントシステムには汎用 OS (前述の AGL など) が搭載され、サードパーティ製のアプリケーションが動作する。これらのソフトウェアに存在する脆弱性が、攻撃の糸口となりうる。更に、外部のサービスやスマートフォンアプリと連携するために、多くの API が公開される。これらの API の設計や実装に不備があれば、意図しない操作や情報漏洩につながる可能性がある。攻撃対象は、もはや車両そのものに留まらず、車両と連携するクラウド基盤やスマートフォンアプリにまで広がる。

4.1.3 サプライチェーンの多層化

第3章で述べたように、SDV のソフトウェアは、OS、ミドルウェア、アプリケーションといった各階層で、それぞれ異なるサプライヤから供給されることが一般的になる。OSS の利用も拡大する。この複雑で多層的なサプライチェーンは、悪意あるコードが混入するリスクを高める。開発委託先の従業員が不正を働いたり、利用している OSS ライブラリにバックドアが仕込まれていたりといった、サプライチェーン攻撃の脅威が、自動車産業においても現実のものとなる可能性が高い。

4.2 主要な脅威シナリオ

拡大した攻撃対象領域において、攻撃者はどのような手段で SDV を脅かすのか把握することが重要である。ここでは、SDV

表 1 SDV における脅威の分類

攻撃対象	攻撃手法の例	想定される影響
外部インタフェース	不正な診断コマンドの実行、Wi-Fi/Bluetooth 経由での侵入、V2X 通信の傍受・改ざん	車両機能の不正操作、個人情報 の窃取、車両の遠隔乗っ取り
ソフトウェア・API	OS・アプリケーションの脆弱性悪用、API 認証の突破、不正なアプリのインストール	意図しない機能の実行、マルウェア感染、データ漏洩、サービス妨害 (DoS)
OTA 更新プロセス	更新サーバへの侵入、不正な更新パッケージの配信、通信の改ざん (中間者攻撃)	全車両へのマルウェア一斉感染、車両機能の無効化、不正な機能追加
サプライチェーン	開発ツールへのバックドア混入、OSS ライブラリへの悪意あるコード挿入、サプライヤーへのサイバー攻撃	出荷時点での脆弱性の内包、広範囲な製品への影響、信頼性の失墜
仮想化基盤	ハイパーバイザーの脆弱性を突く VM エスケープ攻撃、コンテナ間の隔離不備の悪用	ゲスト OS 間の不正アクセス、車両制御システムへの侵入、特権昇格
クラウド基盤	クラウドアカウントの乗っ取り、設定不備の悪用、クラウドサービス自体の脆弱性攻撃	フリート全体の遠隔操作、大量の車両データの漏洩・改ざん、サービス停止

に特徴的な脅威シナリオを幾つか紹介する。また、攻撃対象別の脅威分類を表 1 に示す。

4.2.1 仮想化基盤への攻撃

SDV の中核をなす HPC では、ハイパーバイザによって複数の OS が実行されている。このハイパーバイザ自体に脆弱性が存在した場合、攻撃者はそれを悪用して、あるゲスト OS から別のゲスト OS へと不正にアクセスするハイパーバイザ・エスケープを引き起こす可能性がある。例えば、セキュリティレベルの低いインフォテインメントシステム用のゲスト OS から、車両制御を司るリアルタイム OS を攻撃し、ブレーキやステアリングといった重要機能を乗っ取るといった、極めて深刻な事態も発生しうる⁽¹⁵⁾。

4.2.2 OTA 更新プロセスの侵害

OTA によるソフトウェア更新は SDV の根幹をなす機能だが、そのプロセス自体が攻撃対象となる。攻撃者がメーカのサーバを侵害し、正規の更新パッケージを偽の不正なパッケージにすり替えることができれば、広範囲の車両に一斉にマルウェアを感染させることが可能になる⁽²⁵⁾。また、攻撃者が車両とサーバ間の通信を傍受・改ざんし、不正な更新プログラムを送り込む攻撃も可能となる。

4.2.3 サプライチェーン攻撃

ソフトウェア開発のいずれかの段階で、悪意あるコードが混

表 2 SDV における主要なセキュリティ対策技術

階層	具体的な強化技術・フレームワーク	目的・効果
ハードウェア層	HSM (Hardware Security Module), TEE (Trusted Execution Environment)	暗号鍵の安全な保護, 信頼の起点 (Root of Trust) の確立, セキュアブートの実現
ネットワーク層	侵入検知・防御システム (IDPS), メッセージ認証技術, ゼロトラストアーキテクチャ	車両内外の不正通信の検知・遮断, 通信の暗号化と認証, アクセス制御の厳格化
OS・実行環境層	セキュア OS, アクセス制御, 仮想化・コンテナ技術による分離	プロセス権限の最小化, 不正なメモリアクセスの防止, 機能間の相互干渉の保証
アプリケーション層	静的・動的解析 (SAST/DAST), ファジング, セキュアコーディング	ソフトウェアの脆弱性の早期発見と修正, 未知の脆弱性に対する耐性の向上
サプライチェーン	SBOM, in-toto, Scudo	ソフトウェア構成の透明化, 開発プロセスの信頼性確保, 脆弱性管理の効率化
運用・クラウド層	VSOC (Vehicle SOC), SIEM, セキュアな OTA 更新, 定期的な脆弱性診断	車両群の常時監視とインシデント対応, 脅威情報の集約・分析, 安全なソフトウェア更新

入するリスクである。例えば、開発に使用するツール（コンパイラなど）が改ざんされていたり、外部から入手した OSS ライブラリに意図的に脆弱性が埋め込まれていたりするケースが考えられる。このような攻撃は、正規のプロセスを経てソフトウェアが作られるため検知が極めて困難であり、完成した車両にバックドアが潜んだまま出荷されてしまう危険性ははらむ⁽²⁶⁾。

4.3 セキュリティ強化技術

深刻化する脅威に対抗するため、SDV のセキュリティは多層的なアプローチが求められる。ここでは、その中核となる幾つかの先進的な対策技術を紹介する。また、階層ごとの主要な強化技術を表 2 に示す。

4.3.1 ソフトウェア構成の透明化：SBOM

Software Bill of Materials (SBOM) は、ソフトウェア部品表と呼ばれ、あるソフトウェア製品を構成する全てのコンポーネント（ライブラリ、モジュール、ファイルなど）とその依存関係を体系的に記述したリストである⁽²⁷⁾。SDV のように膨大かつ複雑なソフトウェア構成を有するシステムでは、自社製・他社製を問わず、使用されている全てのソフトウェアコンポーネントを正確に把握することが、セキュリティリスクの管理とサプライチェーンの健全性確保の出発点となる。SBOM を適切に作成・管理することで、第三者製ソフトウェアや OSS に新たな脆弱性が発見された場合でも、影響を受ける車両やシステムを迅速に特定し、OTA によるパッチ適用などの的確な対策を講じることが可能となる。このような SBOM の活用は、国連のサイバーセキュリティ法規 UN-R155 が求める車両のライフサイクル全体にわたるサイバーセキュリティリスク管理を実現するための、基盤的な要素であると同時に、国際的なサプライチェーンにおける透明性・信頼性向上の観点からも重要性が高まっている⁽²⁸⁾。

4.3.2 セキュアなソフトウェア更新：Uptane

Uptane は、OTA 更新プロセスのセキュリティを確保するために設計されたオープンソースのフレームワークである⁽²⁹⁾。そ

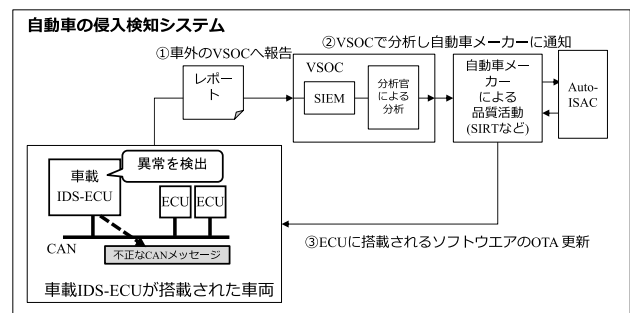


図 3 車両の遠隔監視と OTA 更新

の最大の特徴は危殆化への耐性 (Compromise-Resilience) と呼ばれ、万が一開発サーバやリポジトリが攻撃者によって侵害されたとしても、車両への被害を最小限に食い止める多層防御の仕組みをもつ⁽²⁵⁾。具体的には、異なる役割をもつ複数の電子署名を用いて更新ファイルの完全性を検証し、車両側で厳格なチェックを行うことで、不正なソフトウェアがインストールされることを防ぐ。

図 3 は、車両の遠隔監視と OTA 更新を組み合わせた運用例を示している。車両に搭載された侵入検知システム (IDS) が不審な通信や挙動を検知すると、その情報はクラウド上の Vehicle Security Operation Center (VSOC) に報告される。VSOC のアナリストは、報告された情報を分析し、それが既知または未知の脆弱性を突いた攻撃であると判断した場合、対策となるセキュリティパッチを生成する。そして、安全な OTA 更新基盤を通じて、対象となる車両群にそのパッチを迅速に配信・適用する。このような仕組みにより、遠隔からセキュリティ対応を即座に実施でき、脆弱性が悪用される期間を最小限に抑えることが可能となる。

4.3.3 開発プロセスの信頼性確保：in-toto

in-toto は、ソフトウェアが開発されてからユーザーに届くまでの全工程（サプライチェーン）の正当性を検証するためのフレームワークである⁽³⁰⁾。まず、ソフトウェア開発のあるべき手順（誰が、何を使って、どのようにコードをビルドし、テストするかなど）をレイアウトとして定義する。そして、開発の各ステップが実行されるたび、作業内容と実行者の情報を電子署

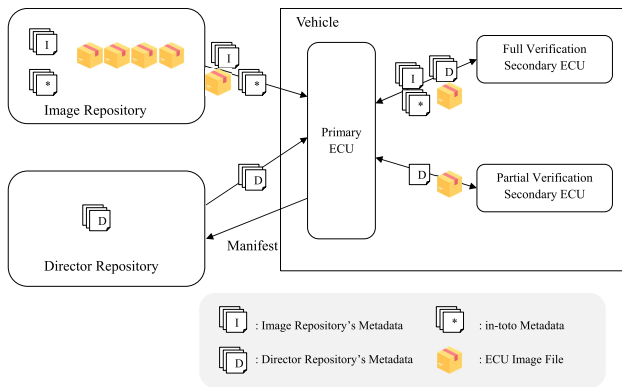


図4 Uptane と in-toto を組み合わせた Scudo フレームワーク⁽³¹⁾

名付きのリンクメタデータとして記録する。最終的に、これらのリンクをつなぎ合わせ、レイアウトに記述されたとおりの手順でソフトウェアが作成されたことを検証することで、サプライチェーンの途中で不正な改ざんや意図しない操作が行われていないことを保証する⁽²⁶⁾。SBOM が何でできているかを示すのに対し、in-toto はどのように作られたかを証明するものであり、両者はサプライチェーンセキュリティの車輪の両輪をなすものといえる。

図4は、Uptane と in-toto を統合した Scudo フレームワークの概念図である⁽³¹⁾。この構成では、in-toto によって生成された開発工程のメタデータ（例えば、誰がソースコードを書き、誰がビルドしたかなどの情報）が、Uptane の更新ファイルリポジトリと一緒に格納される。車両側の ECU は、Uptane の仕組みで更新ファイルの完全性や真正性を検証するだけでなく、そのファイルがどのような開発プロセスを経て生成されたのかを in-toto のメタデータで追加検証できる。これにより、たとえ正規の署名がされた更新ファイルであっても、それが承認されていない開発者やビルド環境から生成されたものであれば、インストールを拒否することが可能となり、より強固なサプライチェーンセキュリティを実現する。

4.3.4 ハードウェアセキュリティの役割：HSM と TEE

ソフトウェアだけではなく、信頼の起点（Root of Trust）となるハードウェアの保護が不可欠である。Hardware Security Module (HSM) は、暗号鍵の生成や保管、暗号化処理を安全に実行するために特別に設計された耐タンパ性をもつプロセッサのことであり、現在では主要な ECU に数多く搭載されている。OTA で使われる電子署名の鍵や、ECU 間の認証で使われる鍵を HSM 内で厳重に保護することで、ソフトウェアの脆弱性から鍵を守る。また、Trusted Execution Environment (TEE) は、プロセッサ内に設けられた信頼できる実行環境であり、メイン OS (Rich OS) から隔離された安全な領域で、セキュリティ上重要なアプリケーション（決済、DRM など）を実行する。これにより、たとえメイン OS がマルウェアに感染したとしても、TEE 内で処理される機密情報や重要な処理を保護することができる⁽³²⁾。これらのハードウェアセキュリティ技術が、SDV のセキュリティ全体の土台を支えるものと考えられる。

5. SDV におけるセキュリティの産業的課題と展望

SDV は、ソフトウェア中心の設計と機能拡張を実現する次世代の車両概念として注目されている。その一方で、従来の自動車とは異なる、複雑かつ広範なセキュリティ課題を内包しており、対応には技術だけでなく、産業構造、制度設計、国際的な枠組みを含めた包括的な視点が必要である。以下では、SDV セキュリティの構造的課題と今後の方向性を産業的観点から整理する。

5.1 SDV セキュリティとサプライチェーンの構造的課題

SDV の普及により、自動車産業のサプライチェーンとシステム構造は大きく変化している。ソフトウェア更新や機能追加がライフサイクル全体を通じて繰り返され、クラウドサービスや外部接続が前提となることで、攻撃対象領域は飛躍的に拡大している。また、OSS や外部製品の活用が進み、ソフトウェアの出所や構成の把握が難しくなり、透明性と信頼性の確保が喫緊の課題となっている。

特に、サプライチェーン由来の脆弱性対応は、SDV セキュリティの実務上の難しさを象徴する。他社の自動車に使用されるソフトウェアに脆弱性が発見された場合、Auto-ISAC⁽³³⁾を通じて情報は共有されるが、自社製品への影響を正確に判断するのは容易ではない。車両に組み込まれるソフトウェアは多岐にわたり、構成やバージョンの差異も存在するため、単純な製品名やベンダ情報だけではリスクを特定できない。このため、全ての車両に一意の識別子を割り当て、構成と依存関係を正確に管理する仕組みが求められるが、その整備は業界全体で依然として途上である。

更に、SDV の国際展開においては、法制度の地域差も無視できない。現時点で UN-R155/156 や ISO/SAE 21434 をはじめとする国際基準や国際標準が整備されつつあるものの、販売地域によって法的要件は異なる。特に、相互承認協定に参加しない国での販売では、各国独自の認証や審査が必要となる場合が多い。こうした制度差異は、開発コストや対応工数の増大だけでなく、セキュリティ要求の不統一を招き、リスク管理の障壁となる。

5.2 開発アーキテクチャと産業界の対応の方向性

SDV 開発においては、従来の設計・調達方針が大きな転換を迫られている。従来、自動車や組込みシステムの開発では、コスト最適化を重視し、必要最小限のハードウェアリソースを選定し、車種ごとに個別設計することが一般的であった。しかし、SDV ではソフトウェア機能が頻繁に更新・拡張され、セキュリティ要求も変化するため、この方針自体が限界を迎えている。例えば、ハードウェアのコストを抑えるため性能を最小限に設計すると、後からの機能追加やセキュリティ強化に対応できないリスクがある。また、車種ごとにソフトウェアの開発プラン

ちを分ける従来手法では、パッチ適用や脆弱性対応が断片化し、コストの増大やリスクの見落としを招く。

この課題に対応するためには、ソフトウェアとハードウェアを切り離し、柔軟かつ持続可能な開発体制を構築する必要がある。具体的には、DevOps や DevSecOps に基づき、ソフトウェアを共通基盤上で一元開発・運用し、全ての車種に共通するソフトウェアを適用可能とする設計が求められる。そのためには、ハードウェア選定時からマイグレーション容易性を考慮し、将来の機能追加やセキュリティ強化に対応できる設計が不可欠となる。

また、SDV の開発は自動車メーカーのみならず、サプライヤ、半導体メーカー、クラウド事業者、セキュリティ企業など多様なプレイヤーが連携するエコシステムによって支えられるべきである。この複雑なサプライチェーンで一貫したセキュリティレベルを確保するには、企業間の協調と情報共有が不可欠である。特に、脅威情報の迅速な共有体制として、Auto-ISAC の取り組みが進められており、こうした枠組みの強化がエコシステム全体の防御力向上に寄与する。更に、Uptane や in-toto といったオープンソースセキュリティフレームワークの共同活用、AUTOSAR や COVESA⁽³⁴⁾ などの業界団体を通じた SDV 向け共通プラットフォームや API 標準化の推進も、セキュリティと相互運用性の両立につながる。

5.3 今後の展望と提言

SDV の普及により、自動車はソフトウェアによって継続的に機能が拡張され、ネットワークを介して外部と常時接続されることが前提となる。このような環境下では、サイバーセキュリティの確保が、単なる製品品質の問題を超え、自動車産業全体の競争力と社会的信頼を左右する重要な要素となる。

とりわけ、日本の自動車産業は、これまで培ってきた信頼性や高品質を基盤としつつ、SDV 時代に対応する新たな開発体制とセキュリティ基盤を早急に確立する必要がある。ソフトウェアとハードウェアを分離し、共通基盤上でソフトウェアを一元的に開発・運用できる柔軟な設計思想を採用するとともに、セキュリティを開発の最上流から組み込むセキュリティ・バイ・デザインの徹底が求められる。また、この取り組みを支えるためには、企業の枠を超えた業界内の協調と、サイバーセキュリティやソフトウェア開発に精通した人材の育成が不可欠である。SDV のサイバーセキュリティ強化は、単独の企業や開発部門のみで完結できる課題ではなく、自動車業界全体、関連企業、そして研究者・技術者が緊密に連携し、持続的な対策と技術革新を推進していくことが求められる。

SDV 時代におけるセキュリティの確保は、日本の自動車産業が国際競争力を維持し、安全で信頼されるモビリティ社会を実現するための不可欠な基盤である。産業界と研究コミュニティが一体となり、この転換期を乗り越えていくことが強く期待される。

6. おわりに

本稿では、SDV の技術的特徴と、それに伴うセキュリティ

上の課題、更に求められる強化策の方向性について概説した。SDV は、ソフトウェアによる車両機能の柔軟な制御やサービス展開を実現する革新的なアーキテクチャであり、自動車開発・運用のあり方を大きく変えつつある。一方で、仮想化、マイクロサービス、OTA、クラウド接続といった構成要素の複雑化は、新たな攻撃対象領域の拡大を招き、従来にない規模のセキュリティリスクをもたらしている。こうしたリスクに対処し、SDV の安全性と社会的信頼を確保するためには、単一企業の努力だけでは不十分であり、業界全体で共有可能なセキュリティ基盤と、継続的な運用体制の確立が不可欠である。特に、開発初期段階から安全性、コスト、セキュリティのバランスを意識し、セキュリティを設計に組み込み、技術・運用・エコシステムを一体化した長期的な戦略の構築が重要である。

SDV は、持続可能なモビリティ社会の実現に向けた重要な基盤となる。本稿が、今後の SDV の開発及びセキュリティ強化の議論を深める一助となれば幸いである。

文 献

- (1) P.V. Teixeira, D. Raposo, R. Lopes, and S. Sargento, "Deterministic and reliable software-defined vehicles: key building blocks, challenges, and vision," <https://arxiv.org/abs/2407.17287>, 2025.
- (2) Mercedes-Benz, "事故自動緊急通報装置のソフトウェアに関する対策 (OTA)," <https://www.mercedes-benz.jp/my-service/recall/info/list/2022/0331-4.html>, 2022 (最終アクセス日: 2025 年 6 月 1 日).
- (3) Volvo, <https://www.volvocars.com/jp/support/topic/56b126a04ceca0fc0a8k015133ca61ef/>, Dec. 2024 (最終アクセス日: 2025 年 6 月 1 日).
- (4) IoT Evolution, "Hyundai's Mobile App Issue a Wake Up Call for Automakers," <https://www.iotevolutionworld.com/iot/articles/454797-hyundais-mobile-app-issue-wake-up-call-automakers.htm>, Jan. 2023 (最終アクセス日: 2025 年 6 月 1 日).
- (5) L.G. Leopold, "Computers on wheels: One OEM settles claims while another scores a win in cases involving allegedly botched OTA updates," <https://www.seyfarth.com/news-insights/computers-on-wheels-one-oem-settles-claims-while-another-scores-a-win-in-cases-involving-allegedly-botched-ota-updates.html>, Feb. 2023 (最終アクセス日: 2025 年 6 月 1 日).
- (6) ISO 11898-1:2024 – Road vehicles – Controller area network (CAN), 2024.
- (7) P. Aberl, S. Haas, and A. Vemuri, "How a Zone Architecture Paves the Way to a Fully Software-Defined Vehicle," <https://www.ti.com/lit/wp/spry345c/spry345c.pdf>, 2024 (最終アクセス日: 2025 年 6 月 1 日).
- (8) 国土交通省, "自動車の特定改造等の許可制度を本年 11 月より開始します—適切なソフトウェアアップデートを確保するための環境整備について—," https://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha08_hh_003789.html, 2023 (最終アクセス日: 2025 年 7 月 5 日).
- (9) F. Pan, M. Rickert, T. Betz, L. Wen, J. Lin, N. Petrovic, M. Lienkamp, and A. Knoll, "Toward software-defined vehicles: From model-based engineering to virtualization-based deployment," *IEEE Access*, vol.12, pp.192127–192145, 2024.
- (10) IEEE 802.3cg-2019 – IEEE Standard for Ethernet – Amendment 5: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Mb/s Operation and Associated Power Delivery Over a Single Balanced Pair of Conductors, 2019.
- (11) IEEE 802.1 Working Group, "Time-Sensitive Net-

- working (TSN) Task Group Overview,” <https://1.ieee802.org/tsn/> (最終アクセス日：2025年7月5日).
- (12) BMW Group, “INVESTOR & ANALYST DAYS 2024,” <https://www.bmwgroup.com/content/dam/grpw/websites/bmwgroup.com/ir/downloads/en/2024/BMW-Group-Investor-Analyst-Days-2024-Digital-BMW.pdf>, 2024 (最終アクセス日：2025年6月1日).
 - (13) McKinsey & Company, “Automotive revolution – perspective towards 2030,” <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/automotive%20and%20assembly/our%20insights/automotive%20revolution%20perspective%20towards%202030/automotive-revolution-perspective-towards-2030-final.pdf>, 2016 (最終アクセス日：2025年7月5日).
 - (14) L. Wen, M. Rickert, F. Pan, J. Lin, Y. Zhang, T. Betz, and A. Knoll, “Virtualization & microservice architecture for software-defined vehicles: An evaluation and exploration,” <https://arxiv.org/abs/2412.09995>, 2024.
 - (15) O. Jarkas, R. Ko, N. Dong, and R. Mahmud, “A container security survey: Exploits, attacks, and defenses,” *ACM Computing Surveys*, vol.57, no.7, 2025.
 - (16) GitLab, “What is DevSecOps?,” <https://about.gitlab.com/topics/devsecops/>, 2023 (最終アクセス日：2025年7月5日).
 - (17) AUTOSAR (Automotive Open System Architecture), <https://www.autosar.org/> (最終アクセス日：2025年7月5日).
 - (18) AUTOMOTIVE GRADE LINUX (AGL), <https://www.automotivelinux.org/> (最終アクセス日：2025年7月5日).
 - (19) Android Auto, <https://www.android.com/intl/ja-jp/auto/> (最終アクセス日：2025年7月5日).
 - (20) ROS - Robot Operating System, <https://www.ros.org/> (最終アクセス日：2025年7月5日).
 - (21) 藤本隆宏, 日本のものづくり哲学, 増補版日本経済新聞出版 and 日経 BP マーケティング, 2024.
 - (22) ISO/SAE, “ISO/SAE 21434:2021 Road vehicles — Cybersecurity engineering,” <https://www.iso.org/standard/70918.html>, 2021 (最終アクセス日：2025年7月5日).
 - (23) F. Pan, J. Lin, M. Rickert, and A. Knoll, “Automated design space exploration for resource allocation in software-defined vehicles,” 2023 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), pp.1–8, 2023.
 - (24) Automotive Information Sharing and Analysis Center, “Driving a secure future: 2022 Auto-ISAC report,” <https://www.automotiveisac.com/wp-content/uploads/2022/09/2022-Auto-ISAC-Report-Driving-a-Secure-Future.pdf>, 2022 (最終アクセス日：2025年7月5日).
 - (25) T.K. Kuppusamy, L.A. DeLong, and J. Cappos, “Uptane: Security and customizability of software updates for vehicles,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol.13, no.1, pp.66–73, 2018.
 - (26) S. Torres-Arias, H. Afzali, T.K. Kuppusamy, R. Curtmola, and J. Cappos, “In-toto: providing farm-to-table guarantees for bits and bytes,” *Proceedings of the 28th USENIX Conference on Security Symposium, SEC’19, USA*, pp.1393–1410, 2019.
 - (27) Cybersecurity and Infrastructure Security Agency (CISA), “Framing software component transparency: establishing a common software bill of materials (SBOM),” 3rd ed., <https://www.cisa.gov/sites/default/files/2024-10/SBOM%20Framing%20Software%20Component%20Transparency%202024.pdf>, 2024 (最終アクセス日：2025年6月1日).
 - (28) Auto-ISAC, “Auto-ISAC software bill of materials (SBOM) informational report,” <https://automotiveisac.com/sbom-reports>, 2025 (最終アクセス日：2025年6月1日).
 - (29) The Uptane Community, “Uptane Standard,” <https://uptane.github.io/uptane-standard/master/uptane-standard.html>, 2021 (最終アクセス日：2025年7月5日).
 - (30) The in-toto Community, “in-toto: A framework to secure the software supply chain,” <https://in-toto.io/>, 2023 (最終アクセス日：2025年7月5日).
 - (31) NYU SYSTEM SECURITY LAB, “Scudo: End-to-end vehicle software security from uptane and in-toto,” <https://ssl.engineering.nyu.edu/blog/2022-09-09-uptane-scudo>, Sept. 2022 (最終アクセス日：2025年6月1日).
 - (32) GlobalPlatform, “The trusted execution environment: delivering enhanced security and trust,” https://globalplatform.org/wp-content/uploads/2021/07/TEE_Delivering_Enhanced_Security_and_Trust_White_Paper.pdf, 2021 (最終アクセス日：2025年7月5日).
 - (33) Auto-ISAC, <https://automotiveisac.com/> (最終アクセス日：2025年7月5日).
 - (34) Connected Vehicle Systems Alliance (COVESA), <https://covesa.global/>, 2023 (最終アクセス日：2025年7月5日).
- (HWS 研究会提案, 2025年6月2日受付,
2025年7月7日再受付)



倉地 亮 (正員)

名古屋大学大学院情報科学研究科附属組込みシステム研究センター特任教授。2000 アイシン・エイ・ダブリュ株式会社 (現在, 株式会社アイシン) に入社後, 2006 より名古屋大学大学院情報科学研究科附属組込みシステム研究センター研究員, 特任助教, 特任准教授を経て現職。組込みシステム, リアルタイムシステムや情報セキュリティの研究に従事。博士

(情報科学)。

擬等角写像の数値的構成法と機械学習への応用

Numerical Quasiconformal Mappings and Application of Quasiconformal Mappings to Machine Learning

島内宏和 Hirokazu SHIMAUCHI

アブストラクト 擬等角写像はタイヒミュラー空間や複素力学系などの数学の分野において重要な役割を果たすだけでなく、脳の灰白質のような複雑な表面の画像処理や、機械学習におけるデータ拡張、教師なし表現学習などへ応用されている。本論文では、擬等角写像について概説するとともに、その数値構成的構成手法と画像処理などへの応用、及び擬等角写像の技法の機械学習における活用事例について、著者らの研究を交えながら紹介する。

キーワード 擬等角写像, 擬等角拡張, 機械学習, 教師なし表現学習, ニューラルネットワーク, 活性化関数

Abstract Quasiconformal maps play a crucial role not only in mathematical areas such as Teichmüller spaces and complex dynamical systems but also in practical applications including the image processing of complex surfaces (e.g., the brain's gray matter), data augmentation, and unsupervised representation learning in machine learning. In this paper, we provide an overview of quasiconformal maps and selectively introduce their numerical construction methods, applications in image processing, and use cases in machine learning.

Key words Quasiconformal mappings, Quasiconformal extension, Machine learning, Unsupervised representation learning, Neural networks, Activation function

1. はじめに

等角写像 (Conformal Mapping) は角度を保つ写像であり、流体力学のポテンシャル流や航空工学における翼型変換など、多岐にわたる応用はよく知られているところである。一方、等角写像の一般化である擬等角写像 (Quasiconformal Mapping) は、角度の変形をある程度許容する同相写像であり、微分同相写像や区分線形同相擬等角写像を含むより柔軟で広範なクラスの写像として位置づけられる。擬等角写像はタイヒミュラー空間や複素力学系といった数学の分野で重要な役割を果たしてきたが、近年では医用画像処理や機械学習などの領域へと応用が広がっている。

しかしながら、擬等角写像の活用事例は、等角写像と比較すると依然として限定的であると筆者は考える。例えば、Google Scholar^(注1) においてキーワード「Conformal」で検索した場合は約 731,000 件の結果が得られるのに対し、「Quasiconformal」では約 17,700 件、「Quasi-conformal」では約 10,700 件で、両者を合わせて「Conformal」の約 3.9%に留まる (2025 年 2 月 18 日時点)。更に、国内における状況を探るため日本語の文献についても検索してみると、キーワード「等角」を含む文献は

約 7,180 件であるのに対し、「擬等角」を含む文献は約 186 件 (「等角」の約 2.5%) と著しく少なく、更にその多くが数学分野の研究に分類されるものとなっている。このような差異が生じる要因の一つとして、等角写像の構成に帰着する問題が諸分野において広く現れ、またその数値的構成方法に関する研究が古くから開発されてきたことが考えられる。また、等角写像は国内の大学の共通科目や工学・物理などの学部専門科目でも扱われることがあるのに対し、擬等角写像はその概念が学部教育のカリキュラムにおいて取り上げられることが少ないことなども影響しているのではないかと考える。

このような背景を踏まえ、本論文では擬等角写像の概要とその活用事例を、限られた範囲ではあるが日本語で平易に紹介することを試みる。はじめに、擬等角写像の定義や性質を、等角写像と対比しながら平易かつ簡潔に整理する。続いて、その数値構成において用いられる代表的な手法やアルゴリズムと応用例、及び機械学習の分野における活用事例を、筆者の研究を交えながら選択的に紹介する。

2. 擬等角写像の概要

本章では、擬等角写像を直感的に導入し、その定義と基本的性質を概観する。詳細については、アールフォルスの古典的著作⁽¹⁾、及び訳者による補注を付した邦訳⁽²⁾などを参照されたい。等角写像は角度を保存する写像である。直感的には、局所的

島内宏和 正員 公立はこだて未来大学システム情報科学部複雑系知能学科
E-mail simauti@fun.ac.jp
Hirokazu SHIMAUCHI, Member (Department of Complex and Intelligent Systems, School of Systems Information Science, Future University Hakodate, Hokkaido, 041-8655 Japan).

電子情報通信学会 基礎・境界サイエンス
Fundamentals Review Vol.19 No.2 pp.97-104 2025 年 10 月
©電子情報通信学会 2025

(注1) : URL: <https://scholar.google.co.jp/schhp?hl=ja> (2025 年 2 月 18 日最終確認)

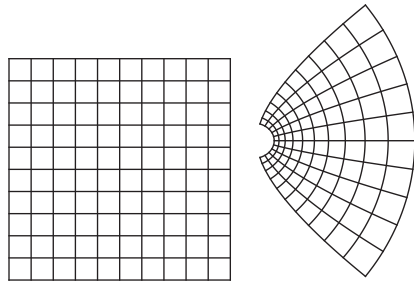


図1 等角写像による格子の像 (左) 定義域上の格子, (右) 格子の等角写像による像 (角度が保たれている).

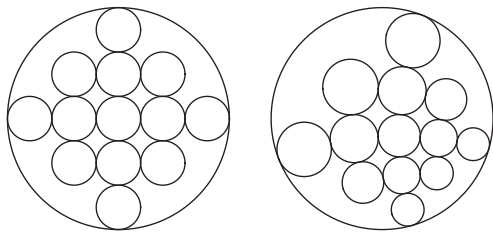


図2 単位円板の自己等角写像による円の像 (左) 単位円板上の小さな円, (右) その等角写像による像 (円に近い形状のものに写っている).

な形状を保ちながら^(注2), 領域を皺や折り返しが生じないように連続変形するものである. 等角写像の適用により, その定義域上の交差する線の角度は像領域の上でも保たれ, 局所的な円は円に写る. 等角写像による格子の変形の例を図1に, 単位円板の自己等角写像による, 定義域上の円の像の一例を図2に示す.

擬等角写像は, 直感的には等角写像と同様に皺や折り返しは生じないような写像ではある一方, 角度の変化は「ある程度」許容するような写像である. 後述するベルトラミ係数が定数関数である場合の, 単位円板の自己擬等角写像による像の一例を図3に示す. 円がだ円に近い形状にひずんで写っている様子が確認できる.

以上, まずは直感的な説明を行ったが, ここで擬等角写像の定義を厳密に述べることにする.

定義 1. D, D' を複素平面上的領域とする. D 上で定義された同相写像 $f: D \rightarrow D'$ が次の条件 1, 2 を満たすとき, f を擬等角写像という.

- (1) f は x 軸と y 軸に平行な辺をもつ任意の閉長方形 $R \subset D$ において, R 内のほとんど全ての水平成分と垂直線分の上で絶対連続である^(注3).
- (2) ある非負定数 $k < 1$ があって, ほとんど至るところで, 不等式

$$|f_{\bar{z}}| \leq k |f_z|$$

を満たす. ここで, $f_z := (f_x - if_y)/2, f_{\bar{z}} := (f_x +$

(注2): 等角写像の接写像は複素一次関数, すなわち拡大・縮小・回転・平行移動の合成として表される.

(注3): f の弱い意味での微分可能性に対応する. すなわち, 超関数の意味での偏導関数の存在が保証される.

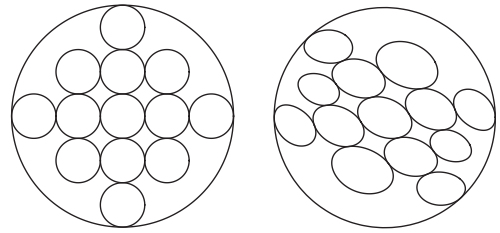


図3 単位円板の自己擬等角写像による円の像 (左) 単位円板上の小さな円, (右) 円の擬等角写像による像 (だ円に近い形状のものに写っている).

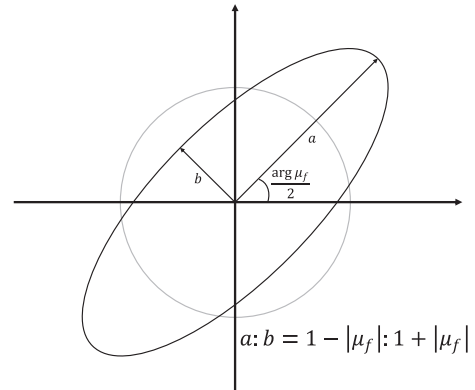


図4 擬等角写像 f による定義域上のほとんど至るところにおける局所的な円の変形 (ベルトラミ係数 μ_f に依存)

$if_y)/2$ であり, i は虚数単位である.

定義より, 擬等角写像 f が与えられたとき, 定義域上のほとんど至るところでベルトラミ係数と呼ばれる関数

$$\mu_f(z) := \frac{f_{\bar{z}}(z)}{f_z(z)}$$

が定義できる. 更に, このベルトラミ係数に対し, ある非負定数 k があって $|\mu_f| \leq k$ が定義域上のほとんど至るところで成り立ち, f による局所的な円のだ円への変形に関する情報は, このベルトラミ係数より得ることができる (図4を参照).

例として, 擬等角写像 f が C^1 級, すなわち微分可能かつ連続な偏導関数をもつ場合を考えると, 定義域の任意の点 z_0 において f のベルトラミ係数が定義でき, 局所的には円は, 長軸と短軸の比が

$$\frac{|f_z(z_0)| + |f_{\bar{z}}(z_0)|}{|f_z(z_0)| - |f_{\bar{z}}(z_0)|} = \frac{1 + |\mu_f(z_0)|}{1 - |\mu_f(z_0)|} \leq \frac{1+k}{1-k}$$

となるだ円に写る (すなわち, 角度の変化をある程度許容する). また, 実軸に並行な線が

$$\frac{\arg \mu_f(z_0)}{2}$$

だけ傾くように回転する. なお, f が等角写像の場合には定義域全体で $\mu_f(z) = 0$, すなわち

$$f_{\bar{z}} = \frac{f_x + if_y}{2} = 0 \iff if_x = -f_y$$

となり, コーシー・リーマン方程式を満たすことが確認できる.

3. 可測型リーマンの写像定理

等角写像の存在定理として、リーマンの写像定理がよく知られている。まずはリーマンの写像定理について振り返る。

定理 1 (リーマンの写像定理). 複素平面内の単連結真部分領域 D が与えられたとき、 D から単位円板 \mathbb{D} への等角写像 $f: D \rightarrow \mathbb{D}$ が存在する。

等角写像 $f: D \rightarrow \mathbb{D}$ は、単位円板の自己等角写像、すなわち次の形のメビウス変換

$$\phi(z) = e^{i\theta} \cdot \frac{z-a}{1-\bar{a}z} \quad (|a| < 1, \theta \in \mathbb{R})$$

の後からの合成を除き、一意である。 D がジョルダン領域である場合には、等角写像には境界まで連続に、一意に拡張することができ、境界上の 3 点の対応を決めることにより正規化ができる。等角写像の逆写像はまた等角写像である、二つの単連結領域 D, D' が与えられたとき、その間の等角写像が存在する。

擬等角写像の存在に関しては、「複素平面内の単連結真部分領域 D が与えられたとき、 D 上で定義された関数 μ がどのようなクラスの関数であれば、それをベルトラミ係数としてもつ擬等角写像が存在するか」という問題が考えられる。この問題については、次の可測型リーマンの写像定理が知られている。

定理 2 (可測型リーマンの写像定理). 複素平面内の単連結真部分領域 D 上で $\|\mu(z)\|_\infty < 1$ を満たす可測関数 $\mu(z)$ ^(注4) に対し、 D から単位円板 \mathbb{D} への擬等角写像 $f: D \rightarrow \mathbb{D}$ でベルトラミ方程式

$$f_{\bar{z}}(z) = \mu(z)f_z(z)$$

を D 上ほとんど至るところで満たすものが存在する。また、単位円板の自己等角写像の後からの合成を除き、一意である。

可測型リーマンの写像定理は、直感的には定義域 D 上(のほとんど至るところ)で「局所的な円のだ円へのひずみ方」^(注5)を、定理内の条件を満たすような関数で指定したときに、それをベルトラミ係数としてもつような単位円板への擬等角写像 $f: D \rightarrow \mathbb{D}$ が存在することを示している。

直感的には等角写像の適用で角度は保たれるため、擬等角写像への等角写像の後からの合成では、そのベルトラミ係数は変化しない(図 5 を参照)。次の補題 1 は、これに対応するものである。

補題 1. D_1, D_2 を複素平面内の単連結真部分領域とし、 f_1 を D_1 から D_2 への擬等角写像、 μ をそのベルトラミ係数とする。このとき、定義域を D_1 とするベルトラミ係数が μ とほとんど至るところで一致する任意の擬等角写像 f は、 D_2 上で定義された等角写像 h を用いて $h \circ f_1$ という形で書ける。

(注4): $\|\cdot\|_\infty$ は本質的上限を表す。可測関数に馴染みがない場合は、 μ が連続関数であり、かつある $k < 1$ に対し定義域上で $|\mu| < k$ を満たすケースを想定して頂いて差し支えない(この文脈では、連続関数は可測関数となる)。

(注5): $\|\mu(z)\|_\infty < 1$ より、各点において向きは保ったまま、潰れるようなことはないことに注意されたい。

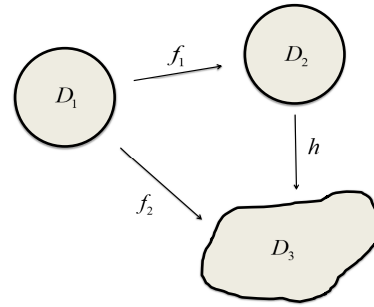


図 5 擬等角写像と等角写像の合成 h が等角写像のとき、擬等角写像 f_1 と $f_2 = h \circ f_1$ のベルトラミ係数は D_1 上で一致する。

補題 1 より、複素平面内の単連結真部分領域 D, D' があったとき、 D 上で定義された μ をベルトラミ係数としてもつ D から \mathbb{D} への擬等角写像を構成できれば、 \mathbb{D} から D' への等角写像を構成し合成することにより、擬等角写像 $f: D \rightarrow D'$ で μ をベルトラミ係数としてもつものを構成できる。

実際の計算機上での計算において、単連結領域の境界を有限個の点として表現する場合、これを補間することでジョルダン領域とみなすことができる。上記の等角写像の正規化条件を考えれば、二つのジョルダン領域 D, D' と、 D 上で定義された本質的上限が 1 未満の可測関数、境界の 3 点の単位円周上の 3 点との対応が与えられれば、 D から D' への擬等角写像は一意に定まることになる。

この章の最後に、擬等角写像の列に関する次の補題 (Good Approximation Lemma) を紹介する。

補題 2. 可測関数の列 $\{\mu_n \in L^\infty(\mathbb{D})\}_{n \in \mathbb{N}}$ が、任意の $n \in \mathbb{N}$ について $\|\mu_n\|_\infty \leq k < 1$ を満たすとする。 \mathbb{D} の点 z における極限 $\mu(z) := \lim_{n \rightarrow \infty} \mu_n(z)$ がほとんど至るところで存在し、 $\mu(z)$ が $L^\infty(\mathbb{D})$ に属すると仮定する。更に、 $f_n: \mathbb{D} \rightarrow \mathbb{D}$ を μ_n をベルトラミ係数としてもつ擬等角写像で、 $f_n(0) = f_n(1) = 0$ を満たすとする。このとき、 f_n は $f(0) = f(1) = 0$ を満たす μ をベルトラミ係数としてもつ擬等角写像 f に、 \mathbb{D} 上広義一様に収束する。

この補題により、与えられたベルトラミ係数 μ に対応する擬等角写像 f を構成したいとき、 μ に「十分近い」ベルトラミ係数をもつ擬等角写像を構成できれば、それを f の近似として考えることができることを意味する。

4. 擬等角写像の数値的構成手法とその応用

等角同値な複素平面内の二つの領域が与えられたとき、それらの間の等角写像を数値的に構成する手法は数値等角写像と呼ばれ、これまでに多くの手法が研究されてきた。これに倣い、本稿では領域間の擬等角写像を数値的に構成する手法を数値擬等角写像と呼ぶことにする。数値擬等角写像の構成法も、数値等角写像と同様に、問題設定や応用目的に応じて多様な手法が提示されており、本節ではその中から幾つかを選択的に選び概説し、幾つかの応用事例を紹介する。

ここでは、与えられた定義域と、その上で定義された $\|\mu\|_\infty = k < 1$ を満たす可測関数 μ が与えられたとき、それをベルトラミ係数としてもつ正規化された擬等角写像 f^μ を数値的に構成するアルゴリズムを考える。簡単のため、ここでは定義域・値域ともに単位円板とする。単位円板の自己擬等角写像を数値的に構成することができれば、代用電化法などの等角写像と組み合わせることで、任意の単位円板からジョルダン領域への擬等角写像の近似が構成できることに注意されたい。以下、数値的擬等角写像の構成手法について、各点ごとに近似を計算する方法と領域上で定義された関数として構成する方法に分けて選択的に紹介する。

4.1 各点ごとに近似を計算する構成法

はじめに取り上げる構成法は、アールフォルスとベアスによる擬等角写像の存在定理の証明に基づく方法である。

4.1.1 存在定理の証明法に基づく方法

擬等角写像の存在定理の証明では、与えられたベルトラミ係数 μ 、及び次のように定義されるコーシー積分作用素 T_1 とブーリ積積分作用素 T_2 を用い、 μ に対応する擬等角写像を構成する。

$$T_1 g(z) = \iint_{\mathbb{D}} \frac{g(\zeta)}{(\zeta - z)} d\xi d\eta,$$

$$T_2 g(z) = \iint_{\mathbb{D}} \frac{g(\zeta)}{(\zeta - z)^2} d\xi d\eta$$

ここで、 $\zeta = \xi + i\eta$ であり、特異積分作用素 T_2 はコーシーの主値をとる。与えられた μ をベルトラミ係数としてもつ擬等角写像は、 T_1 と T_2 を用いた以下のノイマン級数で与えられる。

$$f(z) = z + T_1 \mu + T_1 \mu T_2 \mu + T_1 \mu T_2 \mu T_2 \mu + \dots$$

T_1, T_2 の近似を計算することができれば、単位円板上の与えられた点ごとに、その像の近似が得られることになる。

これに基づき、Daripa⁽³⁾はフーリエ変換に関する再帰的な関係、FFT (Fast Fourier Transforms) などを用い、このノイマン級数を効率的に計算する方法を提示した。更に、Gaidashev-Khmelev⁽⁴⁾らはこの手法を改良するだけでなく、一定の条件下での誤差の評価も与えている。

4.1.2 フローを用いた方法

Lui⁽⁵⁾は、ベルトラミ正則流 (Beltrami Holomorphic Flow) と呼ばれる一種のフローによる、擬等角写像の数値構成手法を提案した。 $\{\mu_t(z)\}$ を単位円板上で定義されたベルトラミ係数の族で、 $\mu_t(z) = \mu(z) + t\nu(z) + t\epsilon_t(z)$ を満たすものとする。ここで、 $\mu \in C^\infty(\mathbb{D}), \nu, \epsilon_t \in L^\infty(D)$ で、 $\|\epsilon_t\| \rightarrow 0 (t \rightarrow 0)$ とする。この仮定の下、Lui⁽⁵⁾らは単位円板上で局所一様に

$$f^{\mu_t}(w) = f^\mu(w) + tV(f^\mu, \nu)(w) + o(|t|) (t \rightarrow 0)$$

が成り立つことを示した。ここで、 $V(f^\mu, \nu)(u)$ の定義は以下のとおりである。

$$V(f^\mu, \nu)(u) = -\frac{f^\mu(w)(f^\mu(w) - 1)}{\pi} \times \left(\int_{\mathbb{D}} \frac{\nu(z)(f_z^\mu(z))^2}{f^\mu(z)(f^\mu(z) - 1)(f^\mu(z) - f^\mu(w))} dx dy + \int_{\mathbb{D}} \frac{\overline{\nu(z)}(\overline{f_z^\mu(z)})^2}{f^\mu(z)(1 - \overline{f^\mu(z)})(1 - \overline{f^\mu(z)}\overline{f^\mu(w)})} dx dy \right)$$

これを用いて、 $k = 0, \hat{f}^{\mu_0} := z$ と初期値を設定し、 $\mu_k := k\mu/N$ として $\hat{f}^{\mu_{k+1}} = \hat{f}^{\mu_k} + V(\hat{f}^{\mu_k}, \mu/N)$ の形を用い、 k を増加させながら反復計算を行うことで近似解を構成する。なお、 V については、メッシュを用いる場合に頂点の値を利用した近似式を導入して計算を行っている。フローを用いた手法はほかにも提案されており、Zeng⁽⁶⁾は離散版の山辺フローを用いた方法を提案している。

4.2 定義域内における近似関数を計算する構成法

ここまでで紹介した手法は、基本的には領域上の各点の像の近似を計算する方法だが、領域上で定義される関数を用いて近似する方法もある。

4.2.1 円充てんによる方法

He⁽⁷⁾は、Thurstonにより予想され Rodin, Sullivan⁽⁸⁾により証明された円充てんリーマンの写像定理を応用し、区分線形写像により擬等角写像の近似を構成する方法を示した。

円充てんでは、領域の内部に互いに重ならず、かつ接するように円を敷き詰め、各円の中心を頂点、互いに接する円の中心同士を結んだ線分により辺とし、三角形分割を構成する。二つの三角形分割が単体同型であるとき、二つの三角形分割は領域の間の区分線形写像を誘導することに注意する。円充てんは、定義域の正三角形による三角形分割を与え、この三角形分割と単体同型な値域の三角形分割を構成し、それにより誘導される区分線形写像により、等角写像の近似を構成する。実際に、アルゴリズムが生成する区分線形写像は、真の等角写像へと収束することが示されている (近似解の真の解への収束性などの詳細は、円充てんについて詳しい Stephenson⁽⁹⁾などを参照)。

He⁽⁷⁾は円充てんが誘導する区分線形写像を与える三角形分割を変更し、区分線形写像のベルトラミ係数が、与えられたベルトラミ係数 μ に近い値をとるようにすることで、対応する擬等角写像の近似を構成している。He⁽⁷⁾は補題2を応用し、構成した擬等角写像の近似が、実際に真の解に収束することを示している。このほか、円充てんによる三角形分割を改良する形で近似解を構成するものとしては、Williams⁽¹⁰⁾がある。

4.2.2 区分線形写像を直接構成する方法

Porter⁽¹¹⁾は、擬等角写像を近似する区分線形写像を、円充てんを経由せず直接構成する方法を提示した。この方法では、はじめにベルトラミ係数を複素平面全体に、円に関し対称に、次のように拡張する：複素平面上の可測関数 $\hat{\mu}(z)$ を、 D の内部では μ, \overline{D} の外部では $\frac{z}{\overline{z}}\overline{\mu(\frac{1}{\overline{z}})}$ で定義する。

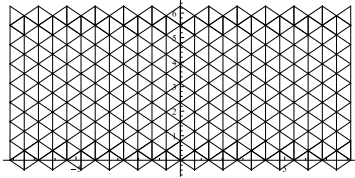


図 6 定義域の三角形分割 T_Z

$\hat{\mu}(z)$ をベルトラミ係数にもち、0 と 1 を固定する複素平面上の擬等角写像を $f^{\hat{\mu}}$ とする。対数座標 $Z = \log z$ をとれば $F(Z) := \log f^{\hat{\mu}}(e^Z)$ は虚軸に関し対称性をもつ^(注6)。自然数 M, N をとり、 $F(Z)$ の定義域内の $R_{M,N} := \{Z \in \mathbb{C} : 0 \leq \text{Im}Z < 2\pi, |\text{Re}Z| < M \times (\pi\sqrt{3}/N)\}$ の三角形分割を次のように与える：一辺の長さが $2\pi/N$ の正三角形を一つとり、原点を頂点に含み虚軸と平行になるように配置した後、合同な正三角形を $2MN$ 個に敷き詰める（図 6 を参照）。

この三角形分割を用いて、三つの方程式により線形系を構築する。一つめの方程式は、各点ごとに局所的には線形擬等角写像により近似できるという性質を用いる。各三角形上の F のベルトラミ係数^(注7)の平均値を μ_c とするとき、 μ_c をベルトラミ係数としてもつ線形擬等角写像が、三角形分割内の三角形 (Z_1, Z_2, Z_3) を三角形 (W_1, W_2, W_3) に写すとすれば、

$$L_{\mu_c}(Z_2 - Z_3)W_1 + L_{\mu_c}(Z_3 - Z_1)W_2 + L_{\mu_c}(Z_1 - Z_2)W_3 = 0$$

が成立する。ここで、 $L_{\mu_c}(Z) = (Z + \mu_c \bar{Z}) / (1 + \mu_c)$ である。これにより、三角形分割内の $2MN$ 個の三角形分の方程式を立てる。

二つめの条件は、半径 r の円の f^{μ} による像は、 r が十分小さければだ円に近い形状となることを利用した境界条件である。具体的には、三角形分割の左端若しくは右端の隣り合う 2 点 E_k, E_{k-1} の像 $W_{-M,k}, W_{-M,k-1}$ が、

$$W_{-M,k} - W_{-M,k-1} = E_k - E_{k-1}$$

を満たすという方程式を $2(N-1)$ 個立てる。ただし $E_k := \log L_{\mu_0}(e^{Z_{-M,k}})$ である。

最後に、 f^{μ} が 1 を固定するという条件を加える。これは、 z_0 に対応する点を W_0 とすれば、 $W_0 = 0$ に対応する。

以上のように構成された線形系は W_j を縦一列に並べた縦ベクトルを W とすると、線形系は $AW = B$ という形で表すことができる。線形系は優決定系であるため、 $\|AW' - B\|_2$ を最小化する V' を近似解としてとる。頂点 $\{Z_{j,k}\}, \{W_{j,k}\}$ ($-M \leq j \leq 0, 0 \leq k \leq N$) に e^z を適用したものを $\{z_{j,k}\}, \{w_{j,k}\}$ とし、各頂点の対応から得られる区分線形写像を近似解とする。補題 2 を用いて、一定の条件下での収束性が示されている。同アルゴリズムにより構成した数値擬等角写像の例を図 7 に示す。ベルトラミ係数は $\mu(z) = 0.9 \sin 30|z|$ と設定している。各三角形の対応がその上での線形写像を定め、それらは辺の上で連続につながっているため、定義域の全体で連続となる。

(注6)：なお、後に構成する $F(Z)$ の近似解も虚軸に関する対称性をもち、特に虚軸上の点の像はまた虚軸上の点に写ることが分かる。虚軸上には、単位円周上の点の e^z による像が存在することに注意されたい。

(注7)：ベルトラミ係数に関する連鎖律から求めることができる。

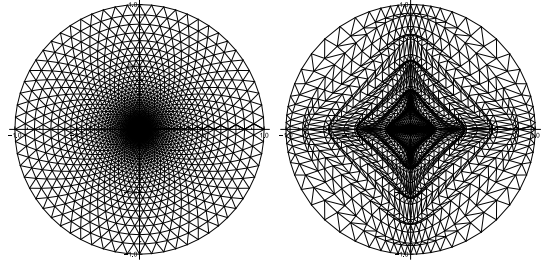


図 7 $\mu(z) = 0.9 \sin 30|z|$ をベルトラミ係数としてもつ単位円板の自己擬等角写像 (左：定義域、右：値域)

4.3 数値擬等角写像の応用

擬等角写像は、表面を同相かつ柔軟に変形できることから、複雑な表面の画像処理に用いられている。Hurdal ら⁽¹²⁾は、脳の灰白質の等角地図の作成に応用した。人間の脳の灰白質は、広げると 1 枚のシート状になることが知られており、この応用例ではその表面の地図を（地球のメルカトル図法による地図のように）角度の情報を保存する形で作成する。具体的には、MRI などにより得られた脳の灰白質の三角形分割を、平面の上に重なりが生じないように同相に移した後（このとき、角度は変化してもよい）、元の三角形各頂点における角度の比を復元するようにベルトラミ係数を定め、これに対応する擬等角写像を構成して合成することで、等角地図を描く。Hurdal らは、円充てんを応用しこれに対応する擬等角写像を構成している。

この例をはじめとして、医用画像処理の分野に多くの応用例がある。例えば Chan ら⁽¹³⁾は、擬等角写像を用いて海馬表面の形状を定量的に解析し、アルツハイマー病の患者と健常者間の違いを分析している。また、海馬など脳の形状を扱う場合、頂点数が数万に及ぶ三角形分割を多数扱うため、データのサイズが数十 GB になることもある。Lui ら⁽¹⁴⁾は三次元の表面間の写像をベルトラミ係数に変換し、更にフーリエ変換を活用して圧縮し、必要ときにベルトラミ正則流を用いた数値擬等角写像により元のデータを再構成する方法を提案している。

表面の画像処理以外の用途としても、Astala ら⁽¹⁵⁾による内部導電率を境界の電圧-電流測定から再構成するカルデロン逆問題への応用に向けた CGO (Complex Geometrical Optics) 解の構成や、Gaidashev-Yampolsky⁽¹⁶⁾による擬等角写像の精度保証付き数値計算を複素力学系分野における問題へ応用した研究などがある。

5. 擬等角写像の機械学習への応用

前節では、擬等角写像の数値的な構成手法と、それらの直接的な応用について述べた。近年、擬等角写像論の概念や手法が、機械学習の分野に手法の中で応用されている。本節では、画像データの拡張、ニューラルネットワークのアーキテクチャ及び活性化関数、更にデータの教師なし表現学習における応用事例について紹介する。

5.1 画像のデータ拡張への応用

画像の識別や異常検知といった問題においては、タスクの性質によっては、Transformer や CNN (Convolutional Neural Network) を基盤とする大規模な学習済みモデルをファインチューニングすることで、実用上十分な性能を得ることが可能である。しかしながら、特定の医用画像、衛星画像、あるいは製造業における外観検査のように、対象とする画像が非常に限定された領域に属する場合には、学習済みモデルと入力データとの分布の乖離により、期待どおりの性能を発揮しないことも少なくない。

また、モバイルデバイス向けなど計算資源が限られた環境における軽量なモデルの構築に際しては、CNN ベースのアーキテクチャが広く採用されている。CNN は、局所的な平行移動に対しては畳み込み演算及びプーリング操作により一定の変換不変性を示し、画像内で同一パターンが位置を変えて出現しても有効に検出できる。一方で、回転や射影変換 (射影変形) といったより高次の幾何学変換に対する不変性は本質的に備えていないという構造的制約を有している。このため、CNN の性能を補う目的で、アフィン変換などを学習データに適用して生成したデータを元のデータセットに加える方法や、敵対的生成ネットワークなどの生成モデルを用いて学習データに類似した新規サンプルを合成する方法など、人工的にデータセットを拡張する各種データ拡張手法が、事前処理として用いられている。

等角写像の応用例としては、Zhou ら⁽¹⁷⁾によって提案された、メビウス変換を用いたデータ拡張手法が挙げられる。この手法は、従来の平行移動・回転・スケーリングに加え、より広範な幾何変形に対しても高い識別性能を維持できることが報告されている。

擬等角写像を用いたものとしては、Zhang ら⁽¹⁸⁾によるデータ拡張手法がある。極めて限られたデータ量しか得られない腫瘍画像を対象とした研究において、局所的な角度のひずみを抑制しつつ、部位ごとに異なる自然な伸縮やゆがみを導入することで、CNN による識別性能の向上に寄与することを示している。

5.2 ニューラルネットワークのアーキテクチャ

深層ニューラルネットワークを基盤とする人工知能 (AI) は、近年、画像認識、自然言語処理をはじめとする多様な分野において顕著な成果を挙げており、その有用性は疑いようがない。こうした応用の広がりを背景に、タスク特性に応じた最適なニューラルネットワークアーキテクチャの設計や、ネットワークに非線形性を導入するための活性化関数に関する研究が、依然として活発に行われている。加えて、近年では、解析学的・幾何学的知見をニューラルネットワークに取り入れる試みも進展しており、擬等角写像の技法を用いたものも提案されている。

Chen⁽¹⁹⁾らは、画像レジストレーションを可微分同相な形とするために、ベルトラミ係数を介して可微分同相写像を構成するニューラルネットワークのアーキテクチャ QCRegNet (Quasi-Conformal Registration Network) を提案している。この手法では、固定画像と移動画像のペアを入力とし、それら

の間の擬等角写像に対応するベルトラミ係数を、CNN ベースの Estimator Network により出力する。出力されたベルトラミ係数から、対応する擬等角写像を Beltrami Solver Network を用いて再構成することで、可逆性と微分可能性をもつ画像レジストレーションを実現している。

5.3 ニューラルネットワークの活性化関数

筆者⁽²⁰⁾は、画像識別などの画像を扱うタスクにおける表現の獲得のための、確率的線形擬等角写像を用いたニューラルネットワークの活性化関数の提案をしている。

Shridhar ら⁽²¹⁾は、確率的摂動項をもつ活性化関数 ProbAct を提案した。ProbAct は、決定論的な活性化関数 $g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ に対し、乱数 ϵ とそのスケーリングパラメータ $\sigma \in \mathbb{R}$ を用いて構成する摂動項を加えた関数

$$\text{ProbAct}(x) := g(x) + \sigma \epsilon$$

として定義される。 σ は定数を指定してハイパーパラメータとして扱う場合と、学習可能なパラメータとして扱う場合の両者が、 ϵ は正規分布 $\mathcal{N}(0, 1)$ に従う場合とシグモイド関数を用いて絶対値に制限を加える場合の両者が検討されている。更に、 σ を学習可能なパラメータとして扱う場合には、 σ をレイヤーで共有する場合と、ニューラルネットワーク内の全ノードに対し適用する場合を検討している。この手法は直感的には、ニューラルネットワーク内部で確率的摂動を導入することで、内部的なデータ拡張を実現していると捉えることができる。標準的な活性化関数と比較し、画像分類タスクにおける識別精度の向上が報告されている。

ProbAct は \mathbb{R} から \mathbb{R} への確率的関数であるが、これを \mathbb{C} から \mathbb{C} への確率的関数にそのまま拡張することを考える。すなわち、 $g: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ を決定論的な複素活性化関数とし、複素乱数 ϵ とそのスケーリングパラメータ $\sigma \in \mathbb{R}$ を用いて、複素ニューラルネットワークの場合の ProbAct を $\text{ProbAct}(z) := g(z) + \sigma \epsilon$ と定義する。ProbAct(z) は、 $g(z)$ の値を複素平面上で $c := \sigma \epsilon$ だけ平行移動するものであり、線形な等角写像 $h(z) := z + c$ の後からの合成とみなせるため、ベルトラミ係数は $g(z)$ から変化しないことが分かる。

そこで、ベルトラミ係数に対して摂動を与えることを考えたのが確率的複素活性化関数 BelAct である。複素数の乱数 μ とそのスケーリングパラメータ $\sigma \in \mathbb{R}$ を用いて、

$$\text{BelAct}(z) := g(z + \sigma \mu \bar{z})$$

と定義する。ここで、関数 $l(z) := z + c\bar{z}$ ($c \in \mathbb{C}$) のベルトラミ係数は c であり、BelAct は $g(z)$ に対しこのベルトラミ係数に変化を与える関数 $l(z)$ が前から合成されているとみなせることに注意されたい。BelAct もニューラルネットワーク内部においてある種のデータ拡張を行うものと考えられるが、擬等角な摂動を与えるため、等角な摂動を与える ProbAct では生成し得ない表現が生成されうる。更に、BelAct に対し ProbAct の確率的な平行移動を加える活性化関数 ProbBelAct を

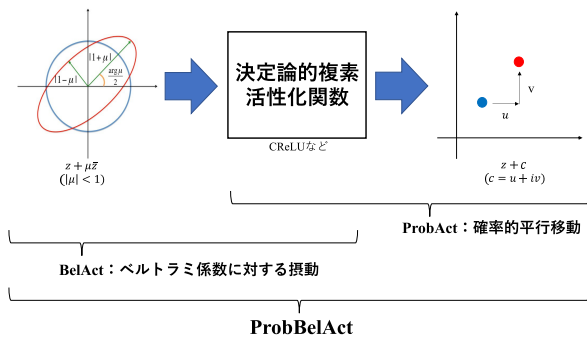


図 8 ProbAct, BelAct, ProbBelAct の関係

$$\text{ProbBelAct}(z) := g(z + \sigma_1 \mu \bar{z}) + \sigma_2 \epsilon$$

と定義する (図 8 を参照)。ProbAct, BelAct の場合と同様に、 μ, ϵ は複素乱数、 σ_1, σ_2 はそれらのスケールパラメータであり、ProbAct と同様に定数として扱う場合と学習可能な場合についても検討している。ProbBelAct は、とりわけデータ数が制限されている場合の画像の識別の実験において、CNN ベースのアーキテクチャを用いた場合の性能が向上している。

5.4 教師なし表現学習

予測タスクに機械学習を用いる際には、予測結果に寄与する表現を、学習の中で効果的に生成することが重要となる。例えば、CNN では、畳み込み層が画像のフィルタとして機能し、局所的な特徴を集約することで予測に有効な表現を形成している。このような課題に対して、教師あり学習における表現学習では、学習タスクに強く依存した特徴のみが獲得される傾向があり、獲得された特徴が別のタスクに活用できないことも少なくない。これに対し、自己教師あり学習は、ラベル付きデータを用いずに、大規模なラベルなしデータから有用な特徴表現を事前学習する手法として注目を集めている。具体的には、擬似ラベルを用いた代替タスク (Pretext Task) を通じて、教師なしで多様な下流タスクに有用な表現を獲得することが可能となる。近年では、帰納バイアスの弱い Transformer アーキテクチャを活用し、極めて大規模なデータセットから高品質な特徴表現を学習する手法が発展している。このような手法は、大規模言語モデルや、画像を対象とした基盤モデルなどに応用されており、自然言語処理やコンピュータビジョンの分野で顕著な成果を挙げている。ただし、この枠組みは、本質的に膨大な学習データを前提としており、データが潤沢に存在しない領域では適用が困難となる場合がある。

このような背景のもと、筆者ら⁽²²⁾は、データ量・特徴空間の次元が限られた場合においても、有用な表現を獲得する手法として、データ空間の幾何学的構造に着目し、多様体仮説^(注8)に基づき特徴空間を幾何学的に自然に拡張することで、より豊かな表現を構成・活用できないかを検討した。そのような拡張の候補として着目したのが、擬等角拡張である。擬等角拡張とは、特定のク

(注8)：高次元の観測データは、より低次元の多様体上に分布しているとする仮説である。ここでは、データが存在していた多様体から切り取られ、情報が落ちた状況を想定しており、次元を削減する多様体学習とは逆のアプローチを考えている。

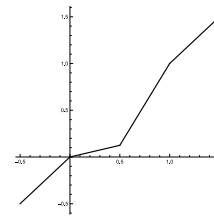


図 9 実軸の自己区分線形同相写像 f (擬対称関数)

ラスの写像をより高次元の空間における擬等角写像へと拡張する手法であり、例えば単位円周上の自己同相写像を、単位閉円板上の自己擬等角写像へと、一意かつ等角自然^(注9)に拡張するドゥアディ・アール拡張がよく知られている。その他、幾何学的性質やレギュラリティが異なる擬等角拡張や、高次元空間における擬等角写像及び擬等角拡張についても、研究が進められている。

筆者は、実軸の自己同相写像を上半平面上の自己同相写像に拡張するブーリン・アールフォルス拡張を用いた教師なし表現学習の手法を検討した。ブーリン・アールフォルス拡張は、実軸を実軸に写す擬対称関数を、上半平面の自己擬等角写像へと拡張する。ここで、関数 $g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ が擬対称関数であるとは、ある定数 L が存在して任意の正の実数 t に対し次の関係を満たすことをいう。

$$\frac{1}{L} \leq \frac{g(x+t) - g(x)}{g(x) - g(x-t)} \leq L$$

擬対称写像は、有限な区間を有限な区間に写すような写像であり、区分線形写像もその一例となっている。ブーリン・アールフォルス拡張は、以下の積分による変換を用いて $g(x)$ を複素平面間の擬等角写像 $f(x, y) := u(x, y) + iv(x, y)$ に直接拡張する。

$$u(x, y) := \frac{1}{2y} \int_{-y}^y g(x+t) dt,$$

$$v(x, y) := \frac{1}{2y} \int_0^y (g(x+t) - g(x-t)) dt$$

筆者⁽²²⁾は、特徴の分布と一様分布の対応関係から導かれる実軸の区分線形自己同相写像を構築し、ブーリン・アールフォルス拡張の計算アルゴリズムを適用することで、データの分布を反映した上半平面上の自己擬等角写像を構成し、そこから新たな特徴をサンプリングする形で特徴空間を拡張する手法を提案した。図 9 に実軸の自己区分線形写像の例を、図 10 にそのブーリン・アールフォルス拡張により得られた擬等角写像の実部と虚部の等高線を示す。15 種類のデータセットと三つの機械学習手法 (深層全結合ニューラルネットワーク、サポートベクトルマシン、Extremely Randomized Trees) を用いた実験において、予測に必要な情報を十分に含むデータセットに対しては、提案手法による特徴空間の拡張により性能が向上している。更に、筆者⁽²³⁾は、拡張された特徴空間の上で敵対的生成ネットワークによりその分布を学習し、特徴空間が拡張されたデータを量的にも拡張する方式により、5 種の教師あり外れ値検出のデータセットにおいても性能が向上することを示している。

(注9)： E を、単位円周の自己同相写像を、単位閉円板の自己同相写像へ写す写像とすると、任意の単位円板の自己等角写像 (メビウス変換) ϕ, ψ に対し、 $E(\phi \circ f \circ \psi) = \varphi \circ E(f) \circ \psi$ を満たすとき、等角自然であるという。

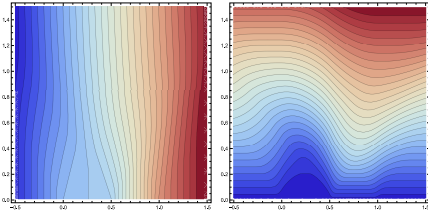


図 10 図 9 の f のブーリン・アールフォルス拡張 \hat{f}
 (左) \hat{f} の実部の等高線, (右) \hat{f} の虚部の等高線.

6. 結 言

本稿では、擬等角写像の定義・理論的基盤から数値的構成法、さらには画像処理や機械学習への応用に至るまでを俯瞰した。まず、可測型リーマン写像定理を介してベルトラミ方程式の同相写像の存在と一意性を整理し、数値的構成手法として特異積分作用素を用いる方法、フローに基づく反復法、及び円充てんや線形系による区分線形写像による方法を概説した。続いて、脳の灰白質の等角地図の作成、医用データの圧縮、導電率逆問題、複素力学系分野の問題などへの応用例を紹介し、さらにデータ拡張、ニューラルネットワークのアーキテクチャおよび活性化関数、教師なし表現学習へと広がる機械学習分野での活用事例を取り上げた。幾何学的柔軟性と同相性を兼ね備える擬等角写像の応用領域には、なお大きな拡張の余地が残されている。本稿が、読者諸賢の分野横断的な研究活動に一層の刺激を与える一助となれば幸いである。

文 献

- (1) L.V. Ahlfors, Lectures on Quasiconformal Mappings, 2nd ed., American Mathematical Society, Providence, RI, 2006.
- (2) L.V. アールフォルス (著), 谷口雅彦 (翻訳), 擬等角写像講義, 丸善出版, 東京, 2015.
- (3) P. Daripa, “A fast algorithm to solve the Beltrami equation with applications to quasiconformal mappings,” J. Comput. Phys., vol.106, no.2, pp.355–365, 1993.
- (4) D. Gaidashev and D. Khmelev, “On numerical algorithms for the solution of a Beltrami equation,” SIAM J. Numer. Anal., vol.46, no.5, pp.2238–2253, 2008.
- (5) L.M. Lui, T.W. Wong, W. Zeng, X. Gu, P.M. Thompson, T.F. Chan, and S.-T. Yau, “Optimization of surface registrations using Beltrami holomorphic flow,” J. Sci. Comput., vol.50, pp.557–585, 2012.
- (6) W. Zeng, L.M. Lui, F. Luo, T.F.-C. Chan, S.-T. Yau, and D.X. Gu, “Computing quasiconformal maps using an auxiliary metric and discrete curvature flow,” Numer. Math., vol.121, no.4, pp.671–703, 2012.
- (7) Z.-X. He, “Solving Beltrami equations by circle packing,” Trans. Amer. Math. Soc., vol.322, no.2, pp.657–670, 1990.
- (8) B. Rodin and D. Sullivan, “The convergence of circle packings to the Riemann mapping,” J. Differ. Geom., vol.26, no.2, pp.349–360, 1987.
- (9) K. Stephenson, Introduction to Circle Packing: The Theory of Discrete Analytic Functions, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K., 2005.
- (10) G. Williams, “A circle packing measurable Riemann mapping theorem,” Proc. Amer. Math. Soc., vol.134, no.7, pp.2139–2146, 2006.

- (11) R.M. Porter and H. Shimauchi, “Numerical solution of the Beltrami equation via a purely linear system,” Constr. Approx., vol.43, pp.371–407, 2016.
- (12) K.M. Hurdal, J.A. Meyer, K.E. Gee, and S.D. Joshi, “Quasi-conformally flat mapping the human cerebellum,” Proc. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI’99), pp.279–287, 1999.
- (13) H.L. Chan, H. Li, and L.M. Lui, “Quasi-conformal statistical shape analysis of hippocampal surfaces for Alzheimer’s disease analysis,” Neurocomputing, vol.175, pp.177–187, 2016.
- (14) L.M. Lui, T.W. Wong, P. Thompson, T. Chan, X. Gu, and S.-T. Yau, “Compression of surface registrations using Beltrami coefficients,” Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.2085–2092, 2010.
- (15) K. Astala, L. Paivarinta, and S. Siltanen, “Numerical computation of complex geometrical optics solutions to the conductivity equation,” Appl. Comput. Harmon. Anal., vol.29, no.1, pp.2–17, 2010.
- (16) D. Gaidashev and M. Yampolsky, “Golden mean Siegel disk universality and renormalization,” Moscow Math. J., vol.22, no.3, pp.451–491, 2022.
- (17) S. Zhou, J. Zhang, H. Jiang, T. Lundh, and A.Y. Ng, “Data augmentation with Mobius transformations,” Mach. Learn.: Sci. Technol., vol.2, no.2, 025016, 2021.
- (18) M. Zhang, D. An, G.S. Young, X. Gu, and X. Xu, “A quasi-conformal mapping-based data augmentation technique for brain tumor segmentation,” Med. Imaging 2020: Image Processing, Proc. SPIE, vol.11313, 2020.
- (19) Q. Chen, “A deep learning framework for diffeomorphic mapping problems via quasi-conformal geometry applied to imaging,” SIAM J. Imag. Sci., vol.17, no.1, pp.501–539, 2024.
- (20) H. Shimauchi, “An activation function with probabilistic Beltrami coefficient for deep learning,” Proc. Int. Conf. Agents and Artificial Intelligence (ICAART), vol.3, pp.613–620, 2022.
- (21) K. Shridhar, A. Kulkarni, and K. Lakshmanan, “Proback: A probabilistic activation function for deep neural networks,” arXiv preprint arXiv:1905.10761, 2019.
- (22) H. Shimauchi, “Unsupervised representation learning by quasiconformal extension,” Proc. Int. Joint Conf. Computational Intelligence (IJCCI), pp.440–449, 2023.
- (23) H. Shimauchi, “Quasiconformal Extension-Based Unsupervised Representation Learning and Application to Semi-supervised Outlier Detection,” Comput. Intell., vol.1196, pp.187–210, 2025.

(CAS 研究会提案, 2025 年 5 月 31 日受付)

2025 年 6 月 30 日再受付)



島内宏和 (正員)

2015 東北大学大学院情報科学研究科情報基礎科学専攻修了, 博士 (情報科学)。同年, 山梨英和大学人間文化学部人間文化学科助教。2016 東京工業大学理学院流同研究員。2018 東京財団政策研究所政策データラボデータサイエンティスト, 東京工業大学理学院特別研究員。2020 八戸工業大学工学部システム工学科講師。2022 八戸工業大学工学部工学科准教授。2024 公立はこだて未来大学システム情報科学部複雑系知能学科准教授。機械学習の手法の構築と応用及び擬等角写像の数値構成手法に関する研究に従事。IEEE/ACM BDCT 2019 Best Paper Candidates, IJCCI 2023 Best Paper Candidates.

物質科学と情報科学の融合による高分子ニューラルネットワーク

Polymer Neural Networks Based on the Fusion of Materials and Information Science

赤井 恵 Megumi AKAI-KASAYA

アブストラクト ソフトウェアとして実装されてきた今の人工知能は、これからも大きい発展の期待を抱かせるものではあるものの、メモリとCPUが解離した中で人工知能計算を我々の身近なところで利用するには、その電力効率の悪さや通信量増大の面で大きな課題がある。一方で我々の脳は高度なリアルタイム処理を圧倒的に省電力で行えており、これは脳の構成単位である神経細胞（ニューロン）とそれらを繋ぐシナプスが織りなす高密度な三次元ネットワークがもたらすダイナミクスに起因していると考えられている。近年、人工知能処理を加速させる次世代ハードウェアとして、脳の仕組みを物理的に模倣したアナログ脳型コンピュータが注目されているが、提案されているそれらの機構は実際の脳の三次元構造とは大きく解離している。意外なことに、三次元の配線技術は我々の科学技術におけるミッシングテクノロジーである。何もない空間を任意に配線する技術は高い需要があるにもかかわらず実現されていない。脳のニューラルネット構造を三次元構造によって創造することにより、より低コストで低エネルギー消費でありながら非常に複雑な計算を解く人工知能的な構造を構築し得るのではないかと考えている。本稿では、これらの物質科学と情報科学の融合によって構成する高分子ニューラルネットワークについて、研究分野、現状の課題と筆者らの研究を紹介および解説する。

キーワード ソフトコンピューティング, 3D 配線, ニューラルネットワーク, 導電性ポリマ

Abstract Current artificial intelligence, which has been implemented as software, is expected to continue to develop greatly. However, in using artificial intelligence calculations in our daily lives, there are major challenges such as low power efficiency and increasing communication traffic that must be overcome. On the other hand, our brain can perform advanced real-time processing with overwhelmingly low power consumption, which is thought to be due to the dynamics brought about by the high-density three-dimensional network woven by nerve cells (neurons), the building blocks of the brain, and the synapses that connect them. In recent years, analog brain-type computers that physically mimic the mechanisms of the brain have been attracting attention as next-generation hardware to accelerate artificial intelligence processing, but the mechanisms proposed for these are significantly different from the actual three-dimensional structure of the brain. Surprisingly, three-dimensional wiring technology is missing in our science and technology. We believe that by creating the neural network of the brain in a three-dimensional structure, it may be possible to build an artificial intelligence structure that can solve very complex calculations at a lower cost and with lower energy consumption. In this article, we will introduce and explain the research field, current issues, and efforts regarding polymer neural networks, which are the fusion of material and information sciences.

Key words Soft computing, Three-dimensional wiring, Neural network, Conductive polymer

1. まえがき

人間の脳は、ニューロンと呼ばれる多数の電氣的に興奮性のある細胞で構成されており、ニューロンは軸索を伸ばして互いにシナプス結合を形成することで複雑で精巧な3Dネットワークを形成している。軸索誘導による3D神経結合の形成⁽¹⁾は、皮質で観察されている階層的な神経構造を形成する上で非常に重

要なプロセスであると考えられており⁽²⁾、⁽³⁾、自閉症や統合失調症などの疾患との関連でしばしば研究される⁽⁴⁾、⁽⁵⁾。最近では、人工知能(AI)も深い情報処理層をもつ階層型人工ニューラルネットワーク(ANN)モデルを採用することで大きな成果を上げており、このようなソフトウェアベースのディープラーニング(DL)モデルは、幾つかの特定のタスクで実際の人間の脳のパフォーマンスを上回る。しかしながら、推論と学習中の消費電力と処理速度の点で両者の間には大きなギャップが残っているのが現状である。ニューロンは数十msという遅い速度で電気信号を伝達するが、人間の脳は最小限の電力で複雑な情報処理をリアルタイムで実行可能である⁽⁶⁾、⁽⁷⁾。一方で従来のコンピュータは中央集権型のフォン・ノイマン・アーキテクチャに基づいており、メモリ分散ネットワークで構成される脳とは大きく異なる。このアーキテクチャの違いが、人間の脳の優れた

赤井 恵 正員 大阪大学大学院理学研究科化学専攻
E-mail akai@chem.sci.osaka-u.ac.jp
Megumi AKAI-KASAYA, Member (Department of Chemistry, Graduate School of Science, Osaka University, Toyonaka-shi, 560-0043 Japan).

電子情報通信学会 基礎・境界サイエンス
Fundamentals Review Vol.19 No.2 pp.105-113 2025 年 7 月
©電子情報通信学会 2025

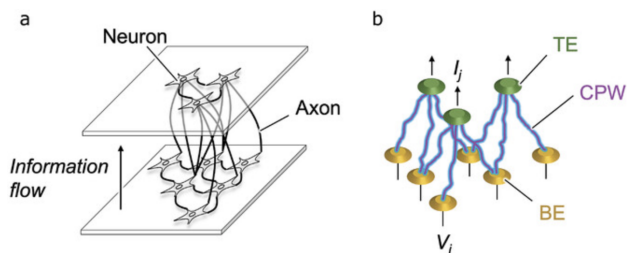


図 1 (a) 皮質内の異なる情報処理レベルにおける隣接するニューロン間の 3D 神経接続の模式図。(b) 上部電極と下部電極の間に導電性ポリマワイヤ (CPW) の 3D 配線を適用した、提案されたニューロモルフィックウェットウェアアーキテクチャの模式図。

機能性の原因であると考えられている⁽⁸⁾。

近年、従来のコンピュータに比べてエネルギー損失が少なく、ANN 処理が高速な新しいメモリスティブデバイスに基づく、脳にヒントを得たアナログニューロモルフィックハードウェアが大きな注目を集めている^{(9), (10)}。従来のニューロモルフィックハードウェアアーキテクチャは、主に 2D クロスバーアレイに基づいており、従来の統合技術を使用して、小さな回路領域で ANN モデルに見られる完全に接続された重みをエミュレートする。一方、実際の皮質のニューラルネットワークは、隣接するニューロンのみが簡単に接続を確立できるローカルな 3D 接続をもっている。このアーキテクチャの大きなギャップにより、2D クロスバーアレイは、完全に接続された ANN モデルに最適化された構造であるため、DL モデルでよく使用されるローカルに接続された重みをもつ ANN モデルの実装には適さない。つまり、デバイスの製造時に、2本の直交するワイヤの全ての交差点にメモリスティブデバイスが事前に配置されるため、未使用のメモリスティブデバイスが大幅に増加するという欠点を持っている⁽¹¹⁾。

ハードウェアアーキテクチャは、実際の脳に匹敵する 3D 及び密度特性という要件を満たしているが、ニューロモルフィック電気回路の 3D 統合に関しては、まだ多くの課題に対処する必要がある。特に、軸索の延長のように、導電性ファイバを使用して 3D 空間に配置された任意の電極をリンクする有望な技術の開発は、依然として非常に困難である。その結果、従来のハードウェアは、製造コストがかなりかかるシリコン貫通ビア技術 (TSV) に大きく依存している。最近では、電気重合によって成長し、前駆体溶液に浸した電極間をリンクする導電性ポリマワイヤ (CPW) を使用した幾つかのニューロモルフィックネットワーク回路が、3D ニューロモルフィックエンジニアリング用に提案されている。これは、脳の 3D 構造を物理的にエミュレートする優れた可能性によるものである。例えば、以前我々は、リンクする CPW の数を制御しながら複数の電極ギャップ間のコンダクタンス変更を適用することにより、機械学習の物理的な実装を実証した⁽¹²⁾。また、Janzakova らは CPW で接続された 2本の Au ワイヤと追加のゲート電極で構成される有機電気化学トランジスタを作製することで、シナプスコンダクタンスを修正した⁽¹³⁾。Cucchi らは、複数の電極にまたがる CPW を使用

してネットワーク回路を構築し、その非線形特性を生体信号モニタリング用のリザーブコンピューティング (RC) の物理的実装に適用した⁽¹⁴⁾。

CPW のニューロモルフィックな応用可能性を考慮すると、目覚ましい進歩が遂げられているにもかかわらず、ニューロモルフィック信号計算は、1D または 2D 平面上に成長した CPW の固有の電気的特性を適用することに限定されており、CPW の 3D 配線は十分に検討されていない。3D 配線技術の確立により、特定の 3D ニューロモルフィックアーキテクチャ⁽¹⁵⁾を実現でき、TSV に代わる 3D 空間での金属間伝導の基盤技術となり得るだろう。特に、3D ローカル畳み込み構造は 3D 配線でエミュレートでき、従来のクロスバーベースのものよりもフットプリントが小さいスマートなニューロモルフィックアーキテクチャを実現する可能性を秘めている。更に、ネットワークトポロジを 2D から 3D に拡張すると、マテリアルニューロモルフィックコンピューティングのパフォーマンスが向上すると考えられる。例えば、最近、材料リザーブ内のネットワークトポロジを 3D に拡張すると、非線形ダイナミクスとメモリ容量が向上し、マテリアル RC のパフォーマンスが向上することが報告されている⁽¹⁶⁾。

このような背景から、我々は、ポリスチレンスルホン酸アニオンを添加したポリ (3,4-エチレンジオキシチオフェン) (PEDOT:PSS) からなる CPW の 3D 配線技術の開発を目指している。PEDOT:PSS は、高い導電性、透明性、柔軟性、安定性を備えているため、フレキシブルで透明な電極⁽¹⁷⁾、エレクトロクロミックデバイス⁽¹⁸⁾、熱電デバイス⁽¹⁹⁾の製造に最も広く使用されている導電性ポリマの一つである。通常、これらのアプリケーションでは、スピンコートされた PEDOT:PSS 薄膜が使用されているが、PEDOT:PSS はワイヤに重合することもでき、その高い配線能力と生体適合性から、ワイヤデバイス⁽²⁰⁾やブレイン・マシン・インタフェース^{(21), (22)}への応用が期待されている。

2. PEDOT:PSS ワイヤのシナプス特性

PEDOT:PSS CPW は、EDOT モノマと PSS ドーパントの前駆体溶液に浸したマイクロ電極ギャップに、振幅 V_{grow} 、周波数数十 kHz の矩形波交流 (AC) 電圧を印加するだけで簡単に得られる。電極表面からの CPW の成長は電気重合によって起こり、成長した CPW は電極間の物理的及び電氣的リンクとして機能する。図 2 (a) に示すように、2D 平面上の複数の電極間で CPW を高い指向性で分岐配線することが可能である。一つの電極には振幅 $V_{\text{grow}} = 24 \text{ V}$ 、周波数 50 kHz のワイヤ成長電圧が印加され、他の二つの電極は 0 V にバイアスされ、もう一つの電極には振幅 $V_{\text{sup}} = V_{\text{grow}}/2$ の抑制電圧が印加されている。CPW の配線を望まない電極にワイヤ成長電圧と同じ位相の抑制電圧を印加することで、電極とほかの電極から成長した CPW が電氣的に反発し、配線の指向性が向上する。電界に沿って酸化された EDOT ラジカルカチオンによって形成された PEDOT ワイヤのこの指向性成長は、他グループによって

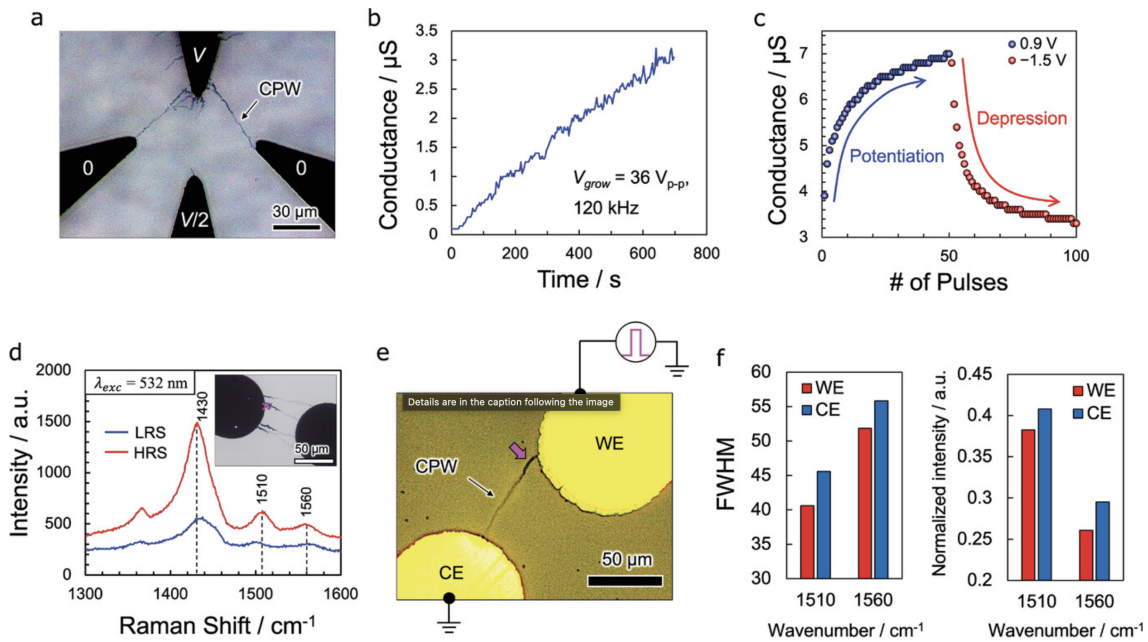


図 2 (a) PEDOT:PSS 導電性ポリマワイヤ (CPW) を 2D 分岐配線した光学顕微鏡画像. (b) Au 電極間のリンク CPW 数を増やすことで誘発されるシナプス長期増強 (LTP) の再現. (c) 電圧パルスとそれに続く CPW のドーピング及び脱ドーピング反応によって誘発される双方向コンダクタンススイッチングによるシナプス増強及び抑制の再現. (d) 電極ギャップを高抵抗状態 (HRS) または低抵抗状態 (LRS) に設定した後で得られた CPW のラマンスペクトル. (e) 作業電極 (WE) と対称電極間 (CE) の太さが非対称化した CPW の光学顕微鏡画像. (f) CPW の WE 側と CE 側で得られたラマンスペクトルの 1510 cm^{-1} と 1560 cm^{-1} のバンドの半値全幅 (FWHM) と相対強度.

報告された PEDOT ワイヤの配線制御研究^{(20), (23)}と一致している.

高い配線指向性に加えて、物理的または化学的特性を制御することでシナプスコンダクタンスを変更することも可能である^{(12), (24)}. 例えば、シナプス長期増強 (LTP)^{(25), (26)}は、連結 CPW の数や厚さを増やすことで再現できる. この場合、電極間のコンダクタンスは 1 方向に増加し、PEDOT:PSS の高い安定性により半永久的に保持できる. 図 2(b) は、 $50\text{ }\mu\text{m}$ のギャップで前駆体溶液に浸漬された二つの Au 電極間にワイヤ成長電圧 (120 kHz , 36 V) を印加した場合のコンダクタンスの向上の例を示している. 高周波のワイヤ成長電圧を印加して得られた連結細線の数を増やすことでコンダクタンスが直線的に向上し、高いコンダクタンス制御性を備えた LTP の特性を再現している.

理論的には、電圧印加によって CPW のドーピングレベルの変化を誘導することによってシナプス増強だけでなく抑制も再現することができ、その場合コンダクタンスを双方向に変更することが可能である. PEDOT のドーピングレベルの変化から得られるこのようなシナプスコンダクタンスの変更は、可逆的かつ連続的なコンダクタンス書き込み能力が高いため、広く研究されてきた^{(27), (28)}. しかしこの変更は、ソース電極とドレイン電極の間に PEDOT フィルムまたはワイヤが用意されているトランジスタタイプの 3 端子デバイスに限定される. 更に、ヘテロシナプス可塑性のようにそれらの間のコンダクタンスを変更するには追加のゲート電極が必要であり⁽²⁹⁾、集積密度が低く、信号制御が複雑になる.

図 2(c) に、2 端子制御による可逆的な短期コンダクタンス変更が、CPW で接続された電極ギャップにフォーミングと呼ばれる前処理を導入することによって誘発できることを示す. ここでは、比較的大きな電圧パルス (2.5 V , 10 ms) が作用電極 (WE) に連続的に印加され、対電極 (CE) は接地される. フォーミングプロセス後、WE に印加する小さな電圧パルスの数と極性を制御することで、コンダクタンスを高抵抗状態 (HRS) と低抵抗状態 (LRS) の間で連続的かつ可逆的に変更できるようになる. 図 2(d) は、電極ギャップを HRS または LRS に設定した後、 532 nm レーザラマン顕微鏡を使用して、前駆体溶液に浸したワイヤ上の点で取得したリンク CPW のラマンスペクトルを示している. このスペクトルでは、 1430 cm^{-1} の最も強いバンドが芳香族 $C_{\alpha} = C_{\beta}$ バンドの対称伸縮振動モードに割り当てられる. HRS で得られたラマン強度は、LRS で得られたものよりも大きく、これは、ドーピングレベルの低下とともに波長 532 nm での吸光度が増加することに起因するラマン散乱の増強によって発生する⁽³⁰⁾. このことから、誘導されたコンダクタンスの切り替えは、可逆的なドーピング/脱ドーピング反応 $\text{PEDOT}^+:\text{PSS}^- + \text{H}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{PEDOT}^0 + \text{H}^+:\text{PSS}^-$ に起因することが明確になる.

誘起されたコンダクタンスのスイッチングは、成形中にワイヤ表面で重合された新しく堆積したポリマフィルムの可逆的なドーピング/脱ドーピング反応に起因すると考えられ、図 2(e) に示すように、WE 周辺のワイヤ径が局所的に増加している. 新しく重合したポリマの特性を調べるために、成形後の WE と CE

3. 3D 配線システムの構築

周辺の2点でCPWのラマン分光特性評価を実施した。図2(f)は、各点で得られた非対称 $C_\alpha = C_\beta$ 伸縮モードに割り当てられた半値全幅 (FWHM) とバンド 1510 及び 1560 cm^{-1} の相対強度を示している。どちらのバンドでも FWHM と正規化された強度はワイヤの WE 側でより小さな値を示しており、CE 側よりもポリマ鎖の構造欠陥が少なく、移動度が高いことを示す⁽³¹⁾。したがって、WE と CE 間の伝導性は、新しく堆積したポリマフィルムのドーピングレベルの変化に敏感であると考えられる。

これらの特性に基づいて、コンダクタンススイッチングのメカニズムを以下にまとめる。ワイヤ成長電圧を印加することにより、WE の表面から CPW が成長し、形成中にワイヤ表面上の新しいポリマフィルムの電解重合が局所的に進行する。次に、WE に印加される比較的小さな電圧パルスが、パルスの極性に依りて進行するフィルムのドーピング/脱ドーピングを誘発し、WE と CE の間を流れる電流値を切り替える。ホモシナプス短期可塑性 (STP)^{(32), (33)} などの追加端子を使用しないこのようなコンダクタンススイッチングは、生物学的に妥当な人工シナプスを備えたニューロモルフィックエンジニアリングを提供し、それによって、任意の隣接電極間の配線を可能にし、実際のシナプスと同様にそれらの間のコンダクタンスを変更できることが期待される。

上記に示した CPW の方向性配線とコンダクタンス変更の機能を 3D に拡張することで、実際の脳と同様に、液体中で成長する高密度ネットワークが開発される可能性がある。つまり、3D 空間に密に配置された電極を前駆体溶液に浸した後、CPW を成長させて所望の電極間の局所的な接続を作り、それらの間の各コンダクタンスを最適化してネットワーク全体の学習を行う。ここでは、三角格子状に配置された三つのベース電極 (BE) と格子の中心に配置された一つのトップ電極 (TE) 間のコンダクタンス値を CPW の 3D 配線によって変更できるように設計された CPW の 3D 配線の実験システムを構築した。図 3(a) は、前駆体溶液中で、ガラス基板上に作製した三つの Au マイクロ電極を BE として、Au チップを TE として主に構成した実験システムを示している。三つの BE は、ガラス基板上にパターン形成された

Au フィルム上に 140 μm 間隔でスタッドバンプを作製することによって作成された (図 3(b))。各バンプの直径は 50 μm 、高さは 40 μm で、電界の集中により CPW の成長を促進するために鋭い先端がある (図 3(c))。先端直径が < 1 μm の Au チップ (図 3(d)) は、直径 0.25 mm の Au ワイヤから電気化学エッ

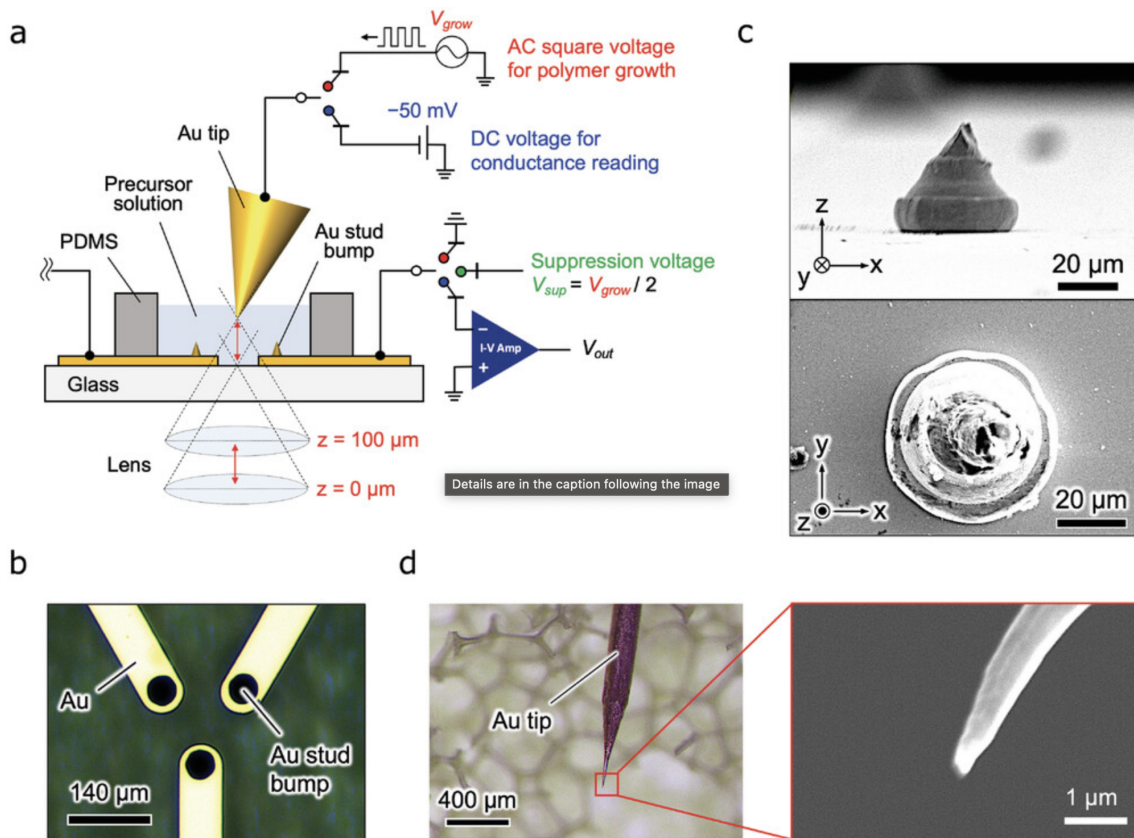


図 3 (a) 下部電極 (BE) として三つの Au スタッドバンプと上部電極 (TE) として Au チップから主に構成される構築された実験システムの概略図。ガラス基板の表面からの垂直距離 z は、倒立光学顕微鏡の焦点を調整して測定された。(b) Au フィルム上に配置された Au スタッドバンプで構成される CPW の 3D 配線に適した BE として作製された電極の光学顕微鏡画像。(c) 作製された Au スタッドバンプの上面及び側面の SEM 画像。(d) 電気化学エッチングによって TE として作製された Au チップの光学顕微鏡画像と SEM 画像。

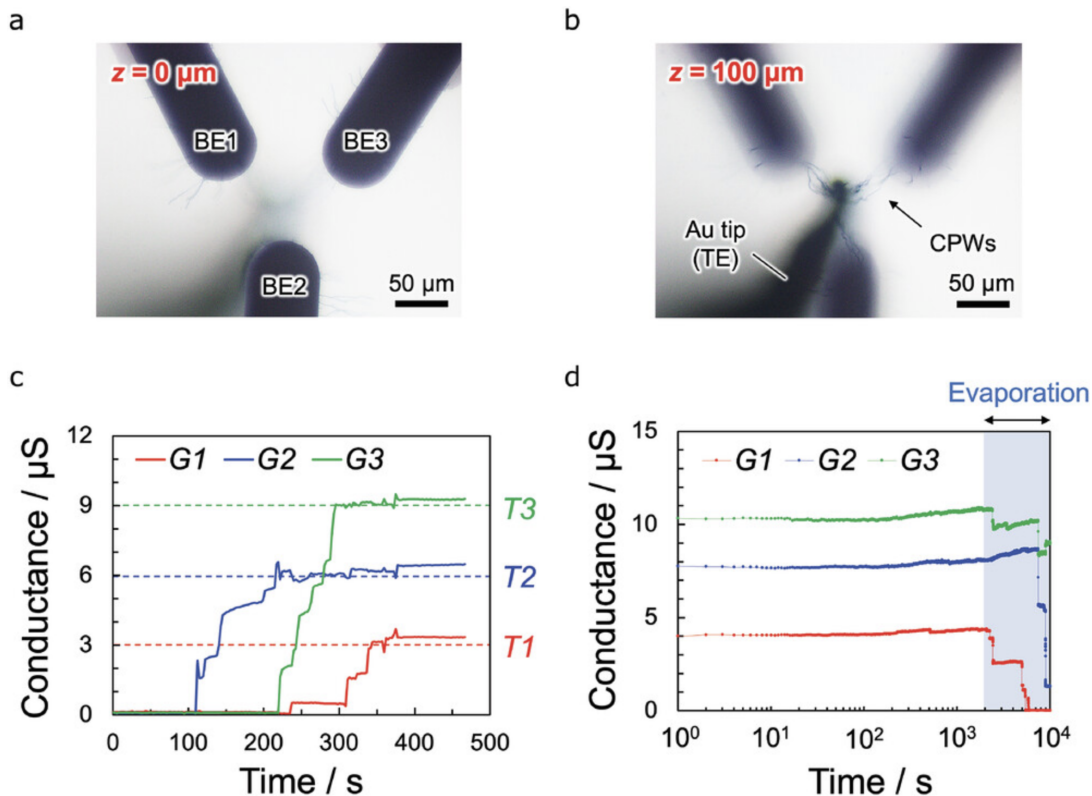


図4 (a, b) 上部電極 (TE) としての Au チップと下部電極 (BE) としての三つの Au スタッドバンプ間の 3D ポリマ配線の光学顕微鏡画像 ($z = 0 \mu\text{m}$ および $100 \mu\text{m}$). (c) 3D ポリマ配線による TE と三つの BE 間の三つのコンダクタンス値 G1, G2, 及び G3 の変更. 各コンダクタンス値は, $T1 = 3$, $T2 = 6$, 及び $T3 = 9 \mu\text{S}$ の目標値で変更された. (d) 浸漬中のワイヤと電極表面間の物理的及び化学的に堅牢な接触を確認する 3D ポリマ配線後のコンダクタンス保持.

チング法によって作製した⁽³⁴⁾. 全ての BE は, ポリジメチルシロキサン (PDMS) キャビティに充てんされた前駆体溶液に浸漬させる. キャビティの上部は常に開いており, TE 先端が接近できる. 溶液内の Au TE 先端の位置は, 倒立光学顕微鏡を使用してガラス基板の下からその場で観察することで, マイクロマニピュレータを使用して操作した.

先端の頂点を $z = 100 \mu\text{m}$ の BE の三角格子の中心に固定した後, BE を 0 V にバイアスした状態で TE にワイヤ成長電圧 (50 kHz , 24 V) を印加して CPW の 3D 成長を開始した. 図 4(a), (b) は, それぞれ $z = 0$ 及び $100 \mu\text{m}$ で TE と三つの BE (BE1, BE2, 及び BE3) の間をリンクする重合 CPW の光学顕微鏡画像を示している. リンク CPW の 3D 構造が明確に観察され, 先端と各バンプの頂点の間の距離は約 $85 \mu\text{m}$ と推定した.

次に, それぞれの BE に対する三つのコンダクタンス値 G1, G2, G3 を, それぞれ 3.00 , 6.00 , $9.00 \mu\text{S}$ の目標値 T1, T2, T3 に接近させるよう, リンク CPW の数を制御することにより配線制御を行った. 各コンダクタンス値は, TE に -50 mV をバイアスし, 各 BE を 2×10^6 の倍率で電流電圧 (I-V) 増幅器に切り替えることによって読み取った. $G_i < T_i$ の間に BE_i を 0 V に切り替えるか, または $G_i > T_i$ の間に抑制電圧 (50 kHz , 11 V) を印加し, TE にワイヤ成長電圧 (50 kHz , 22 V) を印加することにより, TE と BE_i 間のリンク CPW の数を制御でき,

対応するコンダクタンス値 G_i をほぼ T_i に正確に変更できた (図 4(c)). 興味深いことに, 各コンダクタンスは異なる時間に増強された. つまり, 一つのコンダクタンス値 G_i が目標値 T_i に到達し増強が完了した後, 別のコンダクタンス値 G_j が増強し始めた. これは, CPW の成長が一度に一つの TE-BE ペア間でのみ発生することを示している. この現象は, CPW が互いに競争しているかのように進行し, 勝者だけが成長できるため, 脳で見られる勝者総取り (WTA) 競争を思い起こさせる⁽³⁵⁾. この CPW の局所的な成長は, 前駆体溶液内の電界分布と, ワイヤ形成時に消費されるモノマによって生じる濃度勾配によって引き起こされるモノマ拡散に基づく, Ciccone らによって報告された理論を使用して説明できる⁽³⁶⁾. 複数のワイヤが同じ溶液内で同時に成長すると, モノマの供給は, 電界が最も強い 1 本のワイヤの頂点に集中することが分かる.

得られたコンダクタンス値は, 図 4(d) に示すように溶液に浸漬している間も安定して保持され, ワイヤの自重で剥がれることなく, CPW と電極表面との間の物理的及び化学的に堅牢な接触を示す. ただし, 溶液が PDMS キャビティの上部から蒸発し始めた後, 各コンダクタンスは不安定に変動し, 段階的に低下した. これは, 配線構造の変化または電極表面からの剥離に起因する. この測定では, Au チップアプローチのために PDMS キャビティの上部を開く必要があったため, 溶液の蒸発を抑えることができない. 蒸発のない環境での保持測定は, Au チップ

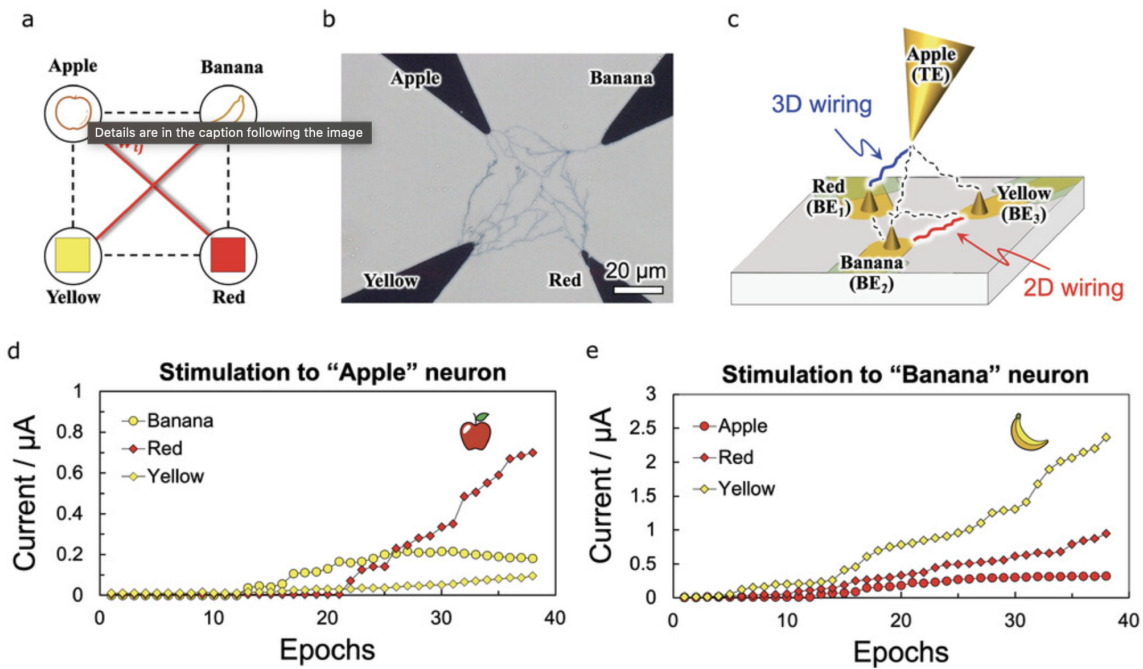


図5 (a) 実装されたヘブ学習モデルの概略図. それぞれ「リンゴ」, 「バナナ」, 「黄色」, 「赤」の刺激に反応するニューロンを表す四つのユニットで構成されている. (b) 2D 平面上の四つの電極間の CPW の分岐配線により配線が交差し, ヘブ学習に失敗した光学顕微鏡画像. (c) 配線の交差を回避するために, BE 間の CPW の 2D 分岐配線と TE と BE 間の CPW の 3D 分岐配線を組み合わせることで構築された実験システムの概略図. (d, e) ヘブ学習中に刺激として「リンゴ」または「バナナ」電極に -0.05 V の電圧を印加した場合に各電極に流れる電流値.

プの代わりに Au スタッドバンプを TE として使用し, 溶液をマイクロ流体チャンネル内に密封することで実現可能であり, これが次の研究ステップになるであろう. 更に, 溶液の蒸発によるコンダクタンスの低下を応用することで, 構築されたポリマネットワークのリフレッシュシステムが期待できる. マイクロチャンネルを通じて溶液を吸引することで, ネットワークを一度物理的にリフレッシュし, その後繰り返し形成して最初から再トレーニングできるため, より柔軟な学習システムが可能になるだろう.

4. 3D 配線システムにおけるヘブビアン学習の実証

構築された 3D 配線システムへの機械学習の実装のデモンストラーションとして, 提案された実験システムに教師なしヘブビアン学習を適用した. 図 5(a) は, 本研究で採用されたニューラルネットワークモデルの概略図を示す. このモデルは, 「リンゴ」, 「バナナ」, 「赤」, 「黄」の刺激に基づいて発火するニューロンに対応する四つのユニットで構成される. ホップフィールドモデルなどの連想記憶モデルにヒントを得たこの単純なニューラルネットワークモデル⁽³⁷⁾は, 各ユニット間に適切な重みが与えられている場合, 例えば, リンゴから赤, バナナから黄色など, 果物の入力刺激から対応する色を関連付けることができる. 我々のアプローチは, 四つの電極と CPW 配線を使用してネットワークのトポロジーを物理的にエミュレートし, 六つのコン

ダクタンス値を変更することで, 構築されたシステムにこのモデルを実装する. 一方で, 2D 平面上に CPW を配線することでは, 配置された電極の位置関係に応じて望ましくない配線交差が発生するため, この目的を実現するのは困難であることが分っている (図 5(b)).

配線の交差を回避するには, 電極配置の関係を慎重に考慮する必要がある. 図 5(c) は, 従来の 2D 配線と新たに可能になった, CPW の 3D 分岐配線を組み合わせ, 配線の交差を回避できるシステムでのヘブビアン学習実装プロセスの概略を示している. 最初に, 合計四つの電極 (TE, BE1, BE2, BE3) が, それぞれ「リンゴ」, 「赤」, 「バナナ」, 「黄」ニューロンに割り当てられる. この実験では, ヘブビアン学習則に基づいて, 電極間に方形波 AC 電位差 (50 kHz , 22 V) を 2 秒間適用してリンク CPW の数を増やし, 非発火ニューロンに対応する電極に抑制電圧を印加することにより, 発火ニューロンに対応する電極間のコンダクタンス重みが強化されている. 学習エポックは次の二つのステップで構成されている. 最初に, 「リンゴ」及び「赤」ニューロンに対応する電極が発火ニューロンとして割り当てられ, その結果, それらの間のコンダクタンス重みが強化された. 2 番目のステップでは, 「バナナ」と「黄色」の間の重みを同様に強化させた. 発火ニューロンの割り当てと電圧供給は, マイクロコントローラを使用して自動的に実行された. 各学習エポックの後, 果物 (「リンゴ」または「バナナ」) ニューロンに割り当てられた電極に刺激として -0.050 V の電圧を印加し, ほかの電極に流れる電流値を測定した. 図 5(d), (e) は, 学習が進むに

つれて、対応する「色」電極に流れる電流のみが大幅に増加し、ヘブリアン学習実装が成功したことを示す流れる電流の遷移を示している。特に、「リング」と「赤」電極間のコンダクタンス重みは、2D 配線によって強化された「バナナ」と「黄色」電極間のコンダクタンス重みと同じ方法で 3D 配線によって強化された。これは、果物の種類と色の関係が、配線の交差なしに自律的なローカル学習によって学習できることを意味している。

5. 3D 配線システムにおけるスパイクベース学習

シナプスは、生後約 8~12 か月まで軸索誘導によって活発に形成され、その後、シナプス可塑性によって前ニューロンと後ニューロン間のシナプス強度を変更することで、脳の学習に貢献する⁽³⁸⁾。シナプス強度の更新は、前ニューロンと後ニューロン、または調節性介在ニューロンのスパイク活動に主に依存する。例えば、スパイクタイミング依存可塑性として知られるスパイクベースの学習ルールは、解剖学および計算論的観点から解明されている⁽³⁹⁾、⁽⁴⁰⁾。ニューロモルフィックエンジニアリングでは、スパイクベースのシナプス可塑性は、主にスパイクニューラルネットワークの効率的な実装のために、メモリスティープデバイス上で広範にエミュレートされてきた⁽⁹⁾、⁽⁴¹⁾。ここでは、構築した 3D 配線システムでのスパイクベースのコンダクタンス変更を実証した。リンクする CPW の数を制御して各ターゲットに最初の三つのコンダクタンス値を設定した後、ほかの電極を 0 V に切り替えた状態で、BE1 にのみ 2.5 V、幅 10 ms、繰り返し間隔 1 s の連続電圧パルス を 20 回適用した。電圧パルスの開始時に、全てのコンダクタンス値が急激に減少し、その後増加した (図 6 (a))。特に、連続電圧パルス中 (30~50 s)、G1 のみが二次的に大幅に強化されたのに対し、他は線形に弱く強化された (図 6 (b))。興味深いことに、G1 は電圧パルス前よりも電圧パルス後に高い値にシフトしたが、ほかは低い値にシフトした。つまり、電圧パルスにより一つのコンダクタンスが強化され、ほかは抑制され、相対的なコンダクタンスが変化したことになる。このユニークな特性は、ニューラルネット

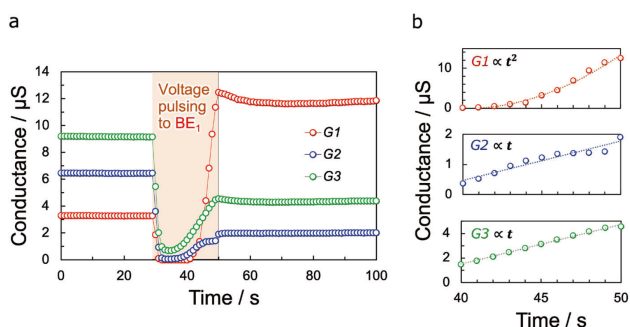


図 6 (a) 振幅 2.5 V、10 ms、間隔 1 s で BE1 に連続電圧パルスを印加することによって誘導される、TE と三つの BE (BE1, BE2, または BE3) 間の三つのコンダクタンス値 G1, G2, G3 の変化。(b) 図 (a) の 40 秒から 50 秒にかけての G1 の二次関数的増加と G2 及び G3 の線形増加。

トワークにおける WTA 競合の基本原理である側方抑制とみなすことができる⁽⁴²⁾。このコンダクタンス変化の挙動は、BE2 または BE3 への後続の電圧パルス中にも観察できる。我々が提案する材料とデバイス構造は、スパイクベースで生物学的に妥当な方法に基づいて情報処理を実行する可能性を秘めており、隣接するシナプスが側方抑制のように相互作用する。その結果、ニューロン電極のスパイクによって生成された溶液内の電位分布は、隣接する CPW での異なる化学反応を誘発、LTP または LTD のような平衡コンダクタンスの変化をもたらす。異なる隣接するシナプス接続間のこのような相互作用により、ウェットウェア上で WTA 競合などの生物学的により妥当な情報処理が可能で、全く新しいメモリスティープデバイスが実現するだろう。

6. まとめ

本稿では、3D 液体空間に配置された電極間の導電性リンクを、ゼロから成長させて配線することで作製した、脳型アーキテクチャ研究を紹介した⁽⁴³⁾。これは、電界を集中させる電極として Au チップと鋭い先端をもつ Au スタッドバンプを適用することで初めて実現した。この新しい技術は、人工または生物のニューロンを 3D 空間で接続し、より複雑で高密度のネットワークを構築する 3D ニューロモルフィックエンジニアリングに展望をもたらす。CPW は、mm オーダで離れた電極間のリンクも可能にするため⁽²³⁾、TSV 技術に基づく従来の 3D 集積回路への貢献が期待される。また、形成された 3D ポリマernetワークのヘブリアン学習が、リンクする CPW の数を制御することで、電極間のシナプスコンダクタンスの変更を介して実証された。更に、CPW は物理的成長メカニズムと化学反応特性の両方で自然に側方抑制を示し、その過渡応答が慎重に調査された。その結果、生物のシナプスを彷彿させる CPW のこれらの固有の特性を利用して、スパイクベースの学習の実現可能性を示した。これらの結果は、脳と同様に、溶液中でスパイクベースの情報処理が可能で有機材料を主成分とするネットワークの実現につながり、将来的にはより生物学的に妥当な物理 AI システムの開発を促進することになるであろう。

謝辞 本稿の執筆にあたりご協力を頂きました萩原成基氏に深く感謝いたします。本研究の一部は以下の助成により遂行されました。文部科学省「物質・ナノテクノロジー先端研究基盤整備プログラム (ARIM)」(課題番号: JPMXP1223HK0083 (北海道大学)), JST ACT-X (課題番号: JPMJAX21KE), JST CREST (課題番号: JPMJCR21B5), JSPS 科学研究費補助金基盤研究 (B) (課題番号: 21H03506) の支援を受けて行われました。

文献

- (1) M. Tessier-Lavigne and C.S. Goodman, "The molecular biology of axon guidance," *Science*, vol.274, pp.1123-33, 1996.
- (2) D.P. Friedman, E.A. Murray, J.B. O'Neill, and M. Mishkin, "Cortical connections of the somatosensory fields of the lateral sulcus of macaques: evidence for a

- corticolimbic pathway for touch,” *J. Comp. Neurol.*, vol.252, pp.323–47, 1986.
- (3) D.J. Felleman and D.C. Van Essen, “Distributed hierarchical processing in the primate cerebral cortex,” *Cereb. Cortex*, vol.1, pp.1–47, 1991.
 - (4) A. Hoerder-Suabedissen, F.M. Oeschger, M.L. Krishnan, T.G. Belgard, W.Z. Wang, S. Lee, C. Webber, E. Petretto, A.D. Edwards, and Z. Molnár, “Expression profiling of mouse subplate reveals a dynamic gene network and disease association with autism and schizophrenia,” *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol.110, pp.3555–60, 2013.
 - (5) C. Ohtaka-Maruyama, M. Okamoto, K. Endo, M. Oshima, N. Kaneko, K. Yura, H. Okado, T. Miyata, and N. Maeda, “Synaptic transmission from subplate neurons controls radial migration of neocortical neurons,” *Science*, vol.360, pp.313–317, 2018.
 - (6) L. Sokoloff, in *Handbook of Physiology-Neurophysiology*, J. Field, H.W. Magoun, and V.E. Hall, eds., vol.3, American Physiological Society, Washington, D.C., 1960.
 - (7) J. Sawada and D.S. Modha, *ACSD 2013 13th Int. Conf.*, Barcelona, Spain, 2013.
 - (8) P. Merolla, J. Arthur, R. Alvarez-Icaza, A. Cassidy, J. Sawada, F. Akopyan, B. Jackson, N. Imam, C. Guo, Y. Nakamura, B. Brezzo, I. Vo, S. Esser, R. Appuswamy, B. Taba, A. Amir, M. Flickner, W. Risk, R. Manohar, and D. Modha, “Artificial brains. A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface,” *Science*, vol.345, pp.668–73, 2014.
 - (9) S.H. Jo, T. Chang, I. Ebong, B.B. Bhadviya, P. Mazumder, and W. Lu, “Nanoscale Memristor Device as Synapse in Neuromorphic Systems,” *Nano Lett.*, vol.10, pp.1297–1301, 2010.
 - (10) M. Prezioso, F. Merrih-Bayat, B.D. Hoskins, G.C. Adam, K.K. Likharev, and D.B. Strukov, “Training and operation of an integrated neuromorphic network based on metal-oxide memristors,” *Nature*, vol.521, pp.61–4, 2015.
 - (11) S. Mittal, “A Survey of ReRAM-Based Architectures for Processing-In-Memory and Neural Networks,” *Mach. Learn. Knowl. Extr.*, vol.1, pp.75–114, 2019.
 - (12) M. Akai-Kasaya, N. Hagiwara, W. Hikita, M. Okada, Y. Sugito, Y. Kuwahara, and T. Asai, “Evolving conductive polymer neural networks on wetware,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.59, pp.060601–060610, 2020.
 - (13) K. Janzakova, M. Ghazal, A. Kumar, Y. Coffinier, S. Pecqueur, and F. Alibart, “Dendritic Organic Electrochemical Transistors Grown by Electropolymerization for 3D Neuromorphic Engineering,” *Advanced Science*, vol.8, pp.2102973–82, 2021.
 - (14) M. Cucchi, C. Gruener, L. Petrauskas, P. Steiner, H. Tseng, A. Fischer, B. Penkovsky, C. Matthus, P. Birkholz, H. Kleemann, and K. Leo, “Reservoir computing with biocompatible organic electrochemical networks for brain-inspired biosignal classification,” *Sci. Adv.*, vol.7, eabh0693, 2021.
 - (15) P. Achararit, I. Hida, T. Marukame, T. Asai, and Y. Hara-Azumi, “Structural exploration of stochastic neural networks for severely-constrained 3D memristive devices,” *IEICE*, vol.9, pp.466, 2018.
 - (16) S. Azhari, D. Banerjee, T. Kotooka, Y. Usami, and H. Tanaka, “Influence of junction resistance on spatiotemporal dynamics and reservoir computing performance arising from an SWNT/POM 3D network formed via a scaffold template technique,” *Nanoscale*, vol.15, pp.8169–8180, 2023.
 - (17) X. Zhang, J. Wu, J. Wang, J. Zhang, Q. Yang, Y. Fu, and Z. Xie, “Highly conductive PEDOT:PSS transparent electrode prepared by a post-spinrinsing method for efficient ITO-free polymer solar cells,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol.144, pp.143–149, 2016.
 - (18) V. Jain, H. Yochum, R. Montazami, and J. Heffin, “Millisecond switching in solid state electrochromic polymer devices fabricated from ionic selfassembled multilayers,” *Appl. Phys. Lett.*, vol.92, 033304, 2008.
 - (19) D.K. Taggart, Y. Yang, S.C. Kung, T.M. McIntire, and R.M. Penner, “Enhanced Thermoelectric Metrics in Ultra-long Electrodeposited PEDOT Nanowires,” *Nano Lett.*, vol.11, pp.125–131, 2011.
 - (20) Y. Koizumi, N. Shida, M. Ohira, H. Nishiyama, I. Tomita, and S. Inagi, “Electropolymerization on wireless electrodes towards conducting polymer microfibre networks,” *Nat. Commun*, vol.7, pp.10404–10410, 2015.
 - (21) S. Thourson and C. Payne, “Modulation of action potentials using PEDOT:PSS conducting polymer microwires,” *Sci. Rep.*, vol.7, pp.10402–10409, 2017.
 - (22) J. Morris, S. Thourson, K. Panta, B. Flanders, and C. Payne, “Conducting polymer nanowires for control of local protein concentration in solution,” *J. Phys. D*, vol.50, pp.174003–174014, 2017.
 - (23) M. Eickenscheidt, E. Singler, and T. Stieglitz, “Pulsed electropolymerization of PEDOT enabling controlled branching,” *Polym. J.*, vol.51, pp.1029–1036, 2019.
 - (24) N. Hagiwara, S. Sekizaki, Y. Kuwahara, T. Asai, and M. Akai-Kasaya, “Long- and Short-Term Conductance Control of Artificial Polymer Wire Synapses,” *Polymers*, vol.13, pp.312–322, 2021.
 - (25) T.V.P. Bliss and G.L. A Collingridge, “A synaptic model of memory: long-term potentiation in the hippocampus,” *Nature*, vol.361, pp.31–39, 1993.
 - (26) J.R. Whitlock, A.J. Heynen, M.G. Shuler, and M.F. Bear, “Learning Induces Long-Term Potentiation in the Hippocampus,” *Science*, vol.313, pp.1093–1097, 2006.
 - (27) Y. Burgt, E. Lubberman, E.J. Fuller, S.T. Keene, G.C. Faria, S. Agarwal, M.J. Marinella, A.A. Talin, and A. Salleo, “Slow recombination unveiled,” *Nat. Mater.*, vol.16, pp.4–6, 2017.
 - (28) S.T. Keene, A. Melianas, Y. Burgt, and A. Salleo, “Mechanisms for Enhanced State Retention and Stability in Redox-Gated Organic Neuromorphic Devices,” *Adv. Electron. Mater.*, vol.5, pp.1800686–1800696, 2019.
 - (29) C.H. Bailey, M. Giustetto, Y.Y. Huang, R.D. Hawkins, and E.R. Kandel, “Is Heterosynaptic modulation essential for stabilizing hebbian plasticity and memory,” *Nat. Rec. Neurosci.*, vol.1, pp.11–20, 2000.
 - (30) S. Garreau, G. Louarn, J.P. Buisson, G. Froyer, and S. Lefrant, “In Situ Spectroelectrochemical Raman Studies of Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDT),” *Micro-molecules*, vol.32, pp.6807–6812, 1999.
 - (31) J. Ji, M. Li, Z. Chen, H. Wang, X. Jiang, K. Zhuo, Y. Liu, X. Yang, Z. Gu, S. Sang, and Y. Shu, “In situ fabrication of organic electrochemical transistors on a microfluidic chip,” *Nano Research*, vol.12, pp.1943–1951, 2019.
 - (32) S.J. Martin, P.D. Grimwood, and R.G. Morris, “Synaptic Plasticity and Memory: An Evaluation of the Hypothesis,” *Annu. Rev. Neurosci.*, vol.23, pp.649–711, 2000.
 - (33) R.S. Zucker and W.G. Regehr, “Short-Term Synaptic Plasticity,” *Annu. Rev. Physiol.*, vol.64, pp.355–405, 2002.
 - (34) S. Chaunchaiyakul, T. Yano, P. Krukowski, and Y. Kuwahara, “Effect of surface tension on self-termination in Au tip fabrication for tip-enhanced Raman spectroscopy,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.55, pp.098003–098006, 2016.

- (35) S. Kaski and T. Kohonen, “Winner-take-all networks for physiological models of competitive learning,” *Neural Networks*, vol.7, pp.6–7, 1994.
- (36) G. Ciccone, M. Cucchi, Y. Gao, A. Kumar, L.M. Seifert, A. Weissbach, H. Tseng, H. Kleemann, F. Alibart, and K. Leo, “Growth and design strategies of organic dendritic networks,” *Discover Mater.*, vol.2, pp.7–19, 2022.
- (37) J.J. Hopfield, “Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities,” *Proc. Natl. Acad. Sci.*, pp.2554–2558, 1982.
- (38) P.R. Huttenlocher, C. Courten, L.J. Garey, and H.V. Loos, “Synaptogenesis in human visual cortex—evidence for synapse elimination during normal development,” *Neurosci. Lett.*, vol.13, pp.247–252, 1982.
- (39) H. Markram, J. Lü, M. Frotscher, and B. Sakmann, “Regulation of Synaptic Efficacy by Coincidence of Postsynaptic APs and EPSPs,” *Science*, vol.275, pp.213–215, 1997.
- (40) S. Song and L.F. Abbott, “Cortical Development and Remapping through Spike Timing-Dependent Plasticity,” *Neuron*, vol.32, pp.339–350, 2001.
- (41) Z. Wang, S. Joshi, S.E. Sacel'ev, H. Jiang, R. Midya, P. Lin, M. Hu, N. Ge, J.P. Strachan, Z. Li, Q. Wu, M. Barnell, G.L. Li, H.L. Xin, R.S. Williams, Q. Xia, and J.J. Yang, “Memristors with diffusive dynamics as synaptic emulators for neuromorphic computing,” *Nat. Mater.*, vol.16, pp.101–108, 2017.
- (42) R.M. Fitzsimonds, H.J. Song, and M.M. Poo, “Propagation of activity-dependent synaptic depression in simple neural networks,” *Nature*, vol.388, pp.439–448, 1997.
- (43) N. Hagiwara, T. Asai, K. Ando, and M. Akai-Kasaya, “Fabrication and Training of 3D Conductive Polymer Networks for Neuromorphic Wetware,” *Adv. Funct. Mater.*, vol.33, pp.2300903–2300913, 2023.

(CCS 研究会提案, 2025 年 3 月 3 日受付,
2025 年 4 月 3 日再受付)



赤井 恵 (正員)

1997 大阪大学博士課程修了。博士(理学)。
1999~2001 日本学術振興会 COE 特別研究員。
2005~2010, 2015~2019 科学技術振興機構さきがけ研究員。2007~2019 大阪大学助教。2019~
2020 北海道大学准教授。2020~2023 北海道大学
教授。2021 から大阪大学教授。現在に至る。分子
化学を基軸とし、ニューロモルフィックコンピュー

ティング研究に従事。

ESS ニュース

NOLTA, IEICE 特集号

Guest Secretary 中村 遼

特集号タイトル：

Special Section on Emerging Technologies of Complex Communication Sciences and Multimedia Functions

掲載誌：

NOLTA IEICE, 2025 年 10 月発行

複雑コミュニケーションサイエンス研究専門委員会（CCS 研究会）は、電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティの第 2 種研究専門委員会として 2011 年 4 月に発足し、2015 年 4 月からは、NOLTA ソサイエティの第 1 種研究専門委員会として活動しています。CCS 研究会は、情報通信技術の全ての階層、それを取りまく情報通信環境、そして神経系や生物システム、更には人間のソーシャルコミュニケーションをも含めた広範な研究対象を扱い、そこにある現実的問題の本質、限界、そして、それらの背後に横たわる普遍的特質を明らかにするサイエンスの創出を目指しております。

本特集号は、「複雑コミュニケーションサイエンス」に関連する最新の研究成果を国内外に発信することを目的として企画されました。ご投稿頂いた論文は NOLTA, IEICE の標準査読プロセスに従って審査され、最終的に 14 編の論文が掲載されることとなりました。これらの論文は、J-STAGE (<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/nolta/-char/ja>) にて無料で御覧頂けます。

最後に、本特集の企画並びに編集作業にあたり、多大な御協力を頂きました NOLTA, IEICE 編集委員会、IEICE 事務局、編集委員、査読委員、そして、論文をご投稿頂いた著者の皆様に深く感謝申し上げます。



中村 遼（正員）

2017 関西学院大学大学院理工学研究科博士課程前期課程了。2020 同大学院理工学研究科博士課程後期課程了。2020 福岡大学助教。2022 同大講師。大規模ネットワークの設計・モデル化・制御に関する研究に従事。

2025 年電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会開催報告

2025 年電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会実行委員 伊藤大輔



1. 開催概要

NOLTA ソサイエティ（以下、NLS）が主催する「2025 年電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会」（以下、NLS 大会）が 6 月 13 日（金）、14 日（土）に開催されました。

- ・開催日：2025 年 6 月 13 日（金）、14 日（土）
- ・場所：岡山城天守閣、岡山県岡山市 能楽堂ホール tenjin9
- ・主催：電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ
- ・大会組織：

実行委員長	荒井伸太郎（岡山理科大学）
総務・庶務	伊藤佳卓（北海道科学大学） 織間健守（帝京大学）
会計	木村貴幸（東京都市大学） 井岡恵理（芝浦工業大学）
投稿システム・広報・出版	伊藤大輔（岐阜大学）

2. 開催状況

2025 年 NLS 大会には、招待者 9 名、一般参加者 52 名、学生 66 名の計 127 名のご参加を頂きました。本大会に先立ち、6 月 12 日（木）・13 日（金）には、NLS の研究会である非線形問題研究会（以下、NLP）と複雑コミュニケーションサイエンス研究会（以下、CCS）が共催され、その流れを受けての開催となりました。

第 10 回となる本大会は、2 会場を使用し 2 日間にわたって開催されました（表 1・2 参照）。

大会初日には、岡山城天守閣を貸し切り、前年度の NLP・CCS 研究会における発表奨励賞の授与式及び記念講演を行いました（表 3・4 参照）。

2 日目は、tenjin9 の能舞台を会場として、講演及びポスター発表を実施しました。冒頭では、大会実行委員長の荒井伸太郎先生（岡山理科大学）より開会の挨拶を頂き、続いて 2025 年度 NLS 会長の関屋大雄先生（千葉大学）からご挨拶を賜りました。その後、NLP 及び CCS の年次報告が行われました。

昼休憩を挟んで三つのポスターセッションが実施され、計 58 件の発表と、それに対する活発な議論が展開されました。続いて、NLS が発行する国際学術誌 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE について、編集委員長の上田哲史先生（徳島大学）よりご報告頂き、同誌の Best Paper Award 授賞式並びに記念講演が執り行われました（表 5 参照）。

更に、NLS 主催の国際会議「NOLTA2025」及び「NOLTA2026」に関する報告がなされ、続いて NOLTA ソサイエティ

大会奨励賞の授与式が行われました。NLS では、大会においてソサイエティの発展に寄与し得る講演論文を発表した著者を表彰する制度を設けており、本年度は 2 件の発表が奨励賞を受賞しました（表 6 参照）。

最後に、大会実行委員長の閉会の辞をもって、本大会は盛会のうちに終了いたしました。

3. おわりに

本大会も昨年に引き続き多くの方にご参加頂き盛会のうちに終えることができました。本大会にてご講演・ポスター発表された皆様、聴講参加された皆様に深く感謝申し上げます。来年度も本大会の開催が予定されております。ふるってご参加下さいませよう、よろしくお願いいたします。

表 1 2025 年 NLS 大会タイムテーブル（6 月 13 日）

開始	終了	イベント	プレゼンター
17:45		入場・参加受付開始	
18:00	18:30	非線形問題研究会 奨励賞 記念講演	座長：丹治裕一（香川大学）
18:30	18:45	複雑コミュニケーションサイエンス研究会 奨励賞 記念講演	座長：中村遼（福岡大学）
18:45	19:00	研究会奨励賞授賞式	

表 2 2025 年 NLS 大会タイムテーブル（6 月 14 日）

開始	終了	イベント	プレゼンター
9:30	9:35	開会の挨拶	2025 年 NLS 大会実行委員長 荒井伸太郎（岡山理科大学）
9:35	9:40	NOLTA ソサイエティ会長挨拶	2025 年度 NOLTA ソサイエティ会長 関屋大雄（千葉大学）
9:40	9:45	非線形問題研究専門委員会 年次報告	2025 年度 NLP 委員長 長谷川幹雄（東京理科大学）
9:45	9:50	複雑コミュニケーションサイエンス研究専門委員会 年次報告	2025 年度 CCS 委員長 内田淳史（埼玉大学）
9:50	10:00	休憩	
10:00	11:00	ポスター発表（セッション A）	
11:00	11:10	休憩	
11:10	12:10	ポスター発表（セッション B）	
12:10	13:40	昼食	
13:40	14:40	ポスター発表（セッション C）	
14:40	14:50	休憩	
14:50	15:05	NOLTA Journal の現状について Best Paper Award 授賞式	2025 年度 NOLTA 誌編集委員長 上田哲史（徳島大学）
15:05	15:45	NOLTA Journal Best Paper Award 記念講演	受賞者：Kenta Yamamoto, Takashi Hisakado, Mahfuzul Islam, Osami Wada 講演者：山本謙太
15:45	15:55	休憩	
15:55	16:05	NOLTA2025 について	NOLTA2025 General Chair 鳥飼弘幸（法政大学） NOLTA2025 Finance Chair 中野秀洋（東京都市大学）
16:05	16:15	NOLTA2026 について	NOLTA2026 General Chair 高橋規一（岡山大学） NOLTA2026 General Secretary 伊藤佳卓（北海道科学大学）、織間健守（帝京大学）
16:15	16:30	2025 年 NOLTA ソサイエティ大会 奨励賞 授賞式	2025 年 NLS 大会実行委員長 荒井伸太郎（岡山理科大学）
16:30		閉会の挨拶・写真撮影	2025 年 NLS 大会実行委員長 荒井伸太郎（岡山理科大学）

表 3 NLP 奨励賞受賞者

著者	タイトル	文献番号
富樫優太・坪根正（長岡技科大）	吊り橋上の揺動ロボットで見られる同期現象の実験的考察	信学技報, vol. 124, no. 13, NLP2024-3, pp. 11-14, 2024年5月.
松井大輝・加藤海渡（中京大）・伊藤佳卓（北海道科学大）・高坂拓司（中京大）	自律系より得られる時系列データおよびパラメータを学習した Extreme learning machine に基づく分岐解析手法	信学技報, vol. 124, no. 62, NLP2024-38, pp. 109-112, 2024年6月.
代美月・神野健哉（東京都市大）	深層学習分類器の潜在変数の分布特性	信学技報, vol. 124, no. 62, NLP2024-37, pp. 105-108, 2024年6月.
太田怜志・加藤謙・香取勇一（公立はこだて未来大）	ヒステリシスを示す振動子を用いたリザパー計算の性能に対する分岐パラメータの依存性評価	信学技報, vol. 124, no. 362, NLP2024-105, pp. 71-76, 2025年1月.
マハブービ シェヘラザード・二宮洋（湘南工科大）	慣性項を用いた3次元正則化ニュートン法の高速化に関する研究	信学技報, vol. 124, no. 432, NLP2024-112, pp. 26-31, 2025年3月.
藤本進太郎（徳島大）・伊藤大輔（岐阜大）・上田哲史（徳島大）	シルニコフ分岐の数値解析について～ホモクリニック軌道としての多様体接続関係～	信学技報, vol. 124, no. 432, NLP2024-133, pp. 126-131, 2025年3月.

表 4 CCS 奨励賞受賞者

著者	タイトル	文献番号
山上智輝（東大）・岡田典大（東京理科大）・巴鼻孝朋・堀崎遼一・成瀬誠（東大）・長谷川幹雄（東京理科大）	確率過程を用いた自己相関を持つ時系列による意思決定の数理モデル	信学技報, vol. 124, no. 63, CCS2024-19, pp. 78-83, 2024年6月.
松野史門・阿部佑紀・安藤洸太・浅井哲也（北大）	実時系列データを用いたアナログ電子回路レザパーの性能評価	信学技報, vol. 124, no. 251, CCS2024-43, pp. 1-6, 2024年11月.
平倉直樹（富山県立大）	不適切コンテンツに対する注目度を抑制する模倣戦略の効果的な適用方法	信学技報, vol. 124, no. 442, CCS2024-57, pp. 11-16, 2025年3月.

表 5 NOLTA, IEICE Best Paper Award 記念講演（太字は講演者）

著者	タイトル	文献番号
Kenta Yamamoto, Takashi Hisakado, Mahfuzul Islam, Osami Wada (Kyoto University)	Global stabilization for nonlinear two-port characteristics of bidirectional DC/DC converter and its application to peer-to-peer energy transfer	Vol. 14, No. 2, pp. 292-30

表 6 2025 年 NOLTA ソサイエティ大会奨励賞受賞者

受賞者	タイトル
佐々木海（埼玉大学）	電気光遅延システムを用いた敵対的生成ネットワーク
藤田実沙（中京大学）	ネットワーク中心性を使用したマルチキャスト木の構築法



NOLTA ソサイエティ大会奨励賞受賞者と NLS 大会実行委員長 荒井伸太郎先生（岡山理科大学）



伊藤大輔（正員：シニア会員）

2015 徳島大学大学院システム創生工学専攻博士
後期課程終了。滋賀県立大学助教，岐阜大学助教。
現在，岐阜大学准教授。非線形力学，システム解
析・制御及び情報通信用電子集積回路に関する研究
に従事。

研究会に行こう！

「研究会に行こう！」では基礎・境界ソサイエティの研究会などの様子を御紹介しています。情報交換や懇親、新たな研究との出会いの場としてはいかがですか？

■応用音響研究会 (EA)

応用音響研究会 (EA) では、日本音響学会電気音響研究会と共同運営を行っており、音の録再生と信号処理を中心とした音に関する関連分野を幅広く包含する様々な研究を取り扱っています。具体的なトピックとしては、マイクロホンやスピーカ、音源の方向や位置の推定、音源分離、雑音や残響の抑圧、アクティブノイズ制御 (ANC) を含む音場の制御などが挙げられ、近年では深層学習を利用した音響シーン認識やイベント認識の研究発表も増加しております。

EA 研究会は、年間 6 回 (5 月, 7 月, 8 月, 11 月, 12 月, 3 月) の研究会を毎年開催しており、これには信号処理研究会 (SIP), 超音波研究会 (US), 音声研究会 (SP), 聴覚研究会 (ASJ-H), 音楽音響研究会 (ASJ-MA), 音声コミュニケーション研究会 (ASJ-SC) 及び音声言語情報処理研究会 (IPSJ-SLP) など、様々な研究会との共催や併催も含まれています。

2024 年度実績として、通年で発表 186 件 (前年比+22 件), 参加者数 559 名 (前年比+38 名) を達成し、2024 年度研究会は大盛況となりました。特に、音声研究会 (SP), 信号処理研究会 (SIP), 情報処理学会音声言語情報処理研究会 (IPSJ-SLP), 及び APSIPA Japan Chapter と共催にて、例年 3 月頃に九州・沖縄地区の離島にて開催している音声・音響・信号処理ワークショップ (SPEASIP) では、発表 109 件と参加者 187 名を集めました。2025 年度も、2024 年度と同様に 6 回の開催を予定しています。遠方からも参加が容易なオンライン開催を前提とした 5 月研究会に加え、7 月北海道, 8 月東北, 11 月北陸, 12 月中国・九州, 3 月九州・沖縄地区の離島と、各支部・地区にて定例的な現地開催に向けて現地世話役や共催する他研究会とともに検討を進めています。更に、2026 年度 EA 研究会では約 10 年ぶり 2 度めとなる海外開催も視野に検討を進めていることに加え、新たに「応用音響研究会学生研究奨励賞 (仮称)」の制定も検討しており、今後も魅力的な研究会を意識して様々な企画・立案を展開する計画です。下記の Web サイトに研究会に関する最新の情報を掲載していますので、多くの方の EA 研究会へのご参加を期待しております。

<https://ken.ieice.org/ken/program/index.php?tgid=IEICE-EA>

<http://asj-eacom.acoustics.jp/>



西浦敬信 (正員)

2001 年 9 月奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報処理学専攻博士後期課程修了。博士 (工学)。同年 10 月和歌山大学システム工学部助手。2004 年 4 月立命館大学情報理工学部助教授。2007 年同准教授。2014 年同教授。現在に至る。音響情報処理、デジタル信号処理を中心に、メディアとしての音環境の解析・理解・再現・合成な

どの研究に従事。

■イメージ・メディア・クオリティ研究会 (IMQ)

新型コロナウイルス禍を経て、世の中には新しい生活様式が定着しました。ビジネスではオンライン会議やリモートワークが普及し、自動車の自動運転も実用化が視野に入りつつあります。個人の生活においては、これまで以上に高画質での放送、動画配信、ゲームなどの需要が増えています。こうしたメディアの品質に対する欲求が高まっている状況において、メディア品質を総合的に議論することが強く求められています。様々なメディアの品質を横断的に議論する学術的な場として、2004 年に時限研として発足したイメージ・メディア・クオリティ (IMQ) 研究専門委員会は、今年で 21 年目を迎えます。IMQ では画像品質の評価方法、画質改善の技法、撮像から伝達・表示に至るまでの技術、観察者の生理学・心理学的特性など、幅広く議論を重ねてきました。具体的な活動として、毎年約 3 回の研究会を開催しています。7 月の研究会はヒューマン情報処理研究会 (HIP) との共催です。加えて 3 月には、メディアエクスペリエンス・バーチャル環境基礎研究会 (MVE), 画像工学研究会 (IE), コミュニケーションクオリティ研究会 (CQ) と共催研究会を行います。そして 2026 年 3 月には 14 回目となるイメージメディアクオリティとその応用 (IMQA) 国際ワークショップを開催します。画質とその周辺技術について議論したい方はぜひご参加ください。

IMQ 研究会

2025 年 10 月 17 日 成蹊大学 画像処理と IMQ 一般

2026 年 3 月 16~18 日 沖縄産業支援センター (予定) MVE 研 IE 研 CQ 研共催



土田 勝 (正員)

2002 東京工業大学総合理工学研究所博士課程修了、博士(工学)。同年、日本電信電話(株)に入社、コミュニケーション科学基礎研究所に配属。2003～2006にNICT、2006～2009に(株)NTT データへ出向、2009より現職に復帰。東京学芸大学非常勤講師、徳島大学非常勤講師。マルチバンド/ハイパースペクトル画像処理、コンピュータビジョン、医用画像処理、文化財デジタルアーカイブに関する研究に従事。

■スマートインフォメディアシステム研究会 (SIS)

スマートインフォメディアシステム (SIS) 研究会は、人に優しいシステム、通信や情報技術におけるシームレスシステム、柔軟性を有するソフト化システムなど、広い分野において様々な要求に適用できる高度なシステムの設計・開発・実現を研究テーマとし、それらの実用化を目的として2004年に発足いたしました。発足当初から、AI技術の実用化も主要なテーマの一つとして取り扱っており、最近の研究会ではAI技術の様々な分野への応用に関する議論が活発になっております。

SIS研究会の具体的な技術分野は、スマートモバイルシステム、ソフトコンピューティング、知的マルチメディア処理システム、システム実現技術、近距離無線通信応用システムなど、横断的な分野に関して理論から実システムのハードウェアを含む開発までを対象としています。ソサイエティ横断型で、かつ、ほかの学会とも緩やかな研究連携を図りながら、新しい情報交換・研究討論の場を提供したいとも考えておりますので、皆様の研究が横断的であったり、システムを作ってみたがどこで発表してよいか分からないなどありましたら、ぜひSIS研究会での発表をご検討頂ければと思います。

年間の主な活動は、総合大会、ソサイエティ大会と年4回の研究会、国際ワークショップSISA (International Workshop on Smart Info-media Systems in Asia) を中心に行っています。本年度10月研究会は10月3、4日に福井市福井織協ビルにて、現地とオンラインのハイブリッド形式で映像情報メディア学会の「放送技術研究会 (ITE-BCT)」との連催を企画しています。以降の研究会はSIS研単独開催で12月11、12日に名城大学、3月5、6日は埼玉大学で開催予定となっております。全ての研究会をハイブリッド開催としていますので、これまでSIS研究会に参加したことのない方にも気軽に参加して頂ける研究会となっております。

また毎回の研究会では、主に大学学部生や博士課程学生を対象とするチュートリアル講演も実施しており、最新の研究を分かりやすく解説しております。チュートリアル講演や招待講演の一部は、IEICEビデオアーカイブでも公開しております。そちらもチェック頂き、皆様の研究のお役に立てればと思っております。

SIS研究専門委員会主催の大きな行事として、国際ワークショップSISAを毎年開催しています。本ワークショップは大学院生を含めた若手研究者に国際会議の場を体験してもらい、他国の方々と積極的に交流頂くことを主眼に置いたワークショップです。2025年は11月12日～14日の3日間、タイのプーケットにあるPrince of Songkla Universityにて開催する予定です。

研究会をはじめ関連行事の詳細はSIS研究会のホームページ (<http://www.ieice-sis.org/>) を御参照下さい。皆様のご参加をお待ちしております。



笹岡直人 (正員：シニア会員)

2006 鳥取大学大学院博士後期課程了。博士(工学)。現在、鳥取大学工学部電気情報系学科教授。主に、適応フィルタ、無線伝搬路推定、ミリ波センサに関する研究に従事。IEEE、日本音響学会、信号処理学会各会員。2024から本会スマートインフォメディアシステム (SIS) 研究専門委員会委員長。

■超音波研究会 (US)

超音波 (US) 研究会は、電子情報通信学会、日本音響学会、IEEE UFFC Japan Chapter が共催しています。「聞くことを目的としない音」である「超音波」の基礎と応用に関する研究者の活動の場です。年間約9回開催され、各回で更に他学協会を加えて共催しています。共催は非線形音響研究会、日本超音波医学会、日本レオロジー学会、海洋音響学会、レーザー学会、日本非破壊検査協会など幅広い分野にわたり、超音波は異分野間でつながっていることが実感できます。12月には応用音響 (EA) 研究会と音響・超音波サブソサイエティ合同研究会を開催して聞こえる音ともつながります。2024年度の年間発表件数は96件、335名の参加がありました。

発表者の多くは学生であり、学生の優秀な発表には「学生研究奨励賞」を授与して若手研究者を応援しています。発表時間は

25分で全国大会よりも長く、比較的十分な説明時間と質疑応答ができます。もっと詳しく説明したいけど時間が足りない、と思ったことはないですか。研究会なら話せますよ。また、なぜだか参加者同士の精神的な距離が近くなりやすくなるようで、学生と大学、企業の研究者の交友が自然発生します。いつもと違う一面を垣間見られるかもしれません。これも研究会の魅力の一つです。研究発表は緊張しますが楽しんでください。更にその後の交友も楽しんでください。皆さんの参加をお待ちしています。また、超音波研究会の情報はこちらの URL からご覧頂けます。

<https://www.ieice.org/~us/>



青柳 学 (正員：シニア会員)

1991 山形大・大学院修士課程了。1998 博士(工学)(東工大)。現在、室蘭工大・教授。超音波の動的応用の研究；例えば、超音波アクチュエータ、非接触マニピュレーション、音響流体デバイスの研究に従事。日本音響学会、電気学会、IEEE、精密工学会各会員。2025 年度超音波研究会委員長。

■ VLSI 設計技術研究会 (VLD)

VLSI 設計技術 (VLD) 研究会は、集積回路の設計手法やアーキテクチャ、自動設計や検証に関連するアルゴリズムの基礎理論から、実際の設計適用に至るまで、幅広い研究を推進しています。大規模化・微細化や性能・消費電力・信頼性の問題に関連した研究に加え、ポストムーア時代における AI と DX、量子計算、IoT などに関連した設計事例・設計技術・アルゴリズムの研究も活発に発表されています。VLD 研究会では、企業と大学が密接に協力し、産業界と学術界の両方の視点から研究の方向性を議論する場を提供しています。

VLD 研究会は、年 4 回の研究会を開催しています。2025 年度の第 1 回は、2025 年 6 月 19 日から 20 日にかけて、八戸工業大学の番町サテライトキャンパスで開催されました。今年度設立された「システムデザイン技術サブソサイエティ」を構成する VLD 研究会、CAS 研究会、MSS 研究会の共催によるもので、通常の研究発表に加えて、本サブソの名称にもなっている「システムデザイン技術」について、サブソ長と 3 研究会の委員長を中心に活発な議論が行われました。第 2 回は、12 月 1 日から 3 日に富山国際会議場にて開催予定です。「デザインガイア」と名付けられた本研究会は、DC 研究会、ICD 研究会、RECONF 研究会、情報処理学会 SLDM 研究会との共催により、盛大に開催される予定です。第 3 回は 2026 年 1 月に横浜で RECONF 研究会と、そして第 4 回は 3 月に沖縄で ICD 研究会と HWS 研究会と、それぞれ共催で開催予定です。

VLD 研究会では様々な表彰制度を設けています。VLD 研究会が授与する賞としては、「優秀技術報告賞」及び「優秀大会講演論文賞」、「デザインガイア・ポスター賞」、そして国際会議 ASP-DAC で発表した学生を対象とする「VLD Excellent Student Author Award for ASP-DAC」があります。また、VLD 研究会との連携のもとで、IEEE CEDA All Japan Joint Chapter が授与する「Academic Research Award」及び「Design Gaia Best Poster Award」も設けられており、若手研究者の成果発表を広く支援しています。

VLD 研究会は、VLSI 設計技術及び関連分野の研究成果を発信する絶好の機会です。ぜひ積極的にご発表ください。発表以外の聴講参加も歓迎します。皆様が議論と交流の輪に加わってくださることを楽しみにしています。

VLD 研究会公式サイト：<https://www.ieice.org/~vld/>



富山宏之 (正員)

1999 九大・博士後期課程修了。博士(工学)。現在立命館大学教授。組込み/サイバーフィジカル・システムの設計方法論の研究に従事。2025 年度 VLSI 設計技術研究専門委員会・委員長。

国際会議開催報告

2025 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT2025, <https://2025.ieee-isit.org/>)

アメリカ合衆国ミシガン州, ミシガン大学

2025年6月22日~27日

2025年6月22日から27日にかけて、2025 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT2025) が開催されました。ISIT は IEEE Information Theory Society が毎年開催している情報理論分野における世界最大の国際会議です。今年はアメリカ合衆国ミシガン州のアナーバーにあるミシガン大学にて開催されました(図1)。

ISIT のプログラムに私の名前が載るのは5回めでしたが、現地に出向いて発表を行うのは今回が初めてでした。石川県の小松空港を出発、羽田空港で乗り継ぎ、国際線の12時間のフライトでデトロイトに到着。そこから更に高速バスでようやく目的地のアナーバーに到着します。あまりの速さによろそりしてしまいますが、ひとたびアナーバーに到着すると、そこには洋画の世界に入り込んだような街並みが広がっており(当然といえば当然ですが)、その新鮮さにとても興奮を覚えました(図2)。現地の方にとっては見慣れた街なのでしょうが、私にとってはほとんど至るところが観光名所のようなものでした。

会議では今年も多岐にわたる分野の多数の発表があり、セッションは7個ずつ並列の進行でした。私は Lossless Source Coding に関するセッションにて“A Lower Bound of Worst-Case Redundancy of k-Symbol Delay Decodable Codes”と“Extensions of Asymmetric Binary Systems and Rayleigh’s Theorem”の2点を岩田賢一先生と共同で発表いたしました。また、26日朝の Shannon Lecture では Peter Shor 氏による“Quantum error correcting codes and quantum channel capacities”の講演がありました。図3は講堂の2階席からの様子です。

Banquet は26日の夜にヘンリー・フォード博物館にて開かれました。学会会場であるミシガン大学から高速バスで1時間ほど揺られると、広大な敷地の中に巨大な Ford の文字がお出迎え。会場に入ると、大きな飛行機の模型がまず目に入り(図4)、多数の展示物に囲まれて料理のテーブルが並んでいます。博物館の展示の真ん中で、贅沢さと背徳感(?)が入り混じったどこか不思議な食事体験ができました。



図1 学会会場 (ミシガン大学 Michigan League)



図3 Peter Shor 氏による Shannon Lecture の様子



図2 会場近辺の街並み

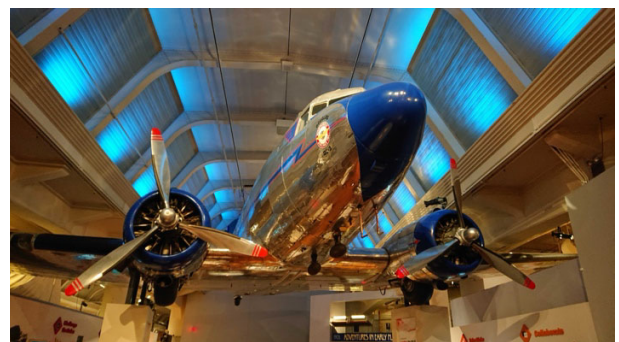


図4 Banquet 会場の展示物

館内には様々な乗り物の進歩を示す歴史的な展示物が無数にあったのですが、実のところ、私はほかの研究者の方々とお話ししているあいだに時間を忘れており、それだけでいつの間にか Banquet の終わりを迎えてしまいました。

自宅への帰路はなんと 27 時間の長旅。それはもうヘトヘトになってしまいましたが、このヘトヘトも参加者の特権。醍醐味を味わい尽くせた有意義な参加体験だったと感じています。また、研究テーマが非常に近く、かねてよりお会いしたいと思っていた方と今回ようやくお話しできたこともうれしい出来事の一つでした。来年中国の広州市にて開催される ISIT2026 に向けても、期待が高まるところです。



橋本健吾 (正員)

平 30 福井大・工・情報メディア工卒。令 6 同大学院博士後期課程了。博士 (工学)。同年同大・学術研究院工学系部門助教着任。以来、情報理論、無歪みデータ圧縮、組合せゲーム理論の研究に従事。現在に至る。2022 年 IEEE 名古屋支部国際会議研究発表賞、2023 年 SITA 若手研究者論文賞受賞。

国際会議開催報告

The 40th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications

(ITC-CSCC 2025, 回路とシステム／コンピュータおよび通信に関する国際会議)

Chung-Ang University, ソウル, 韓国

2025年7月7日～10日, <https://itc-csc2025.org/>

今回、栄えある40周年記念を迎えたITC-CSCCは、回路・システム・コンピュータ・通信に関する幅広い研究分野を網羅する学術国際会議であり、電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ、The Institute of Electronics and Information Engineers (IEIE)、タイ The Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Association (ECTI) との共同主催により、毎年、6月下旬から7月中旬の期間で開催されています。本会議は、アジア地域における研究者の交流を活性化し、広く世界で活躍できる研究者の育成を目的とし、1986年に日本と韓国の若手研究者の合同研究会 The Joint Technical Conference on Circuits and Systems (JTC-CAS) として、韓国ソウルのHanyang Universityにて初開催されました。当初は、韓国 KIEE (現 IEIE) と日本 IECEJ によって設立され、以後、タイを加えた3か国で開催地をローテーションしています。過去40年間、ITC-CSCCは韓国・日本・タイの学術交流の中核的な国際フォーラムの一つへと成長してきました。

今年の開催地は、韓国を代表する名門の教育機関である Chung-Ang University (中央大学) でした。中央大学は、1916年に設立された私立大学で、学生と教職員合わせて3万人以上が在籍しています。ソウルと安城の二つのキャンパスをもち、15の学部と18の大学院で構成されています。その実績は韓国政府から高く評価されており、特に薬学や文化・芸術の分野では国内トップクラスとして知られています(図1)。

今回の会議では、上述の主催3か国に加え、ベトナム、インドネシア、スリランカ、フィリピン、台湾、ルーマニア、インド、シンガポールの11か国から444名の参加者でした。発表論文数は、スペシャルセッション発表67件、レギュラーセッションの口頭発表153件、ポスターセッションの発表110件であり、合計330件でした。プログラム構成としては、16のスペシャルセッション、31のレギュラーセッション、四つのポスターセッションがありました。スペシャルセッションには、下記のようなテーマが含まれていました。

- ・ WEIE Workshop
- ・ AI in Image and Signal Processing
- ・ Next-Generation AI Semiconductor Solutions
- ・ AI in Education
- ・ Future Intelligent Semiconductor

- ・ Mathematical Systems Science and its Applications
- ・ Data Science for Agricultural Innovation
- ・ Machine Learning and Data Analysis for Time Series Application
- ・ PIM (Processing in Memory)
- ・ Intelligent Semiconductor (韓国語)
- ・ Image Processing and Computer Vision
- ・ Biomedical Signal Processing

全体企画のPlenary Talkは4件あり、開催会場である韓国 Chung-Ang 大学の Joonki Paik 氏による“Advances in Image Processing Technologies and Their Applications in AI”, シンガポール Nanyang Technological 大学に所属し、APSIPA (Asia-Pacific Signal and Information Processing Association) 会長の Woon-Seng Gan 氏による“Spatial Audio Intelligence: From Representation to Understanding and Control of Auditory Environments”, タイ王国 KMUTNB (King Mongkut's University of Technology North Bangkok) の Vitawat Sittakul 氏による“Digital Twin for Python Programming on Industrial Robotic System and its Applications”, 日本の法政大学の高村誠之氏による“Seeing Through Noise: The Science Behind Sensor Imaging”でした(図2)。

更に、チュートリアル講演も5件あり、日本の会津大学の Jungpil Shin 氏による“Vision and Sensor-Based



図1 韓国 Chung-Ang University



図2 Plenary Talk 会場の様子



図4 40周年記念パネル



図3 Banquetの様子

Systems for Human Activity Recognition Using Machine Learning”, 韓国 Chung-Ang 大学の Donghyeon Han 氏による “Next AI Evolution with AI Training Accelerator: Opportunities and Challenges”, 日本の新潟大学の宮北和之氏による “Mobility and Performance Evaluation of Mobile Networks”, タイ王国 ChiangMai 大学の Kampil Woradit 氏による “Advancing Hybrid Movie Recommendation Systems: Integrating Content-Based, Collaborative Filtering, and Deep Learning Approaches”, 韓国 KAIST の Seungryong Kim 氏による “Any Point Tracking for Video Understanding and Generation” でした。

3日め夜に漢江のフローティングアイランド内コンベンションホールで開催された Banquet では、「40周年記念式典」として、初開催からの歩みを振り返る記念映像が上映され、本国際会議の創設メンバーが祝辞を述べました。記念映像は、会場天井に360度のスクリーンとして投影され、過去の写真が次々と映し出されるたびに、参加者からは懐かしむ声や驚きの声が上がっていました(図3)。

会議開催会場の入口には、40周年記念のパネルが設置され、過去40年の開催場所とともに代表的な写真も掲示されていました(図4)。当時を知る人は、写真を見て懐かしみ、知らない人も本会議の歴史の深さを学び、それぞれの思いにふけっていました。

会議全体を通した全てのセッションにおいて、活発な議論が交わされ、最先端技術の開発動向に関する深い議論の場となり、国際的な研究の発展につながる相乗効果を生み出す貴重な機会となりました。

次回41回は、2026年7月7日から10日に、タイ王国バンコクにて開催される予定です。



篠宮紀彦 (正員: シニア会員)

1995 創価大・工・情報卒。2001 同大学院博士課程了。2000(株)富士通研究所ネットワークシステム研究所入社。情報通信ネットワーク設計と制御技術の研究に従事。2005 創価大工学部。現在、同大学理工学部教授、理工学研究科長、情報ネットワークセンター長。2014 米国テキサス大学客員研究員。博士(工学)。2015 基礎・境界ソサイエティ貢献賞。ITC-CSCC2020 Technical Program Committee Chair。

開催案内



NOLTA2025 開催案内

General Secretary 山仲芳和 (宇都宮大学)

2025年10月27日から31日にかけて、2025 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, NOLTA2025 (<https://nolta2025.org>) を沖縄県那覇市にて開催いたします。那覇市は沖縄県の県庁所在地であり、歴史と南国文化が融合した魅力あふれる観光地です。首里城をはじめとする琉球王国の歴史的遺産、賑やかな国際通りでのショッピングや郷土料理、那覇港から望む美しい海の景色など、訪れる人々を魅了します。伝統工芸やエイサーなど、沖縄独自の文化にも触れることができ、国内外の観光客に人気の都市です。

NOLTA は、非線形及び複雑系の理論を基盤とし、工学の様々な分野にまたがる学際的な議論を行う国際会議です。過去の予稿集は、IEICE Proceedings Series にて無料公開されていますので、ぜひご参照ください。本シンポジウムには国内外から290件を超えるご投稿を頂きました。多数のご投稿に心より御礼申し上げます。現在、プログラム編成を進めており、準備が整い次第、ホームページにて公開いたします。また、本シンポジウムには、イタリアから Prof. Paolo Arena 先生、韓国から Prof. Jun Heo 先生をお迎えし、それぞれ大変興味深いご講演を予定しております。更に、ポスターセッション及びバンケットを、かつて九州・沖縄サミットが開催された万国津梁館にて実施する予定です。東シナ海を望む絶景のロケーションに位置し、碧い海と空に囲まれた自然豊かな環境の中で、皆様をお迎えできることを大変うれしく思っております。参加者の皆様にとって実りある時間となるよう、Committee 一同、鋭意準備を進めておりますので、ぜひ奮ってご参加ください。



山仲芳和 (正員)

2012 長岡技術科学大学・工・電気卒。2017 同大学院博士課程修了、博士 (工学)。同年宇都宮大学工学部・助教、現在に至る。非線形力学に基づく最適化アルゴリズムとその応用に関する研究に従事。IEEE 会員。

論文募集

2026 年情報セキュリティシンポジウム (SCIS2026)

2026 Symposium on Cryptography and Information Security

開催期日：2026 年 1 月 26 日（月）～1 月 30 日（金）

開催会場：函館アリーナ（北海道函館市）

開催形式：現地開催のみ

Web ページ：<https://www.iwsec.org/scis/2026/>

1. 概要

暗号と情報セキュリティシンポジウムは、暗号と情報セキュリティ技術に関する最新の研究成果の発表および情報交換の場として、1984 年以来毎年開催されているセキュリティ分野における日本最大規模のシンポジウムです。第 43 回となる SCIS2026 は、北海道函館市で開催します。

2. 募集テーマ

暗号および情報セキュリティに関する分野、特に新しく発展しつつある研究分野。募集テーマを以下に挙げますが、これらに限らずセキュリティ技術に関わる論文を広く募集します（査読による絞込みはありません）。

[募集テーマ例]

暗号理論、情報理論的安全性、数論応用、公開鍵暗号、ID ベース暗号／属性ベース暗号／関数暗号、楕円・超楕円曲線暗号、格子暗号、秘密計算、高機能暗号、多機能署名、共通鍵暗号、ブロック暗号、ストリーム暗号、ハッシュ関数、乱数、署名、認証、鍵管理、管理プロトコル、フォーマルメソッド、耐量子計算機暗号、量子暗号・量子計算、ハードウェアセキュリティ、サイドチャネル攻撃、ネットワークセキュリティ、ネットワーク攻撃検知・対策、マルウェア対策、ウェブセキュリティ、クラウドセキュリティ、モバイルセキュリティ、組み込みセキュリティ、制御システムセキュリティ、自動車セキュリティ、フィンテック、ブロックチェーン、電子透かし、コンテンツ保護、ソフトウェア保護、プライバシー保護、生体認証・バイオメトリクス、教育・心理学、セキュリティ評価・モデル、IoT セキュリティ、AI セキュリティ、デジタルアイデンティティ、トラスト、偽情報・誤情報対策、サプライチェーンセキュリティ

* 原稿に関する著作権は電子情報通信学会に帰属します。

3. 論文賞

● イノベーション論文賞

情報セキュリティ (ISEC) 研究専門委員会では暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS) のさらなる発展と活性化を目的として、「新しい研究・技術開発」の奨励を行うイノベーション論文賞を SCIS2012 より設定しています。その奨励対象は理論的新規な論文だけでなく ICT での問題提起や新しい研究分野の提案も含まれます。イノベーション論文賞の対象は全講演論文となります。多くの技術者・研究者による積極的なご発表をお願いいたします。

● SCIS 論文賞

情報セキュリティ (ISEC) 研究専門委員会では暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS) の発展と活性化、並びに、暗号と情報セキュリティ分野で活躍する若手の奨励を目的として、1993 年より SCIS 論文賞を設定しています。SCIS 論文賞の対象は、SCIS 論文賞を未受賞の講演者で、主に学部在学中もしくは学部卒業後 10 年以内の講演者による論文となります。論文賞の対象として取り扱われるかどうか不明な方は事務局までお問い合わせください。

● SCIS2026 優秀ポスター賞

情報セキュリティ (ISEC) 研究専門委員会では暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS) の発展と活性化を目的として、SCIS2026 優秀ポスター賞を設定予定です。詳細は WEB ページからご確認ください。

4. 開催場所

函館アリーナ 〒042-0932 北海道函館市湯川町 1 丁目 32-2

5. 主なスケジュール (予定)

2025 年

- ・ 9 月上旬 マイページ作成受付開始
- ・ 11 月上旬 発表申込受付開始
- ・ 12 月 1 日 (月) 12:00 (JST) 発表申込メ切
- ・ 12 月 8 日 (月) 12:00 (JST) 発表題目・概要メ切
- ・ 12 月 15 日 (月) 17:00 (JST) 原稿提出メ切
- ・ 12 月末 プログラム公開

2026 年

- ・ 1 月 15 日 (月) 通常参加登録メ切
- ・ 1 月 19 日 (月) 論文集公開開始
- ・ 1 月 26 日 (月)~30 日 (金) SCIS 2026 開催

概要は原稿提出の有無に関わらずプログラムに掲載されます。

6. 申込み

参加・発表申込みを、11 月上旬より本シンポジウムの Web ページで受け付ける予定です。投稿原稿は「概要：日本語 500 文字以内、英語：1300 文字以内」および「論文：8 ページ以内 (A4 版、1.5 MB 制限)」をご準備ください。

7. 諸注意

本シンポジウムに関する最新の情報は、Web ページをご参照ください。また、参加・発表申込みおよび原稿提出の各締切を遵守してください。締切以降の提出は一切受け付けられません。

[主催]

電子情報通信学会 情報セキュリティ研究専門委員会 (ISEC 研)

[協賛]

情報処理学会 コンピュータセキュリティ研究会 (CSEC 研)

基礎・境界ソサイエティ運営委員会

会長
 次期会長
 ソサイエティ編集長
 副会長 (事業担当)
 副会長 (システムデザイン技術)
 副会長 (音響・超音波)
 副会長 (情報理論とその応用)
 副会長 (信号処理とその応用)
 庶務幹事
 庶務幹事
 会計幹事
 会計幹事
 事業担当幹事
 大会担当幹事
 大会担当幹事
 電子広報担当幹事
 電子広報担当幹事
 論文誌編集委員長
 論文誌編集幹事
 論文誌副編集委員長
 論文誌副編集幹事
 ソサイエティ誌編集委員長
 ソサイエティ誌担当幹事
 ソサイエティ誌担当幹事
 編集特別幹事 (オブザーバ)
 出版委員会委員 (オブザーバ)
 研究会連絡会幹事 (オブザーバ)
 ハンドブック/知識ベース委員 (オブザーバ)
 男女共同参画委員会 (オブザーバ)
 プラチナクラブ運営委員会 (オブザーバ)
 事務局

尾上 孝雄 (大阪大学)
 岩本 貢 (電気通信大学)
 和田山 正治 (名古屋工業大学)
 澁谷 智治 (上智大学)
 前田 義信 (新潟大学)
 青柳 学 (室蘭工業大学)
 楳 勇一 (名古屋大学)
 市毛 弘 (横浜国立大学)
 傘 一 昊 (東京都大学)
 藤澤 匡哉 (東京理科大学)
 筒井 隆弘 (北海道大学)
 吉田 幹彦 (信州大学)
 西新 大輔 (岐阜大学)
 伊藤 花谷 (株式会社東芝)
 藤谷 崇了 (近畿大学)
 古賀 崇士 (豊橋技術科学大学)
 中井 雄 (奈良先端科学技術大学院大学)
 岡田 実 (京都大学)
 林 和則 (筑波大学)
 國廣 昇 (豊橋技術科学大学)
 鈴木 幸太郎 (東京大学)
 定兼 邦彦 (日本放送協会)
 松井 健太郎 (新潟大学)
 宮北 和之 (東京理科大学)
 相川 直幸 (東京理科大学)
 藤川 匡哉 (東京理科大学)
 中野 秀洋 (東京都大学)
 葛岡 成晃 (和歌山大学)
 小西 たつ美 (愛知工業大学)
 前田 義信 (新潟大学)
 永井 宏, 中嶋 彩乃 (電子情報通信学会)

基礎・境界ソサイエティサブソ・研専会議

副会長 (事業担当)
 副会長 (システムデザイン技術)
 副会長 (音響・超音波)
 副会長 (情報理論とその応用)
 副会長 (信号処理とその応用)
 事業担当幹事
 回路とシステム (CAS)
 情報理論 (IT)
 信頼性 (R)
 超音波 (US)
 応用音響 (EA)
 VLSI 設計技術 (VLD)
 情報セキュリティ (ISEC)
 信号処理 (SIP)
 ワイドバンドシステム (WBS)
 システム数理と応用 (MSS)
 思考と言語 (TL)
 技術と社会・倫理 (SITE)
 ITS (高度交通システム) (ITS)
 スマートインフォメディアシステム (SIS)
 イメージメディアクオリティ (IMQ)
 高信頼制御通信 (RCC)
 バイオメトリクス (BioX)
 安全・安心な生活と ICT (ICTSSL)
 ハードウェアセキュリティ (HWS)
 光輝会 (SSA) (オブザーバ)
 技術と歴史 (オブザーバ)
 技術者教育と優良実践 (オブザーバ)
 ヒューマンコミュニケーション G (オブザーバ)
 会長 (オブザーバ)
 次期会長 (オブザーバ)
 庶務幹事 (オブザーバ)
 庶務幹事 (オブザーバ)
 研究会連絡会幹事 (オブザーバ)
 事務局

澁谷 智治 (上智大学)
 前田 義信 (新潟大学)
 青柳 学 (室蘭工業大学)
 楳 勇一 (名古屋大学)
 市毛 弘 (横浜国立大学)
 西新 幹彦 (信州大学)
 下田 真二 (ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社)
 野上 保之 (岡山大学)
 岡村 寛之 (広島大学)
 垣尾 省司 (山梨大学)
 西浦 敬信 (立命館大学)
 富山 宏 (立命館大学)
 清本 晋作 (KDDI 総合研究所)
 西川 清史 (東京都立大学)
 落合 秀樹 (大阪大学)
 宮本 俊幸 (大阪工業大学)
 坪田 康 (京都工芸繊維大学)
 辰己 丈夫 (放送大学)
 羽野 裕之 (三重大学)
 笹岡 直人 (鳥取大学)
 土田 勝治 (NTT 株式会社)
 石井 光治 (香川大学)
 高橋 健太 (日立製作所)
 水野 修 (工学院大学)
 秋下 徹 (ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社)
 大塚 玲 (情報セキュリティ大学院大学)
 篠田 庄司 (中央大学)
 横田 光広 (宮崎大学)
 根岸 一平 (金沢工業大学)
 尾上 孝雄 (大阪大学)
 岩本 貢 (電気通信大学)
 傘 一 昊 (東京都大学)
 藤澤 匡哉 (東京理科大学)
 中野 秀洋 (東京都大学)
 永井 宏, 中嶋 彩乃 (電子情報通信学会)

NOLTA ソサイエティ運営委員会

ソサイエティ会長
 ソサイエティ次期会長
 庶務幹事
 庶務幹事
 会計幹事
 会計幹事
 電子広報担当幹事
 大会担当幹事
 運営委員
 運営委員
 運営委員
 運営委員
 運営委員
 運営委員
 運営委員
 運営委員
 運営委員
 運営委員
 運営委員
 運営委員
 運営委員
 運営委員
 運営委員

関屋 大雄 (千葉大学)
 小西 啓治 (大阪公立大学)
 荒井 伸太郎 (岡山理科大学)
 杉谷 栄規 (大阪公立大学)
 井岡 恵理 (芝浦工業大学)
 加藤 秀行 (大分大学)
 伊藤 大輔 (岐阜大学)
 鳥飼 弘幸 (法政大学)
 高橋 規 (岡山大学)
 上田 哲史 (徳島大学)
 清水 邦康 (千葉工業大学)
 中野 秀洋 (東京都大学)
 長川 幹彦 (東京理科大学)
 久門 尚史 (京都大学)
 保坂 亮 (芝浦工業大学)
 木村 真之 (摂南大学)
 内田 淳史 (埼玉大学)
 上山 憲昭 (立命館大学)
 菅野 円隆 (埼玉大学)
 堀尾 喜彦 (帝京大学先端総合研究機構)
 浅井 哲也 (北海道大学)
 松下 春奈 (香川大学)
 佐藤 雅俊 (玉川大学)
 若宮 直紀 (大阪大学)

Fundamentals Review 編集委員会

編集委員長	定兼 邦彦 (東京大学)
編集委員会幹事 (正)	松井健太郎 (日本放送協会)
編集委員会幹事 (副)	宮北 和之 (新潟大学)
編集委員会幹事補佐	高安 敦 (東京大学)
編集委員	
編集委員 (CAS)	篠宮 紀彦 (創価大学)
編集委員 (VLD)	新谷 道広 (京都工芸繊維大学)
編集委員 (SIP)	京地 清介 (工学院大)
編集委員 (MSS)	澤田 賢治 (大阪大学)
編集委員 (IT)	柴田 凌 (信州大学)
編集委員 (ISEC)	海上 勇二 (パナソニックホールディングス)
編集委員 (WBS)	荒井 剛 (岡山県立大学)
編集委員 (US)	吉田 憲司 (千葉大学)
編集委員 (EA)	若山 圭吾 (NTT 株式会社)
編集委員 (NLP)	伊藤 大輔 (岐阜大学)
編集委員 (R)	吉川 隆英 (富士通研究所)
編集委員 (TL)	谷村 緑 (立命館大学)
編集委員 (SITE)	多川 孝央 (筑紫学園大学)
編集委員 (ITS)	自見 圭司 (群馬大学)
編集委員 (SIS)	二神 拓也 (愛知学院大学)
編集委員 (IMQ)	山添 崇 (湘南工科大学)
編集委員 (BioX)	河原 智一 (東芝インフラシステムズ株式会社)
編集委員 (RCC)	鍋谷 寿久 (株式会社東芝)
編集委員 (CCS)	佐々木智志 (東京都市大学)
編集委員 (ICTSSL)	宇津 圭祐 (東海大学)
編集委員 (HWS)	矢嶋 純 (富士通株式会社富士通研究所)

(上記に含まれない右側の編集幹事会の委員も編集委員として含む)

学会事務局

永井 宏, 中嶋 彩乃
(電子情報通信学会)

Fundamentals Review 編集幹事会

編集委員長	定兼 邦彦 (東京大学)
編集幹事会幹事 (正)	松井健太郎 (日本放送協会)
編集幹事会幹事 (副)	宮北 和之 (新潟大学)
編集幹事補佐	高安 敦 (東京大学)
編集幹事 (総務)	山田 哲直 (埼玉大学)
編集幹事 (渉外)	傘 昊 (東京都市大学)
編集幹事 (企画)	山岸 昌夫 (法政大学)
編集幹事 (Web : 正)	古賀 崇了 (近畿大学)
編集幹事 (Web : 副)	中井 雄士 (豊橋技術科学大学)
特別編集幹事 (Vol. 19, No. 1)	海上 勇二 (ISEC) (パナソニックホールディングス株式会社)
特別編集幹事 (Vol. 19, No. 2)	山添 崇 (IMQ) (湘南工科大学)
特別編集幹事 (Vol. 19, No. 3)	澤田 賢治 (MSS) (大阪大学)
特別編集幹事 (Vol. 19, No. 4)	二神 拓也 (SIS) (愛知学院大学)
編集顧問	牧野 光則 (中央大学)
編集顧問	高橋 篤司 (東京科学大学)
編集顧問	國廣 昇 (筑波大学)
編集顧問	関屋 大雄 (千葉大学)
編集顧問	高島 康裕 (北九州市立大学)

編集後記

今号のごあいさつを執筆しました。AIの進化はめざましいものがありますが、私自身は現在のAIは知能ではないと思っています。一方で、人間の日常会話はあまり頭を使わず、AIと同じような動作をしているのかなとも思います。本誌の解説論文が読者の皆様の知識となることを願っています。(定兼邦彦)

主に「ごあいさつ」の編集を担当しました。ご執筆頂いた皆様並びにご担当頂いた事務局・出版社の皆様にお礼申し上げます。今号の「ごあいさつ」でも触れられておりますが、昨今の生成AIの進化は目を見張るものがあります。訳あって今更Pythonを勉強しているのですが、コードを書くそばから次々と続きを予測、生成してくれます。便利なのですが、これって自分の勉強にならないですよねえ。(松井健太郎)

主に「ESSニュース」「国際会議開催報告」「開催案内」「論文募集」「委員会・編集後記」を担当しました。これらに目を通すなかで、自分の専門分野以外にも興味深い取り組みやシンポジウムが見つかることがあります。ぜひ、専門分野の枠を超えて足を伸ばすきっかけとして頂ければ幸いです。(宮北和之)

「研究会へ行こう」をご執筆頂いた著者・編集・各研究専門委員会の皆様にお礼を申し上げます。各研究会では基礎的な研究から新しいアプローチの応用まで今後の新しい技術の中核になるであろうシード研究が発表され、議論が行われています。日進月歩で技術が発展する情報の世界で、いち早く新しい研究に触れたい方は、ぜひ研究会に参加して聴講して頂ければと思います。(山添 崇)

Fundamentals Review へのお問い合わせ

- ・ 本誌への御意見、御要望。入手など : fr-ess@ieice.org
- ・ Fundamentals Review Homepage : <https://www.ieice.org/ess/ESS/Fundam-Review.html>

複写される方へ

一般社団法人電子情報通信学会は、本誌に掲載された著作物の複写複製に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。複写複製を御希望の方は、一般社団法人学術著作権協会 (<https://www.jaacc.org>) が提供している複製利用許諾システムを通じて申請して下さい。

なお、複写以外の許諾（著作物の転載、翻訳等）に関しては、委託致しておりませんので、直接本会へお問い合わせ下さい。

<問合せ先> 一般社団法人電子情報通信学会
TEL [03] 3433-6691 FAX [03] 3433-6659
著作物利用許諾申請：<https://www.ieice.org/jpn/copyright/tensai.html>

Reprographic Reproduction outside Japan

Making a copy of this publication

The IEICE authorized Japan Academic Association For Copyright Clearance (JAC) to license our reproduction rights of copyrighted works. If you wish to obtain permission of these rights, please refer to the homepage of JAC (<https://www.jaacc.org/en/>) and confirm appropriate organizations to request permission.

Obtaining permission to quote, reproduce; translate, etc.

Please contact the copyright holder directly.

IEICE Secretariat Office,

E-mail: permission@ieice.org

Permission request form: <https://db.ieice.org/chosaku/sinsei/index-e.php>

Fundamentals Review 第十九卷 第二号

令和七年十月一日発行

発行人	白石 智
発行所	一般社団法人 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ 〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 (機械振興会館内) 電話 03-3433-6691(代) FAX 03-3433-6659
WEB化担当	山岡影光
WEB化担当会社	三美印刷株式会社 東京都荒川区西日暮里 6-28-1