

Fundamentals Review

2026 October Vol.20 No.

2

レビュー論文

削除誤りと挿入誤りを訂正するための
符号と量子符号

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

ごあいさつ

58

AI 時代における学会論文誌のこれから

和田山 正

レビュー論文

60

削除誤りと挿入誤りを訂正するための符号と量子符号

萩原 学

解説論文

75

巨大クレーンの自動振れ止め制御を可能にする
音波に基づく吊り荷位置推定システム

中本昌由

83

反射像と車載ステレオカメラを用いた自律型見通し
外障害物位置推定システムの開発

高取祐介

その他

92

ESS ニュース

92

2026 年電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会開催報告

杉谷栄規

95

研究会に行こう！

95

信号処理研究会（SIP）

武田茂樹

96

超音波研究会（US）

垣尾省司

96

VLSI 設計技術研究会（VLD）

宮村 信

97

非線形問題研究会（NLP）

久門尚史

97

スマートインフォメディアシステム研究会（SIS）

田向 権

98

応用音響研究会（EA）

西浦敬信

99

技術と社会・倫理研究会（SITE）

村上祐子

100

国際会議開催報告

100

IEEE International Symposium on Information Theory

鎌塚 明

102

The 41st International Technical Conference on Circuits/Systems,
Computers and Communications

篠宮紀彦

104

受賞者の声

104

第 82 回（令和 7 年度）論文賞

108

開催案内

110

論文募集

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

58

The Future of Society Journals in the Age of AI

Tadashi Wadayama

Advanced Review Papers

60

Codes and Quantum Codes for Correcting Deletion and Insertion Errors

Manabu HAGIWARA

Review Papers

75

Sway Angle Estimation Systems for Anti-Sway Control of Huge Crane Based on Sound Waves

Masayoshi NAKAMOTO

83

Autonomous non-Line-of-Sight obstacle detection technology

Yusuke TAKATORI

Miscellaneous Articles

92

ESS News

95

Let's go to IEICE Workshops!

100

International Conference Report

104

Winners' Voice

108

Call for Participations

110

Call for Papers



AI 時代における学会論文誌のこれから

The Future of Society Journals in the Age of AI

ソサイエティ編集長 和田山 正

1. はじめに

基礎・境界ソサイエティ（ESS）の活動に日頃よりご協力を賜り、厚くお礼申し上げます。このご挨拶では、論文誌を取り巻く状況と今後の方向性について私見を述べさせていただきます。

我々の身の回りでの昨今の大きな変化として、AI の発展が研究のスピードを大きく加速させている現状があります。文献調査、数式の検算、プログラムの作成、数値実験の実施、原稿の推敲といった研究活動の多くの場面で AI の活用が当たり前のものとなり、研究の営みそのものが AI の活用を前提とした形へと変化しつつあります。国際学会への投稿数が急速な増加を示している分野もあり、研究のペースが世界的にスピードアップしているようです。また、長らく未解決であった数学の難問の解決に AI が貢献したというニュースも聞こえてきます。研究者として、今後の研究者のあり方について考えを巡らせることが増えたように感じます。

そのような状況においても、得られた研究成果をタイムリーに関連研究者へ展開するとともに、新たに得られた有用な知見を研究者間で共有し、「コミュニティの知」として昇華させる手助けをすること、そして自由闊達な議論の場を提供することが学会の大きな役割であることに変わりはありません。AI の苦手な「言語化が完全になされていない知識やアイデア」を交換し、人間ならではの未知への探求心やモチベーションに直接触れられる場は、今まで以上に重要になってくるのではないのでしょうか。論文誌も、査読や議論を通じて、そのような場の一端を担っています。研究の世界の変容に適応しつつ、新しい論文誌のあり方を模索していくことが、今まさに求められていると感じています。

2. 論文誌について

論文誌は学会活動の大きな柱の一つです。研究成果を査読によって検証し、記録として残し、コミュニティに共有するという機能は、学会の存在意義と密接に結びついています。

研究のスピードが加速する中で、査読から掲載までの期間を短縮し、成果をタイムリーに届けることの重要性は、これまで以上に高まっています。一方で、AI の助けを借りて体裁の整った原稿を作ることが容易になった今、専門家が内容の新規性と正しさを吟味し、その成果を「コミュニティの知」として位置づける査読の価値は、むしろ増していると思われます。取り巻く環境が変化する中で、今後も継続可能な形にリフォームしつつ、論文誌の発行を続けていくことが重要です。

また、論文誌は、編集委員長、編集幹事、編集委員、そして査読者という多くの方々のボランティアワークにより支えられているシステムです。投稿論文を丁寧に読み、建設的な意見を寄せるという査読の営みは、まさに言語化しきれない専門家の知見が著者へと手渡される場でもあります。ご多忙の中で貴重な時間とエフォートを割いてくださる皆様に、この場を借りて心より感謝申し上げます。

和文論文誌は、日本語で研究成果を発表できる貴重な場です。母語で深く考え、厳密に論証した成果を残すことの意義は、AI による翻訳が容易になった時代においても失われるものではありません。ESS では近年、和文論文誌と英文論文誌の編集委員会の統合が実施され、継続可能な形での運用が進められています。この体制のもとで、和文論文誌を今後も維持していきたいと考えています。

英文論文誌については、インパクトファクタ（IF）の伸び悩み、海外からの投稿数の減少など、取り巻く環境は楽観できるものではありません。オープンアクセス化をはじめ、これまで多くの方々が論文誌の価値向上に向けて努力を重ねてこられました。最近の動きとして、通信ソサイエティでは、英文論文誌 B 並びに ComEX の論文を IEEE Xplore に掲載しており、可視性の向上などのポジティブな効果が見え始めている状況と伺っています。一方で、コスト面では割高になるという側面もあり、ESS でもすぐに進めるべきとは考えていませんが、その効果と費用について、今後も状況を注視していく必要があると考えています。

3. Fundamentals Review 誌

FR 誌は、優れた技術解説、チュートリアル論文の宝庫であり、ESS にとっての一つの無形の知的資産です。分野の第一線で活躍する研究者が、自らの視点で歴史的経緯と本質を整理した解説記事は、これから研究を始める学生や若手研究者にとって、また分野の境界を越えて新しい研究に踏み出そうとする研究者にとって、信頼できる出発点となっています。この貴重な資産を、過去のアーカイブを含めて、より広範な読者に読んでもらうことを考えることは重要です。

本会では、山中前会長の主導により論文誌の多言語化が進められており、諸外国からのアクセスも一定の増加を見せています。AI 時代においては、読者が自前の AI を用いて記事を自国語化することも自然になってくると考えられます。そのことを踏まえると、FR 誌の記事を HTML 化し、AI からのアクセスを容易にすることも、検討に値する選択肢かもしれません。FR 誌の知的資産が、人間にとっても AI にとっても参照しやすい形で蓄積されていくことは、ESS の存在感を高めることにもつながると期待しています。

4. おわりに

AI がもたらす研究の世界の変容は、学会が提供してきた価値を再認識させる機会でもあります。論文誌が、査読や議論を通じて人と人とが知を交わし、未知への探求心を分かち合う場であり続けるよう、ソサイエティの皆様とともに、この変化の時代における論文誌のあり方を考えてまいりたいと思います。引き続きご理解とご支援をお願い申し上げます。

著者紹介

和田山正（正員）

1991 京都工繊大・工・電子卒、1993 同大学院博士前期課程了、1997 博士（工学）、1995 岡山県立大・情報工・助手、2004 名工大・助教授、2010 同大学教授、現在に至る。符号理論、情報理論、通信のための信号処理、機械学習の通信への応用の研究に従事。博士（工学）、IEEE Member。本会において、2017 ESS 副会長（事業担当）、2020 情報理論研究会研究専門委員長、2024 ESS 会長、2025-2026 ESS ソサイエティ編集長。

削除誤りと挿入誤りを訂正するための符号と量子符号

Codes and Quantum Codes for Correcting Deletion and Insertion Errors

萩原 学 Manabu HAGIWARA

アブストラクト 本稿は、削除誤りと挿入誤りを訂正するための符号理論を、古典符号理論と量子符号理論の両面から解説する入門的レビュー論文である。まず、削除球・挿入球のサイズ、編集距離（Levenshtein 距離）、 t -削除訂正と t -挿入訂正の同値性、冗長度の上界・下界など基本的な性質を整理する。次に、最適な冗長度 $\log_2 n + O(1)$ と線形時間復号を実現する VT 符号を中心に、Monotone 符号・Tenengol'ts 符号など単一削除訂正符号を解説する。続いて、Helberg 符号、2 削除訂正符号、Brakensiek–Guruswami–Zbarsky 符号、Haeupler–Shahrasbi の同期文字列を用いた構成など多重削除訂正符号を概観する。更に、BAD 誤り符号・二次元配列符号・形式検証など削除誤り研究の広がりを紹介する。最後に、部分トレースとして定式化される量子削除誤りを扱い、NH 条件に基づく量子単一削除訂正符号の設計法、最短符号長 $n = 4$ の 4 量子ビット符号、置換不変量子符号による多重削除訂正、量子リード・ソロモン符号からの多重削除符号構成を解説する。

キーワード 削除誤り訂正符号、挿入誤り訂正符号、VT 符号、Helberg 符号、量子削除符号、NH 条件、量子リード・ソロモン符号、DNA ストレージ、同期誤り

Abstract This paper presents a tutorial survey on error-correcting codes for deletion and insertion errors, covering both classical and quantum coding theory. We first review fundamental properties: the sizes of deletion and insertion balls, the Levenshtein (edit) distance, the equivalence between deletion-correcting and insertion-correcting codes, and upper and lower bounds on redundancy. We then discuss single deletion-correcting codes, focusing on VT (Varshamov–Tenengol'ts) codes, which achieve the optimal redundancy of $\log_2 n + O(1)$ with linear-time decoding algorithms for both deletion and insertion errors, along with Monotone codes and Tenengol'ts codes for extended settings. Multi-deletion codes are surveyed next, covering Helberg codes, two-deletion-correcting constructions, the efficient codes of Brakensiek–Guruswami–Zbarsky, and synchronization strings by Haeupler–Shahrasbi that approach the Singleton bound. We also discuss extensions of deletion-error research, including BAD error codes, two-dimensional array codes, and formal verification using a proof assistant. Finally, we introduce quantum deletion error-correcting codes, formulated via partial traces. We present the NH conditions—a set of combinatorial conditions on two classical sets A and B —that provide a sufficient condition for single quantum deletion correction, the minimum-length four-qubit code ($n = 4$), permutation-invariant quantum codes for multiple deletions, and constructions derived from quantum Reed–Solomon codes.

Key words Deletion error-correcting codes, Insertion error-correcting codes, VT codes, Helberg codes, Quantum deletion codes, NH conditions, Quantum Reed–Solomon codes, DNA storage, Synchronization errors

1. はじめに

誤り訂正符号は、通信路や記憶媒体における符号語の変化（誤り）を検出・訂正する技術である。誤りモデルを大きく次の 4 種類に分類すれば：

- (1) 置換誤り（**substitution error**）：あるシンボルが別のシンボルに変化する（例：01011 → 00011）。

- (2) 消失誤り（**erasure error**）：あるシンボルが未知値（“?”）に変化する（例：01011 → 0?011）。

- (3) 挿入誤り（**insertion error**）：余分なシンボルが挿入される（例：01011 → 001011）。

- (4) 削除誤り（**deletion error**）：あるシンボルが消滅する（例：01011 → 0011）。

が挙げられる。一般的な符号理論のテキストは前者二つを扱う傾向にある。本稿は後者二つ、特に最後の削除誤りにフォーカスした符号理論を解説する。

削除誤りは、通信路や記録媒体においてシンボルが「欠落」する現象に対応する。消失誤りと異なり、受信側は欠落位置を知ることができないため、削除誤り訂正は消失誤り訂正よりも本質的に困難である。以下に代表的な応用を挙げる。

DNA データストレージ：DNA 分子を記録媒体として情報

萩原 学 正員 千葉大学大学院理学研究院
E-mail hagiwara@math.s.chiba-u.ac.jp
Manabu HAGIWARA, Member (Graduate School of Science, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-0022 Japan).

電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ
Fundamentals Review Vol.20 No.2 pp.60–74 2026 年 10 月
©電子情報通信学会 2026

を格納するシステムでは、A（アデニン）・T（チミン）・G（グアニン）・C（シトシン）の4塩基からなる塩基配列が情報の担体となる。塩基配列の読み取り（シーケンシング）過程では削除・挿入誤りが高頻度で発生するといわれ、情報デバイスとして実用化するには高性能な削除誤り訂正符号が不可欠である。

レーストラックメモリ：レーストラックメモリは磁壁の移動によりビットを読み書きする次世代不揮発性メモリである⁽¹⁾。読み取りヘッドの位置ずれや磁壁速度の変動により、ビット単位の削除や挿入に相当する誤りが生じるといわれている。

同期誤り通信路：受信側クロックのずれにより、送信シンボルの一部が欠落（削除）したり余分なシンボルが挿入される「同期誤り」が生じるといわれている⁽²⁾。

削除誤りの研究の歴史は1960年代にさかのぼる。Levenshtein は1966年の論文⁽³⁾において、Varshamov と Tenengol'ts が非対称誤り訂正符号として提案した符号⁽⁴⁾が単一削除（及び単一挿入）誤りを訂正できることを示した。この符号は現在ではVT符号、あるいはLevenshtein符号と呼ばれ、単一削除訂正符号の代表例として広く知られている。その後、二つ以上の削除を訂正するHelberg符号⁽⁵⁾が提案されたものの、多重削除符号の構成は現在も活発に研究されている未解決問題を多く含む分野である。

近年、削除誤りの問題は量子情報の分野にも拡張されてきた。量子通信・量子計算において光子の欠落は「量子削除誤り」として定式化でき、量子状態の重ね合わせを保ちながら訂正する必要があるため、古典の削除誤りとは本質的に異なる困難を伴う。2019年から2020年にかけて量子削除訂正符号の初めての例が構成され、現在は最短符号長の決定、多重削除への拡張、量子インデル距離の理論的整備が進んでいる。

本稿は、古典符号理論と量子符号理論の両面から削除誤りと挿入誤りを訂正するための符号を概説する入門的レビュー論文である。第2.節で削除誤りと挿入誤りの基本的な性質を整理し、第3.節で単一削除訂正符号を、第4.節で多重削除訂正符号を、第5.節で削除誤りの更なる広がりを概観する。続いて第6.節では量子削除誤り訂正符号を解説し、第7.節でまとめと今後の課題を述べる。

2. 削除誤りと挿入誤りの基本的な性質

2.1 削除誤りと挿入誤りの定義

以下、 n を正整数とし、 $[n] := \{1, 2, \dots, n\}$ と表す。整数の集合 $\Sigma = \{0, 1, \dots, q-1\}$ を q 元アルファベット ($q \geq 2$, 主として $q = 2$)、 Σ^n を長さ n の語（系列）の集合とする。語 $\mathbf{x} \in \Sigma^n$ の長さ (length) を $|\mathbf{x}| := n$ で表す。可変長の語を扱う際には $\Sigma^* := \bigcup_{n \geq 0} \Sigma^n$ ($\Sigma^0 = \{\varepsilon\}$, ε は空文字) を Σ 上の系列全体の集合として用いる。 Σ^n の空でない部分集合 $C \subseteq \Sigma^n$ を符号 (code)、その各元を符号語 (codeword) と呼ぶ。

定義 — 削除誤り・挿入誤り —

（単一削除誤り） $\mathbf{x} = x_1 x_2 \cdots x_n \in \Sigma^n$ の座標位置 $1 \leq i \leq n$ のシンボルを取り除いて残りを詰めた語 $x_1 \cdots x_{i-1} x_{i+1} \cdots x_n \in \Sigma^{n-1}$ を得る操作を位置 i の単一削除誤りと呼ぶ。位置を明示せず、削除誤りと呼ぶことがある。

（単一挿入誤り） $\mathbf{x} = x_1 x_2 \cdots x_n \in \Sigma^n$ の座標位置 $1 \leq i \leq n+1$ にシンボル $\sigma \in \Sigma$ を挿入した語 $x_1 \cdots x_{i-1} \sigma x_i \cdots x_n \in \Sigma^{n+1}$ を得る操作を (i, σ) の単一挿入誤りと呼ぶ。 (i, σ) を明示せず、挿入誤りと呼ぶことがある。

t 個の削除誤りの合成を t -削除誤りと呼ぶ。 $\mathbf{y} \in \Sigma^*$ が $\mathbf{x} \in \Sigma^*$ の部分列 (subsequence) であるとは、 $\mathbf{x}$ に有限回の単一削除誤りを繰り返し適用して $\mathbf{y}$ が得られることをいう（0 回の場合 $\mathbf{y} = \mathbf{x}$ ）。

$\mathbf{x} \in \Sigma^n$ に対する t -削除球を

$$D^t(\mathbf{x}) := \{\mathbf{y} \in \Sigma^{n-t} \mid \mathbf{y} \text{ は } \mathbf{x} \text{ の部分列}\}$$

と定義する。すなわち $D^t(\mathbf{x})$ は $\mathbf{x}$ に t 回の削除誤りを適用して得られる全ての語の集合である。

同様に、 $\mathbf{x} \in \Sigma^n$ に対する t -挿入球を

$$I^t(\mathbf{x}) := \{\mathbf{y} \in \Sigma^{n+t} \mid \mathbf{x} \text{ は } \mathbf{y} \text{ の部分列}\}$$

と定義する。

t -削除訂正符号とは、任意の2符号語 $\mathbf{c}, \mathbf{c}' \in C$ ($\mathbf{c} \neq \mathbf{c}'$) に対して $D^t(\mathbf{c}) \cap D^t(\mathbf{c}') = \emptyset$ となる符号 $C \subseteq \Sigma^n$ のことである。

同様に t -挿入訂正符号とは、任意の2符号語 $\mathbf{c}, \mathbf{c}' \in C$ ($\mathbf{c} \neq \mathbf{c}'$) に対して $I^t(\mathbf{c}) \cap I^t(\mathbf{c}') = \emptyset$ となる符号 $C \subseteq \Sigma^n$ のことである。

2.2 挿入球のサイズ

誤り訂正符号を構成するには誤りに関連する球のサイズに関する知見が有用である。ここでは挿入球のサイズの一定性について紹介する。

定理（挿入球のサイズの一定性⁽³⁾）

有限アルファベット Σ ($|\Sigma| = q$) と正整数 n, t を固定する。このとき、 t -挿入球のサイズ $|I^t(\mathbf{x})|$ は $\mathbf{x} \in \Sigma^n$ によらず、 n, t, q のみで定まる。

$$|I^t(\mathbf{x})| = \sum_{j=0}^t \binom{n+t}{j} (q-1)^j \quad (1)$$

証明。 挿入球の補集合 $\Sigma^{n+t} \setminus I^t(\mathbf{x})$ の濃度を数えられれば、全体集合 Σ^{n+t} の濃度が $q^{n+t} = \sum_{j=0}^{n+t} \binom{n+t}{j} (q-1)^j$ であることから、挿入球の濃度が求められる。そこで次を示せば十分である。

$$|\Sigma^{n+t} \setminus I^t(\mathbf{x})| = \sum_{k=0}^{n-1} \binom{n+t}{k} (q-1)^{n+t-k} \quad (2)$$

簡単のため $N := n + t$ とおく. $\mathbf{y} \in \Sigma^N$ に対して, $\mathbf{y}$ を左から順に走査し, $x_1, x_2, \dots$ を順番に照合して, どれだけマッチするか, どこでマッチするかを考察する.

正確には, $p_0 := 0$ とし, $i = 1, 2, \dots$ に対して

$$p_i := \min\{j \in \{p_{i-1} + 1, \dots, N\} \mid y_j = x_i\}$$

と定め, このような j が存在しない時点で停止する.

$\ell(\mathbf{y})$ をマッチした文字数 ($0 \leq \ell(\mathbf{y}) \leq n$) とする. $\mathbf{x}$ が $\mathbf{y}$ の部分列であることは $\ell(\mathbf{y}) = n$ と同値であり, 逆に部分列でないこと ($\mathbf{y} \notin I^t(\mathbf{x})$) は $\ell(\mathbf{y}) \leq n - 1$ と同値である.

$k \in \{0, 1, \dots, n - 1\}$ を固定し, $N_k := |\{\mathbf{y} \in \Sigma^N : \ell(\mathbf{y}) = k\}|$ を求める. $\ell(\mathbf{y}) = k$ であれば, マッチした位置の集合 $S(\mathbf{y}) := \{p_1 < p_2 < \dots < p_k\} \subseteq [N] := \{1, \dots, N\}$ が定まる ($|S(\mathbf{y})| = k$). そこで, 各 $j \in [N]$ に対して $m(j) := |\{p \in S(\mathbf{y}) \mid p < j\}|$ つまり, j より前でマッチする文字数と書くことにする.

こうすれば, $\ell(\mathbf{y}) = k$ となる $\mathbf{y} \in \Sigma^N$ は, $x_1, \dots, x_k$ がマッチする位置の集合 $S \subseteq [N]$ ($|S| = k$) と, 各 $j \notin S$ のシンボル $u_j \in \Sigma \setminus \{x_{m_S(j)+1}\}$ (ただし $m_S(j) := |\{p \in S \mid p < j\}|\})$ とにより過不足なく決まる. ここで $j \notin S$ においてシンボル $x_{m_S(j)+1}$ を置くと位置 j が一致位置として選ばれることになり $j \notin S$ に矛盾するため, 選択可能なシンボルは残る $q - 1$ 個に限られる. 逆に, $u_j \neq x_{m_S(j)+1}$ を満たすシンボルを選べば一致位置の集合がちょうど S となる $\mathbf{y}$ が定まる. したがって,

$$N_k = \binom{N}{k} (q - 1)^{N-k}$$

が得られる.

ゆえに

$$|\Sigma^{n+t} \setminus I^t(\mathbf{x})| = \sum_{k=0}^{n-1} N_k = \sum_{k=0}^{n-1} \binom{n+t}{k} (q-1)^{n+t-k}$$

が従う. $\square$

2.3 削除球のサイズ

一方, 削除球のサイズは語によって変化する.

— 定義 — ランとラン数 —

$\mathbf{x} = x_1 x_2 \dots x_n \in \Sigma^n$ のラン (run) とは, $\mathbf{x}$ 中の極大な同一シンボル連続部分列のことをいう. すなわち, 「 $x_i = x_{i+1} = \dots = x_j$ 」かつ「 $i = 1$ または $x_{i-1} \neq x_i$ 」かつ「 $j = n$ または $x_j \neq x_{j+1}$ 」を満たす $x_i x_{i+1} \dots x_j$ をランと呼ぶ. $\mathbf{x}$ のラン数 (ランの個数, number of runs) を $\|\mathbf{x}\|$ で表す ($1 \leq \|\mathbf{x}\| \leq n$).

[例 1] (削除球のサイズの非一定性) $\mathbf{x} \in \Sigma^n$ において, 位置 i と位置 j ($i \neq j$) の削除が同じ語を与えるのは, i と j が $\mathbf{x}$ の同じランに属するときのみである. よって

$$|D^1(\mathbf{x})| = \|\mathbf{x}\|$$

が成り立ち, $\mathbf{x}$ によって異なる値をとる:

$$|D^1(0^n)| = 1 \quad (\text{ラン数 } 1),$$

$$|D^1(0^{n/2} 1^{n/2})| = 2 \quad (\text{ラン数 } 2, n \text{ 偶数}),$$

$$|D^1((01)^{n/2})| = n \quad (\text{ラン数 } n, n \text{ 偶数}).$$

削除球サイズとラン数について次の補題が成り立つ.

補題 (削除球サイズとラン数)

$\mathbf{x} \in \Sigma^n$ ($|\Sigma| = q, q \geq 2$) に対して

$$\binom{\|\mathbf{x}\| - t + 1}{t} \leq |D^t(\mathbf{x})| \leq \binom{\|\mathbf{x}\| + t - 1}{t}.$$

両端とも $\mathbf{x}$ のラン数 $\|\mathbf{x}\|$ のみに依存し, 各証明はアルファベットサイズ q によらない (任意の $q \geq 2$ で成立).

下界の証明).

$r = \|\mathbf{x}\|$ とし, $\mathbf{x}$ のランを $R_1, R_2, \dots, R_r$ とする. 各 R_k の長さを ℓ_k , シンボルを s_k と書く ($s_k \neq s_{k+1}$). つまり $R_i = s_i^{\ell_i}$ である.

写像 ϕ の導入. $[r] := \{1, \dots, r\}$ の非隣接 t 元部分集合とは, $S = \{j_1 < j_2 < \dots < j_t\} \subseteq [r]$ で $j_{k+1} \geq j_k + 2$ ($k = 1, \dots, t - 1$) を満たすものである. 各 S に対し, ラン $R_{j_1}, \dots, R_{j_t}$ それぞれのラストシンボル (最後尾) を 1 個削除して得られる語を $\phi(S) \in D^t(\mathbf{x})$ と定める.

単射性 ($S \neq S' \Rightarrow \phi(S) \neq \phi(S')$) の証明. $S \Delta S'$: = $(S \cup S') \setminus (S \cap S')$ とおく. $j := \min(S \Delta S')$ とし, 一般性を損なうことなく $j \in S$ とする. j は $S \Delta S'$ の最小元なので $S \cap \{1, \dots, j-1\} = S' \cap \{1, \dots, j-1\}$, すなわち $R_1, \dots, R_{j-1}$ に対する操作は $\phi(S)$ と $\phi(S')$ で共通であり, その後の位置 $L_j - d + 1$ まで ($L_j := \sum_{k < j} \ell_k$, $d := |S \cap \{1, \dots, j-1\}|$) 両者は一致する. 第 $L_j - d + 1$ 文字め以降を比較する ($j \in S$ なので $\phi(S)$ は R_j の末尾を 1 文字削除するが, $j \notin S'$ なので $\phi(S')$ は削除しない):

- $\ell_j \geq 2$ のとき: $\phi(S)$ では R_j の末尾のシンボル s_j を 1 個削除するため, s_j が $\ell_j - 1$ 個続いた後に R_{j+1} の先頭 s_{j+1} が来る. 一方 $\phi(S')$ では s_j が ℓ_j 個続く. よって第 $L_j - d + \ell_j$ 文字めが $\phi(S)$ では $s_{j+1} \neq s_j$, $\phi(S')$ では s_j となり, $\phi(S) \neq \phi(S')$.
- $\ell_j = 1$ のとき: $\phi(S)$ では R_j の末尾 (= R_j の唯一のシンボル s_j) が削除されて R_j 全体が消えるため, 第 $L_j - d + 1$ 文字めは R_{j+1} の先頭 s_{j+1} となる. 一方 $\phi(S')$ の第 $L_j - d + 1$ 文字めは s_j のままである. $s_j \neq s_{j+1}$ より $\phi(S) \neq \phi(S')$.

非隣接部分集合の個数. $j_{k+1} \geq j_k + 2$ を満たす $\{j_1 < \dots < j_t\} \subseteq [r]$ の個数は, $i_k := j_k - (k - 1)$ ($k = 1, \dots, t$) と置換すると $1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_t \leq r - t + 1$ と 1 対 1 に対応するから, $\binom{r-t+1}{t}$ である.

$$\text{以上から } |D^t(\mathbf{x})| \geq \binom{\|\mathbf{x}\| - t + 1}{t}. \quad \square$$

上界の証明).

$r = \|\mathbf{x}\|$ とし, ランを $R_1, \dots, R_r$ (長さ ℓ_j , シンボル s_j) とする.

$\mathbf{x}$ からの t 削除を, ラン R_j から e_j 個削除する ($e_j \geq 0$,

$e_j \leq \ell_j$, $\sum_j e_j = t$) としよう. ラン R_j の全文字はシンボル s_j に等しいので, R_j 内のどの e_j 個を削除しても残るのは「 $\ell_j - e_j$ 個の s_j 」であり, 結果は選び方によらない. したがって, $(e_1, \dots, e_r)$ が定まれば削除結果 y は一意に決まる (ランが消滅して隣のランが合体する場合も含めて).

そのような $(e_1, \dots, e_r)$ の取り方から上限 ℓ_i を忘れた集合を $E := \{(e_1, \dots, e_r) \in \mathbb{Z}_{\geq 0}^r : \sum_j e_j = t\}$ とおく. このとき

$$|D^t(x)| \leq |E| = \binom{r+t-1}{t} = \binom{\|x\|+t-1}{t}.$$

□

2.4 編集距離/Levenshtein 距離の定義と諸性質

削除/挿入誤り訂正符号の理論において, 2 語間の「変換コスト」を定量化する尺度として編集距離 (edit distance) あるいは **Levenshtein 距離** が広く用いられる.

定義 — 編集距離 (Levenshtein 距離) —

$x, y \in \Sigma^*$ に対して, 挿入と削除だけで x を y に変換するときの最小操作回数を編集距離 (または **Levenshtein 距離**) と呼び, $d_L(x, y)$ で表す. (注)

(注): 挿入・削除に加えて置換 (1 シンボルの書き換え) も許したときの最小操作回数を **IDS 距離** (Insertion-Deletion-Substitution distance) と呼び, 編集距離と区別する.

$z \in \Sigma^*$ が x と y の双方の部分列であるとき, z を共通部分列 (common subsequence) と呼ぶ. 共通部分列の最大長を $\text{LCS}(x, y)$ で表す. また, x と y がともに部分列となる語 s を共通スーパー系列 (common supersequence) と呼び, その最小長を $\text{SCS}(x, y)$ で表す. 編集距離 (Levenshtein 距離) はこれらと次の関係がある.

命題 (編集距離と最長共通部分列)

$x, y \in \Sigma^*$ に対して,

$$d_L(x, y) = |x| + |y| - 2\text{LCS}(x, y), \quad (3)$$

$$d_L(x, y) = 2\text{SCS}(x, y) - |x| - |y|. \quad (4)$$

前者の等式の証明.

x と y の共通部分列 z (長さ l) を一つ固定する. x から $|x| - l$ 個のシンボルを削除して z を得, 続いて $|y| - l$ 個のシンボルを挿入して y を得る変換列が構成できるから, $d_L(x, y) \leq (|x| - l) + (|y| - l) = |x| + |y| - 2l$. l を最大 ($l = \text{LCS}(x, y)$) にとると上界 $d_L(x, y) \leq |x| + |y| - 2\text{LCS}(x, y)$ が得られる.

逆に, 任意の挿入・削除の操作列で x を y に変換するとき, 各ステップで「変更されなかったシンボルの列 (対応付け)」を追跡すると, 最終的に変更されずに残ったシンボルは x と y の共通部分列を形成する. その長さを l' とすれば操作回数は $(|x| - l') + (|y| - l') = |x| + |y| - 2l'$ であり, $l' \leq \text{LCS}(x, y)$ から $d_L(x, y) \geq |x| + |y| - 2\text{LCS}(x, y)$. 両方向の不等式より等式が成立する. □

後者は, 前者と同様に示せる.

次は Levenshtein 距離が距離の公理を満たすことを述べている. 証明は省略する.

命題 (編集距離の基本性質)

d_L は Σ^* 上の距離関数 (metric) である:

- (1) (非負性) $d_L(x, y) \geq 0$, 等号は $x = y$ のとき,
- (2) (対称性) $d_L(x, y) = d_L(y, x)$,
- (3) (三角不等式) $d_L(x, z) \leq d_L(x, y) + d_L(y, z)$.

$C \subseteq \Sigma^n$ が t -削除訂正符号であることは, 任意の異なる符号語 $c, c' \in C$ に対して $d_L(c, c') > 2t$ が成り立つことと同値である.

2.5 削除符号と挿入符号の等価性

定理 (Levenshtein 1966⁽³⁾)

符号 $C \subseteq \Sigma^n$ について, Levenshtein 距離における最小距離復号のもとで, 以下は同値である:

- (i) C は t -削除訂正符号である.
- (ii) C は t -挿入訂正符号である.
- (iii) C は (合計) t 個の挿入と削除の複合誤り訂正符号である.

証明.

$C \subseteq \Sigma^n$ に対し, 任意の異なる $c, c' \in C$ について以下の同値関係を順に確認する.

基本事実: 同長 $|c| = |c'| = n$ のとき,

$$\begin{aligned} D^t(c) \cap D^t(c') \neq \emptyset &\iff \text{LCS}(c, c') \geq n - t \\ &\iff d_L(c, c') \leq 2t, \end{aligned}$$

なぜなら, $D^t(c) \cap D^t(c')$ の元 (長さ $n - t$) は c, c' の共通部分列にはかならないからである.

(i) $\iff$ (ii) (削除訂正 $\iff$ 挿入訂正): $y \in I^t(c) \cap I^t(c')$ (長さ $n + t$) が存在するとは, c と c' が共通のスーパー系列 y (長さ $n + t$) をもつことであり, $\text{SCS}(c, c') \leq n + t$, すなわち $d_L(c, c') = 2\text{SCS}(c, c') - 2n \leq 2t$ と同値である (逆向きは: $d_L(c, c') \leq 2t$ ならば長さ $\leq n + t$ の共通スーパー系列が存在し, 適宜シンボルを末尾に追加して長さちょうど $n + t$ の $y \in I^t(c) \cap I^t(c')$ が得られる). よって (i) と (ii) はともに $d_L(c, c') > 2t$ と等価であり, 互いに同値である.

(i) $\iff$ (iii) (削除訂正 $\iff$ 挿入・削除複合訂正): 合計 t 回の挿入・削除 (a 回の挿入と b 回の削除, $a + b = t$) の複合誤りで c から得られた語を y とし, 同じ誤りで c' から y が得られたとすると, 三角不等式より $d_L(c, c') \leq d_L(c, y) + d_L(y, c') = t + t = 2t$ となり, (i) の条件 $d_L > 2t$ に矛盾する. 逆に (i) が成り立てば, どのような $a + b = t$ の複合誤りも同様に復号不能な衝突を引き起こさないため (iii) も成立する. □

この定理により, 削除符号の構成に集中すれば, 自動的に挿

入符号及び挿入/削除の複合訂正符号が得られる。ただし、削除誤り訂正のアルゴリズムが挿入誤り訂正のアルゴリズムなどに変換されるという意味ではない。復号アルゴリズムは別途検討する必要がある。

2.6 符号の冗長度の限界

q 元アルファベット上の t -削除訂正符号 C の冗長度 (redundancy) とは

$$r := n - \log_q |C|$$

のことである。 r ビット分の情報を誤り訂正のヒントとして付加していることを意味する。

また、 q 元アルファベット上の長さ n の t -削除訂正符号の最大サイズを

$$A_q(n, t) := \max\{|C| : C \subseteq \Sigma^n, C \text{ は } t\text{-削除訂正符号}\}$$

と定める。

以下この節では t を固定定数とみなし、 q は n の関数でよいとする。 $O(\cdot)$ は $n \rightarrow \infty$ (t 固定) におけるランダウ記法を表し、 O の中の定数は t のみに依存する (q, n には依存しない)。特に $O(1)$ は n にらず有界な量 (t のみに依存する定数) を、 $o(1)$ は $n \rightarrow \infty$ のとき 0 に収束する量を表す。

Levenshtein は削除数 t を固定した上で、アルファベット数が $q = 2$ のとき、大きな符号長 n に対する t -削除符号の冗長度の下界を示した。最近の研究では t を固定した上で、 q を 2 に限らないだけでなく、 q と n に相関のある削除符号が研究される傾向にある。そこで本稿は Levenshtein のアイデアをベースにしている点に注意されたい。

ここから示すことは、 t を固定したときの冗長度の漸近的な上界

$$t \log_q n + O(1) \leq r \leq 2t \log_q n + O(1)$$

である。これは、 t -削除訂正のために必要かつ十分な冗長度が符号長に対する対数オーダーであるだけでなく、 $\log_q n$ の係数が t 以上 $2t$ 以下の範囲に収まることを意味する。係数の正確な値 (下界の t か上界の $2t$ か、あるいはその間か) は未解決である。以下では、まず下界を、次に上界をそれぞれ証明する。

定理 (冗長度の下界⁽³⁾)

正整数 t を固定する。 q と n も正整数ではあるが固定はせず、更に独立していてもよい。その上で、 q 元アルファベット上の長さ n の t -削除訂正符号の冗長度 r は次の下界をもつ。

$$t \log_q n + O(1) \leq r$$

証明.

$C \subseteq \Sigma^n$ を t -削除訂正符号とする。

2.5 節の等価性定理より、 C は t -挿入訂正符号でもある。よっ

て、 t -挿入訂正符号の定義から、異なる任意の $\mathbf{c}, \mathbf{c}' \in C$ に対して $I^t(\mathbf{c}) \cap I^t(\mathbf{c}') = \emptyset$ 。

各挿入球は $I^t(\mathbf{c}) \subseteq \Sigma^{n+t}$ を満たし、かつ互いに素だから、

$$\bigsqcup_{\mathbf{c} \in C} I^t(\mathbf{c}) \subseteq \Sigma^{n+t}.$$

2.2 節の定理より $|I^t(\mathbf{c})|$ は $\mathbf{c} \in \Sigma^n$ にらず一定であるから、

$$|C| \cdot |I^t(\mathbf{c})| \leq |\Sigma^{n+t}| = q^{n+t}.$$

式 (1) より

$$|I^t(\mathbf{c})| = \sum_{j=0}^t \binom{n+t}{j} (q-1)^j \geq \binom{n+t}{t} (q-1)^t.$$

$(n+1), (n+2), \dots, (n+t)$ は全て $n+1$ 以上であるから、

$$\binom{n+t}{t} = \frac{(n+1)(n+2) \cdots (n+t)}{t!} \geq \frac{(n+1)^t}{t!}.$$

したがって

$$|I^t(\mathbf{c})| \geq \frac{(n+1)^t (q-1)^t}{t!}.$$

よって、

$$|C| \leq \frac{t! q^{n+t}}{(n+1)^t (q-1)^t}.$$

両辺の $\log_q$ をとると

$$\log_q |C| \leq (n+t) + \log_q(t!) - t \log_q(n+1) - t \log_q(q-1).$$

したがって

$$\begin{aligned} r &= n - \log_q |C| \\ &\geq t \log_q(n+1) + t \log_q(q-1) - t - \log_q(t!) \\ &= t \log_q(n+1) + O(1) \\ &= t \log_q n + t \log_q \frac{n+1}{n} + O(1) \\ &= t \log_q n + O(1). \end{aligned}$$

□

今度は冗長度の上界について述べる。

定理 (冗長度の上界⁽³⁾)

正整数 t を固定する。 q と n も正整数ではあるが固定はせず、更に独立していてもよい。その上で、 q 元アルファベット上の長さ n で、最もサイズの大きな t -削除訂正符号の冗長度 r は、

$$r \leq 2t \log_q n + O(1)$$

以下、 $f(n), g(n) > 0$ に対して漸近記法を次のように定める (いずれも t 固定・ q は n の関数を許す設定で $n \rightarrow \infty$ の極限) : $f(n) \sim g(n)$ とは $\lim_{n \rightarrow \infty} f(n)/g(n) = 1$ が成り立つこと (漸近等価) をいう。 $f(n) \lesssim g(n)$ とは $\limsup_{n \rightarrow \infty} f(n)/g(n) \leq 1$, すなわち $f(n) \leq g(n)(1+o(1))$ が成り立つこと (柔らかい上

界)をいう。同様に $f(n) \succsim g(n)$ とは $\liminf_{n \rightarrow \infty} f(n)/g(n) \geq 1$, すなわち $f(n) \geq g(n)(1 - o(1))$ が成り立つこと (柔らかい下界) をいう。

次の補題が有用である。

補題 (3)

q 元アルファベット上の t -削除訂正符号の最大サイズ $A_q(n, t)$ について, $n \rightarrow \infty$ のとき

$$\frac{(t!)^2 q^t}{(q-1)^{2t}} \frac{q^n}{n^{2t}} \lesssim A_q(n, t)$$

補題の証明は後ほど述べるとして, 補題を仮定して上界の証明を与える。

証明.

最大サイズの t -削除訂正符号の冗長度は $r = n - \log_q A_q(n, t)$ である。補題の主張 $A_q(n, t) \lesssim \frac{(t!)^2 q^t}{(q-1)^{2t}} \frac{q^n}{n^{2t}}$ より, ある $\delta_n \rightarrow 0$ を用いて

$$A_q(n, t) \geq (1 - \delta_n) \frac{(t!)^2 q^t}{(q-1)^{2t}} \frac{q^n}{n^{2t}}$$

が十分大きな n で成り立つ。よって

$$\begin{aligned} r &= n - \log_q A_q(n, t) \\ &\leq 2t \log_q n - 2 \log_q(t!) + 2t \log_q(q-1) - t + O(1) \\ &= 2t \log_q n + O(1) \end{aligned}$$

□

補題の証明では次の不等式を用いる。こちらはよく知られた不等式のため, 引用に留める。

定理 (Hoeffding の不等式)

$X_1, \dots, X_m$ を独立な確率変数とし, $a_i \leq X_i \leq b_i$ を満たすとする。任意の $s > 0$ に対して,

$$\begin{aligned} \Pr\left(s \leq \sum_{i=1}^m X_i - E[\sum_{i=1}^m X_i]\right) \\ \leq \exp\left(-\frac{2s^2}{\sum_{i=1}^m (b_i - a_i)^2}\right). \end{aligned} \quad (5)$$

特に両側版として $\Pr(|\sum X_i - E[\sum X_i]| \geq s) \leq 2 \exp(-2s^2 / \sum (b_i - a_i)^2)$ も成り立つ。

補題の証明 (3).

サイズ最大の t -削除訂正符号 C_n^{MAX} は Σ^n を被覆する条件

$$\Sigma^n = \bigcup_{\mathbf{x} \in C_n^{MAX}} \bigcup_{\mathbf{z} \in D^t(\mathbf{x})} I^t(\mathbf{z})$$

を満たす (隙間があれば符号語を追加できるため, 最大性に矛盾する)。

しきい値 $r_1 := \left\lceil \mu_q + \sqrt{\frac{3tn}{2} \log_e n} \right\rceil$ ($\mu_q = 1 + (n-1)(q-1)/q$) を定め,

$$b_{<r_1} := |\{\mathbf{x} \in C_n^{MAX} : \|\mathbf{x}\| < r_1\}|,$$

$$b_{\geq r_1} := |C_n^{MAX}| - b_{<r_1}$$

とおく。

ステップ 1 (被覆不等式). 各 $\mathbf{z} \in D^t(\mathbf{x})$ の長さは $n-t$ であるから, 2.2 節の定理より $|I^t(\mathbf{z})| = \sum_{j=0}^t \binom{n}{j} (q-1)^j$ は $\mathbf{x}$ によらず一定である。重複を許したカウントと 2.3 節の補題の上界 $|D^t(\mathbf{x})| \leq (\|\mathbf{x}\| + t - 1)^t$ を適用すると,

$$\begin{aligned} q^n &\leq \sum_{\mathbf{x} \in C_n^{MAX}} \sum_{\mathbf{z} \in D^t(\mathbf{x})} |I^t(\mathbf{z})| \\ &= \left(\sum_{j=0}^t \binom{n}{j} (q-1)^j \right) \sum_{\mathbf{x} \in C_n^{MAX}} |D^t(\mathbf{x})| \\ &\leq \left(\sum_{j=0}^t \binom{n}{j} (q-1)^j \right) \\ &\quad \times (b_{<r_1} \binom{r_1+t-1}{t} + b_{\geq r_1} \binom{n+t-1}{t}). \end{aligned} \quad (6)$$

ここで $b_{\geq r_1}$ の項には $\|\mathbf{x}\| \leq n$ (長さ n の語のラン数の最大値) を用いた。更に $(q-1)^j \leq (q-1)^t$ ($0 \leq j \leq t$) 及び $\sum_{j=0}^t \binom{n}{j} \leq \binom{n+t}{t}$ より

$$\begin{aligned} q^n &\leq (q-1)^t \binom{n+t}{t} \\ &\quad \times (b_{<r_1} \binom{r_1+t-1}{t} + b_{\geq r_1} \binom{n+t-1}{t}). \end{aligned} \quad (7)$$

ステップ 2 (大きなラン数の語数の評価). 一様ランダムな語 $X = (x_1, \dots, x_n) \in \Sigma^n$ に対し, $R_i := \mathbf{1}[x_i \neq x_{i-1}]$ ($i = 2, \dots, n$) とおくと $\|X\| = 1 + \sum_{i=2}^n R_i$, $E[\|X\|] = \mu_q$ が成立する。 $X_i := R_{i+1} \in [0, 1]$ として Hoeffding の不等式 (5) を $m = n-1$, $s := r_1 - \mu_q > 0$ で適用すると, しきい値の定め方 $r_1 - \mu_q \geq \sqrt{\frac{3tn}{2} \log_e n}$ と $\frac{2(r_1 - \mu_q)^2}{n-1} \geq \frac{3tn \log_e n}{n-1} \geq 3t \log_e n$ より

$$\Pr[\|X\| \geq r_1] \leq \exp\left(-\frac{2(r_1 - \mu_q)^2}{n-1}\right) \leq n^{-3t}. \quad (8)$$

よって $b_{\geq r_1} \leq q^n \cdot n^{-3t}$ 。

ステップ 3 ($b_{<r_1}$ の下界と漸近評価). 式 (7) に (8) を代入し, $\binom{n+t}{t} \leq \frac{(n+t)^t}{t!}$, $\binom{r_1+t-1}{t} \leq \frac{(r_1+t-1)^t}{t!}$, $\binom{n+t-1}{t} \leq \frac{(n+t-1)^t}{t!}$ を用いると,

$$\begin{aligned} q^n &\leq \frac{(q-1)^t (n+t)^t}{t!} \\ &\quad \times \left(\frac{(r_1+t-1)^t}{t!} b_{<r_1} + \frac{q^n (n+t-1)^t}{t! n^{3t}} \right). \end{aligned}$$

$b_{<r_1}$ について整理すると

$$b_{<r_1} \geq \frac{(t!)^2 q^n}{(q-1)^t (n+t)^t (r_1+t-1)^t} - \frac{q^n (n+t-1)^t}{(r_1+t-1)^t n^{3t}}. \quad (9)$$

$n \rightarrow \infty$ のとき $(n+t)^t \sim n^t$, $r_1 \sim \mu_q \sim n(q-1)/q$ より $(r_1+t-1)^t \sim n^t (q-1)^t / q^t$ であるから, n が大きいとき, 式 (9) の右辺

$$\sim \frac{(t!)^2 q^n}{(q-1)^{2t} n^{2t} / q^t} - \frac{q^{n+t}}{(q-1)^t n^{3t}}$$

$$= \frac{(t!)^2 q^{n+t}}{(q-1)^{2t} n^{2t}} \left(1 - \frac{(q-1)^t}{(t!)^2 n^t} \right)$$

に漸近する． n を大きくすれば

$$b_{<r_1} \gtrsim \frac{(t!)^2 q^{n+t}}{(q-1)^{2t} n^{2t}}.$$

$b_{<r_1} \leq |C_n^{MAX}| = A_q(n, t)$ より下界が得られる． $\square$

3. 単一削除訂正符号

3.1 節では VT 符号の諸性質を，3.2 節と 3.3 節ではそのほかの単一削除訂正符号の紹介をそれぞれ述べる．

3.1 Varshamov–Tenengol'ts (VT) 符号

VT 符号は，Varshamov と Tenengol'ts が 1965 年に非対称誤り訂正符号として提案し⁽⁴⁾，Levenshtein が 1966 年に単一削除（挿入）訂正能力を示した符号である⁽³⁾．

— 定義 — VT 符号 —

正整数 n と整数 a ($0 \leq a \leq n$) に対して，

$$\text{VT}_n(a) := \left\{ \mathbf{x} \in \{0, 1\}^n \mid \sum_{i=1}^n i x_i \equiv a \pmod{n+1} \right\}$$

を VT 符号と呼ぶ．

[例 2] $\text{VT}_5(0)$ は条件 $x_1 + 2x_2 + 3x_3 + 4x_4 + 5x_5 \equiv 0 \pmod{6}$ を満たす語の集合であり，サイズは 6 である． $\text{VT}_5(0) = \{00000, 10001, 01010, 11100, 11011, 00111\}$

$n+1$ 個の VT 符号 $\text{VT}_n(0), \text{VT}_n(1), \dots, \text{VT}_n(n)$ は $\{0, 1\}^n$ を分割する． $\{0, 1\}^n$ を分割することから，少なくとも一つの a について $|\text{VT}_n(a)| \geq 2^n/(n+1)$ が成り立つ． $\text{VT}_n(a)$ の正確なサイズは Sloane⁽⁶⁾によって次のように与えられている．証明は省略する．

— 定理 (VT 符号のサイズ, Theorem 2.2⁽⁶⁾) —

ϕ をオイラー関数， μ をメビウス関数， $(d, a) := \gcd(d, a)$ とおく．このとき，

$$|\text{VT}_n(a)| = \frac{1}{2(n+1)} \sum_{\substack{d \mid (n+1) \\ d \text{ 奇数}}} \phi(d) \frac{\mu(d/(d, a))}{\phi(d/(d, a))} 2^{(n+1)/d}. \quad (10)$$

この定理から任意の符号長 n に対して $a = 0$ のときが最大であることが分かる．メビウス関数の性質に着目すればよい．特に $|\text{VT}_n(0)| \geq 2^n/(n+1)$ であり，その冗長度は $n - \log_2 |\text{VT}_n(0)| \leq \log_2(n+1) = \log_2 n + O(1)$ であって，第 2.6 節の冗長度下界と同じ最適オーダーを達成する．

Levenshtein⁽³⁾は， $\text{VT}_n(a)$ に対する単一削除誤りの線形時間復号アルゴリズムを与えた．

— アルゴリズム (VT 符号の単一削除復号⁽³⁾) —

入力：受信語 $\mathbf{y} = y_1 \cdots y_{n-1} \in \{0, 1\}^{n-1}$ ，パラメータ n, a ．

ステップ 1 (前処理)： $S \leftarrow \sum_{i=1}^{n-1} i y_i$ ， $W \leftarrow \sum_{i=1}^{n-1} y_i$ (1 の個数)， $a' \leftarrow (a - S) \bmod (n+1)$ ．

ステップ 2 (ビット判定と走査目標の設定)：

- $a' > W$ ：削除ビット $b \leftarrow 1$ ，目標カウント $k \leftarrow a' - W - 1$ (左から数えた 0 の個数 n_0)．
- $a' \leq W$ ：削除ビット $b \leftarrow 0$ ，目標カウント $k \leftarrow W - a'$ (左から数えた 1 の個数 $|\mathbf{y}| - n_1$)．

ステップ 3 (位置走査)： $\text{cnt} \leftarrow 0$ ， $j \leftarrow 1$ と初期化する． cnt は $y_1, \dots, y_{j-1}$ 中の「 $b = 1$ なら 0， $b = 0$ なら 1」の個数を保持し， $\text{cnt} = k$ となった j が挿入位置である．(i) で終了するまで次の (i) (ii) (iii) を繰り返す：

(i) 挿入判定： $\text{cnt} = k$ ならば

$\hat{\mathbf{x}} \leftarrow y_1 \cdots y_{j-1} b y_j \cdots y_{n-1}$ として終了．

(ii) **cnt 更新** ($j \leq n-1$ のとき)：

$b = 1$ なら $\text{cnt} \leftarrow \text{cnt} + (1 - y_j)$ ($y_j = 0$ のとき cnt 増加)，

$b = 0$ なら $\text{cnt} \leftarrow \text{cnt} + y_j$ ($y_j = 1$ のとき cnt 増加)．

(iii) $j \leftarrow j + 1$ ．

出力： $\hat{\mathbf{x}} \in \text{VT}_n(a)$ ． 計算量： $O(n)$ 時間， $O(1)$ 追加空間．

$\text{VT}_n(a)$ は単一削除完全符号であるため (後述の 5.1 節)，走査目標に対応する位置がちょうど一つ存在し，アルゴリズムは必ず停止する．

モデルと記号．送信符号語 $\mathbf{x} = x_1 \cdots x_n \in \text{VT}_n(a)$ の位置 l ($1 \leq l \leq n$) のビット x_l が削除されて，受信語 $\mathbf{y} = y_1 \cdots y_{n-1} \in \{0, 1\}^{n-1}$ を得たとする．2.1 節の削除の定義から，

$$y_i = \begin{cases} x_i & (1 \leq i \leq l-1), \\ x_{i+1} & (l \leq i \leq n-1) \end{cases} \quad (11)$$

が成り立つ．受信語 $\mathbf{y}$ のみから計算できる量として，

$$S := \sum_{i=1}^{n-1} i y_i, \quad |\mathbf{y}| := \sum_{i=1}^{n-1} y_i, \quad a' := (a - S) \bmod (n+1) \quad (12)$$

を定める． $|\mathbf{y}|$ は受信語の 1 の個数 (Hamming 重み) であり，Levenshtein⁽³⁾の記法に倣う． a' をシンδροームと呼ぶ．

また，削除ビットの種類に応じた補助量として， $x_l = 1$ が削除された場合の左側の 0 の個数を n_0 ， $x_l = 0$ が削除された場合の右側の 1 の個数を n_1 と定義する：

$$n_0 := |\{i \mid i < l, x_i = 0\}|, \quad n_1 := |\{i \mid i > l, x_i = 1\}|.$$

削除ビットの判定 (Levenshtein⁽³⁾，定理 1 の証明)．

命題 (a' による削除ビット・削除位置の決定)

$$x_l = 1 \iff a' = |\mathbf{y}| + 1 + n_0, \quad (13)$$

$$x_l = 0 \iff a' = n_1 \leq |\mathbf{y}|. \quad (14)$$

したがって a' と $|\mathbf{y}|$ の大小比較のみで削除ビットが決まり、

$$a' > |\mathbf{y}| \Rightarrow x_l = 1, \quad n_0 = a' - |\mathbf{y}| - 1;$$

$$a' \leq |\mathbf{y}| \Rightarrow x_l = 0, \quad n_1 = a'.$$

n_0 (または n_1) が定まれば、削除位置 l は $\mathbf{y}$ を左から走査して $O(n)$ で復元できる: $x_l = 1$ の場合は $\mathbf{y}$ の左から n_0 番めの 0 の直後、 $x_l = 0$ の場合は $\mathbf{y}$ の左から $(|\mathbf{y}| - n_1)$ 番めの 1 の直後 ($n_1 = |\mathbf{y}|$ のとき先頭) に x_l を挿入する。

導出. 式 (11) を用いて $\sum_{i=1}^n ix_i$ を展開すると、

$$\sum_{i=1}^n ix_i = S + lx_l + \sum_{j=l+1}^n x_j. \quad (15)$$

$\mathbf{x} \in \text{VT}_n(a)$ より $\sum ix_i \equiv a \pmod{n+1}$ なので、

$$a' = a - S \equiv lx_l + \sum_{j=l+1}^n x_j \pmod{n+1}. \quad (16)$$

$x_l = 1$ のとき: $n_0 = (l-1) - \sum_{i<l} y_i$ 及び $\sum_{j>l} x_j = |\mathbf{y}| - \sum_{i<l} y_i$ から $lx_l + \sum_{j>l} x_j = l + (|\mathbf{y}| - \sum_{i<l} y_i) = |\mathbf{y}| + 1 + n_0$. $0 \leq n_0 \leq l-1$ ゆえ $1 \leq a' = |\mathbf{y}| + 1 + n_0 \leq n$ となり $m = n+1$ での簡約は不要. $x_l = 0$ のとき: $n_1 = \sum_{j>l} x_j = \sum_{j=l}^{n-1} y_j \leq |\mathbf{y}|$ から $a' = n_1$. 以上より式 (13), (14) が得られ、 $a' > |\mathbf{y}|$ と $a' \leq |\mathbf{y}|$ は排他的なので削除ビットが一意に決まる. $\square$

[例 3] (削除ビットが 1, 位置 5 の削除) $\text{VT}_6(0)$ の符号語 $\mathbf{x} = 110011$ から位置 5 のビット $x_5 = 1$ が削除され、 $\mathbf{y} = 11001$ が受信された.

ステップ 1 (前処理): $S = 1 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 3 \cdot 0 + 4 \cdot 0 + 5 \cdot 1 = 8$, $W = 3$, $a' = (0 - 8) \bmod 7 = 6$.

ステップ 2 (ビット判定): $a' = 6 > W = 3$ なので $b = 1$, $n_0 = 6 - 3 - 1 = 2$, $k = 2$.

ステップ 3 (位置走査) ($\mathbf{y} = 11001$, 0 の個数が $k = 2$ になる位置を探す):

- $j = 1$: (i) $\text{cnt} = 0 \neq 2$. (ii) $y_1 = 1$ (0 でないので cnt 変わらず). (iii) $j \leftarrow 2$.

- $j = 2$: (i) $\text{cnt} = 0 \neq 2$. (ii) $y_2 = 1$ (0 でないので cnt 変わらず). (iii) $j \leftarrow 3$.

- $j = 3$: (i) $\text{cnt} = 0 \neq 2$. (ii) $y_3 = 0$: $\text{cnt} \leftarrow 1$. (iii) $j \leftarrow 4$.

- $j = 4$: (i) $\text{cnt} = 1 \neq 2$. (ii) $y_4 = 0$: $\text{cnt} \leftarrow 2$. (iii) $j \leftarrow 5$.

- $j = 5$: (i) $\text{cnt} = 2 = k$. $\hat{\mathbf{x}} = 110011 = 110011 \in \text{VT}_6(0)$. 終了.

[例 4] (削除ビットが 0, 末尾削除 ($l = 6$)) $\text{VT}_6(0)$ の符号

語 $\mathbf{x} = 110100$ から位置 6 のビット $x_6 = 0$ が削除されて、 $\mathbf{y} = 11010$ が受信された.

ステップ 1 (前処理): $S = 1 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 3 \cdot 0 + 4 \cdot 1 + 5 \cdot 0 = 7$, $W = 3$, $a' = (0 - 7) \bmod 7 = 0$.

ステップ 2 (ビット判定): $a' = 0 \leq W = 3$ なので $b = 0$, $n_1 = 0$, $k = W - a' = 3$.

ステップ 3 (位置走査) ($\mathbf{y} = 11010$, 1 の個数が $k = 3$ になる位置を探す):

- $j = 1$: (i) $\text{cnt} = 0 \neq 3$. (ii) $y_1 = 1$: $\text{cnt} \leftarrow 1$. (iii) $j \leftarrow 2$.

- $j = 2$: (i) $\text{cnt} = 1 \neq 3$. (ii) $y_2 = 1$: $\text{cnt} \leftarrow 2$. (iii) $j \leftarrow 3$.

- $j = 3$: (i) $\text{cnt} = 2 \neq 3$. (ii) $y_3 = 0$ (1 でないので cnt 変わらず). (iii) $j \leftarrow 4$.

- $j = 4$: (i) $\text{cnt} = 2 \neq 3$. (ii) $y_4 = 1$: $\text{cnt} \leftarrow 3$. (iii) $j \leftarrow 5$.

- $j = 5$: (i) $\text{cnt} = 3 = k$. $\hat{\mathbf{x}} = 110100 = 110100 \in \text{VT}_6(0)$. 終了.

2.5 節の等価性定理より $\text{VT}_n(a)$ は単一挿入訂正符号でもある. 対応する復号アルゴリズムも線形時間で構成できる.

アルゴリズム (VT 符号の単一挿入復号⁽³⁾)

入力: 受信語 $\mathbf{y} = y_1 \cdots y_{n+1} \in \{0, 1\}^{n+1}$, パラメータ n, a .

ステップ 1 (前処理): $S' \leftarrow \sum_{i=1}^{n+1} iy_i$, $W' \leftarrow \sum_{i=1}^{n+1} y_i$, $\sigma \leftarrow (S' - W') \bmod (n+1)$, $l \leftarrow 1$.

ステップ 2 (位置走査): (i) で終了するまで次の (i) (ii) (iii) を繰り返す:

(i) 削除判定: $\sigma = a$ ならば

$\hat{\mathbf{x}} \leftarrow y_1 \cdots y_{l-1} y_{l+1} \cdots y_{n+1}$ として終了.

(ii) σ 更新: $\sigma \leftarrow (\sigma + l(y_l - y_{l+1})) \bmod (n+1)$.

(iii) $l \leftarrow l+1$.

出力: $\hat{\mathbf{x}} \in \text{VT}_n(a)$. 計算量: $O(n)$ 時間, $O(1)$ 追加空間.

$\text{VT}_n(a)$ は単一削除完全符号 (5.1 節) であり、等価性定理から任意の $\mathbf{y} \in \{0, 1\}^{n+1}$ に対して挿入位置がちょうど一つ存在する. よってアルゴリズムは必ず停止する.

導出. 位置 l ($1 \leq l \leq n+1$) のビット y_l を除いた語を $\mathbf{z}^{(l)}$ とする ($z_i^{(l)} = y_i$ ($i < l$), $z_i^{(l)} = y_{i+1}$ ($i \geq l$)). $\mathbf{z}^{(l)} \in \text{VT}_n(a)$ の条件 $\sum_{i=1}^n iz_i^{(l)} \equiv a \pmod{n+1}$ を $S', W', P_l := \sum_{j=1}^l y_j$ で書き直すと、

$$\sigma_l := (S' - ly_l - W' + P_l) \bmod (n+1) = a \quad (17)$$

が得られる. $\sigma_1 = (S' - W') \bmod (n+1)$ であり、 $P_{l+1} = P_l + y_{l+1}$ を用いると

$$\sigma_{l+1} = (\sigma_l + l(y_l - y_{l+1})) \bmod (n+1) \quad (18)$$

が成り立つ ($y_{n+2} := 0$). $\text{VT}_n(a)$ は単一削除完全符号である

から, $l \leq n+1$ の範囲で必ず (17) を満たす l が一意に存在する. したがって step (ii) が $l = n+1$ で実行されることはなく, σ を $O(1)$ で更新しながら (17) を満たす l を $O(n)$ で発見できる. $\square$

[例 5] (位置 3 への 0 の挿入の場合) $\text{VT}_6(0)$ ($n=6, a=0, n+1=7$) の符号語 $\mathbf{x} = 110011$ の位置 3 にビット 0 が挿入され, $\mathbf{y} = 1100011$ が受信された.

ステップ 1 (前処理): $S' = 1 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 3 \cdot 0 + 4 \cdot 0 + 5 \cdot 0 + 6 \cdot 1 + 7 \cdot 1 = 16$, $W' = 4$, $\sigma = (16 - 4) \bmod 7 = 5$.

ステップ 2 (位置走査) ($\mathbf{y} = 1100011$, $a = 0$, $l = 1$ から開始):

- $l = 1$: (i) $\sigma = 5 \neq 0$. (ii) $\sigma \leftarrow (5 + 1 \cdot (y_1 - y_2)) \bmod 7 = (5 + 0) \bmod 7 = 5$. (iii) $l \leftarrow 2$.
- $l = 2$: (i) $\sigma = 5 \neq 0$. (ii) $\sigma \leftarrow (5 + 2 \cdot (y_2 - y_3)) \bmod 7 = (5 + 2) \bmod 7 = 0$. (iii) $l \leftarrow 3$.
- $l = 3$: (i) $\sigma = 0 = a$. $\hat{\mathbf{x}} = 110011 = 110011 \in \text{VT}_6(0)$. 終了.

[例 6] (位置 4 への 1 の挿入の場合) $\text{VT}_6(0)$ の符号語 $\mathbf{x} = 110100$ の位置 4 にビット 1 が挿入され, $\mathbf{y} = 1101100$ が受信された.

ステップ 1 (前処理): $S' = 1 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 3 \cdot 0 + 4 \cdot 1 + 5 \cdot 1 + 6 \cdot 0 + 7 \cdot 0 = 12$, $W' = 4$, $\sigma = (12 - 4) \bmod 7 = 1$.

ステップ 2 (位置走査) ($\mathbf{y} = 1101100$, $a = 0$, $l = 1$ から開始):

- $l = 1$: (i) $\sigma = 1 \neq 0$. (ii) $\sigma \leftarrow (1 + 1 \cdot (y_1 - y_2)) \bmod 7 = (1 + 0) \bmod 7 = 1$. (iii) $l \leftarrow 2$.
- $l = 2$: (i) $\sigma = 1 \neq 0$. (ii) $\sigma \leftarrow (1 + 2 \cdot (y_2 - y_3)) \bmod 7 = (1 + 2) \bmod 7 = 3$. (iii) $l \leftarrow 3$.
- $l = 3$: (i) $\sigma = 3 \neq 0$. (ii) $\sigma \leftarrow (3 + 3 \cdot (y_3 - y_4)) \bmod 7 = (3 - 3) \bmod 7 = 0$. (iii) $l \leftarrow 4$.
- $l = 4$: (i) $\sigma = 0 = a$. $\hat{\mathbf{x}} = 110100 = 110100 \in \text{VT}_6(0)$. 終了.

3.2 Levenshtein 符号の一般化と Monotone 符号

Levenshtein は VT 符号をより一般の形に拡張した.

定義 — Levenshtein 符号 —

$m > n$ を満たす整数 m と整数 a に対して,

$$L_a(n; m) := \left\{ \mathbf{x} \in \{0, 1\}^n \mid \sum_{i=1}^n i \cdot x_i \equiv a \pmod{m} \right\}$$

を **Levenshtein 符号** と呼ぶ. $m = n+1$ のとき VT 符号に一致する.

$m > n$ のとき $L_a(n; m)$ は単一削除訂正符号であり, $m \geq 2n$ のとき単一削除・単一置換複合訂正符号となる.

更なる拡張として, 筆者⁽⁷⁾が導入した枠組みの特殊形である **Monotone 符号** を高橋・筆者⁽⁸⁾が詳細に研究した. Monotone

符号は重み系列 $k = (k_1 < k_2 < \dots < k_n)$ を用いて

$$M_{a,m,k}(n) := \left\{ \mathbf{x} \in \{0, 1\}^n \mid \sum_{i=1}^n k_i x_i \equiv a \pmod{m} \right\}$$

と定義される Levenshtein 符号の一般化であり, $m > k_n$ のとき単一削除訂正, $m \geq 2k_n$ のとき単一削除・置換複合訂正符号となる.

更に, Levenshtein の単一削除復号アルゴリズムを Monotone 符号に一般化し, 単一削除誤りの復号を符号長 n の線形時間で行うアルゴリズムを与えた.

3.3 非 2 値単一削除符号: Tenengol'ts 符号

2 元以外のアルファベット (q 元, $q \geq 2$) における単一削除訂正符号として, Tenengol'ts⁽⁹⁾ は以下の符号を提案した.

定義 — Tenengol'ts 符号 —

q 元アルファベット $\{0, 1, \dots, q-1\}$ の語 $\mathbf{x} = x_1 x_2 \dots x_n$ に対して, $i = 1, \dots, n-1$ に対し

$$u_i(\mathbf{x}) := \begin{cases} 1 & (x_i < x_{i+1}), \\ 0 & (x_i \geq x_{i+1}) \end{cases}$$

と定め, $S^*(\mathbf{x}) := \sum_{i=1}^{n-1} i u_i(\mathbf{x})$, $S^{**}(\mathbf{x}) := \sum_{i=1}^n x_i$ とする. 整数 a, b に対して, **Tenengol'ts 符号** を

$$T_{a,b}(n, q) := \left\{ \mathbf{x} \in \{0, 1, \dots, q-1\}^n \mid \begin{aligned} S^*(\mathbf{x}) &\equiv a \pmod{n}, \\ S^{**}(\mathbf{x}) &\equiv b \pmod{q} \end{aligned} \right\}$$

と定義する.

Tenengol'ts 符号は q 元アルファベット上の単一削除訂正符号であり, DNA ストレージへの応用 (4 元アルファベット ATGC) で特に重要である.

4. 多重削除訂正符号

二つ以上の削除を訂正する t 削除符号の構成は非常に難しい. 4.1 節で紹介する Helberg 符号は $t = 1$ のときは VT 符号と一致するように構成されている. 4.2 節と 4.3 節ではほかの代表例をおおざっぱに紹介する.

4.1 Helberg 符号

VT 符号を多重削除訂正に拡張した符号として, Helberg & Ferreira⁽⁵⁾ の Helberg 符号がある.

整数列 $(\lambda_i^{(s)})_{i \in \mathbb{Z}}$ を

$$\lambda_i^{(s)} := \begin{cases} 0 & (i \leq 0), \\ 1 + \sum_{j=1}^s \lambda_{i-j}^{(s)} & (i > 0) \end{cases}$$

で定める。正整数 n, s と整数 a に対して、

$$H_{s,a}(n) := \left\{ \mathbf{x} \in \{0, 1\}^n \mid \sum_{i=1}^n \lambda_i^{(s)} x_i \equiv a \pmod{\lambda_{n+1}^{(s)}} \right\}$$

を **Helberg 符号** と呼ぶ⁽⁵⁾。

数列 $(\lambda_i^{(s)})$ は $i > 0$ において正値かつ狭義単調増加である。 $s = 1$ のとき漸化式を解くと $\lambda_i^{(1)} = i$, $\lambda_{n+1}^{(1)} = n + 1$ となるから、 $H_{1,a}(n) = \text{VT}_n(a)$ が成り立ち、VT 符号は Helberg 符号の $s = 1$ の特殊ケースである。冗長度は $\log_2 \lambda_{n+1}^{(s)}$ ビットとなる。

Helberg は s 削除・挿入訂正能力をコンピュータ実験で確認したが、理論証明は Abdel-Ghaffar ら⁽¹⁰⁾によって与えられた。筆者⁽¹¹⁾はこれらの補題に対する短い証明を与えた。

4.2 2 削除訂正符号 (Gabrys & Sala 2019, Sima et al. 2021)

Gabrys & Sala⁽¹²⁾は、冗長性が $8 \log_2 n + O(\log \log n)$ ビットで 2 削除を訂正できる符号を構成した。

構成のアイデアは、 $\mathbf{y}$ が $\mathbf{x}$ の 2 削除結果であるとき、削除されたのが「0 か 1 か」と「ランの長さ」によって 6 種類のシナリオに分類し、各シナリオへの帰属を検出符号で判定した後、適切な誤り訂正を行うことである。

その後 Sima, Gabrys & Bruck⁽¹³⁾は明示的構成の冗長性を $7 \log_2 n + O(1)$ ビットまで改善した（符号長 $N = n + 7 \lfloor \log_2 n \rfloor + 8$ ）。冗長性の上界は 2.6 節の定理から $t = 2$ のとき $r \leq 4 \log_2 n + O(1)$ である。

4.3 効率的多重削除符号 (Brakensiek, Guruswami, Zbarsky 2018)

定理 (Brakensiek–Guruswami–Zbarsky⁽¹⁴⁾)

任意の固定正整数 k に対して、符号長 n の符号で $O(k^2 \log k) \cdot \log n$ ビットの冗長性により k -削除（及び k -挿入・削除複合）を訂正できる符号が明示的に構成可能である。符号化・復号は時間 $\text{poly}(n)$ で実行できる。

この構成ではハッシュ関数と代数的符号 (Reed-Solomon 符号など) を組み合わせ、部分列を保護する。

4.4 同期文字列と挿入・削除符号 (Haeupler & Shahrasbi 2017)

Haeupler & Shahrasbi⁽¹⁵⁾は同期文字列 (**synchronization string**) という新しい組合せの対象を導入し、Singleton 限界と呼ばれる不等式に漸近する効率的な挿入・削除符号の構成を実現した。通信路容量的な限界とは異なることを注意しておく。

定理 (Haeupler–Shahrasbi⁽¹⁵⁾)

任意の $\varepsilon > 0$ と $0 < \delta < 1$ に対して、符号レート $1 - \delta - \varepsilon$ の効率的な挿入・削除符号が定数サイズのアルファベット上に存在し、符号化・復号はそれぞれ線形時間・2 乗時間で実行できる。

挿入・削除符号の Singleton 限界（レート $1 - \delta$ ）への漸近的到達である。

5. 削除誤りの広がり

削除誤りの研究は、古典的な一次元の語に対する単純な削除・挿入を超えて、様々な方向に広がっている。本節では、削除完全符号の概念を起点として、隣接 2 シンボルを対として削除する BAD 誤りモデルへの拡張、二次元配列への拡張、そして証明支援系による形式化への広がりを概観する。

5.1 完全削除符号

完全削除符号の概念は Levenshtein⁽¹⁶⁾によって提唱された。具体的には、**完全削除符号**とは、任意の受信語 $\mathbf{y} \in \Sigma^{n-1}$ がある符号語 $\mathbf{c}$ の削除球に一意に属する、すなわち $\bigsqcup_{\mathbf{c} \in C} D^1(\mathbf{c}) = \Sigma^{n-1}$ となる $t = 1$ 削除訂正符号 C のことである。

Levenshtein⁽³⁾は、任意の正整数 n 及び任意の $a \in \{0, 1, \dots, n\}$ に対して、VT 符号 $\text{VT}_n(a)$ が削除完全符号であることを示した。すなわち、どんな符号長 n とどんな a の選び方に対しても、 $\text{VT}_n(a)$ の削除球は $\{0, 1\}^{n-1}$ を過不足なく 1 回ずつ覆う。

5.2 平衡隣接削除 (BAD) 符号

平衡隣接削除 (Balanced Adjacent Deletion, BAD) とは、01 または 10 という隣接する異なる 2 シンボルの対を削除する誤りモデルである⁽¹⁷⁾。

[例 7] $\mathbf{x} = 00101001$ に単一 BAD 誤りが生じると、例えば (2, 3) 番めの 01 が削除されて 001001、あるいは (3, 4) 番めの 10 が削除されて 001001 となる

筆者⁽¹⁷⁾は単一 BAD 誤りの完全符号 $C_{n,a}$ を構成した：

$$C_{n,a} := \{\pi(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in A_{n,a}\},$$

$$A_{n,a} := \{\mathbf{x} \in \{0, 1\}^n \setminus \{0^n, 1^n\} \mid \ell(\mathbf{x}) \equiv a \pmod{n}\},$$

ここで $\ell(\mathbf{x}) := \#\{(i, j) \mid i < j, x_i > x_j\}$ (転倒数), π は

$\pi(\mathbf{x}) = x_1 x_n x_2 x_{n-1} \cdots$ なる置換である。これは Levenshtein の VT 符号研究に触発された、BAD 誤りに対する新たな完全符号構成である。

森・筆者⁽¹⁸⁾はこの符号の大きさに関する数論的公式を導き、漸近的に最適 (VT 符号と同様の意味での漸近最適性) であることを示した。

高橋・筆者⁽⁸⁾は $C_{n,a}$ の母体である $A_{n,a}$ を一般化した **Azin** 符号 $A_{a,m}(n)$ に対して、単一 BAD 誤りまたは単一 BAS (平衡隣接置換) 誤りが生じた際の復号を線形時間で行うアルゴリズムを与えた。このアルゴリズムは第 3.2 節の Monotone 符号の復号アルゴリズムと統一的な視点でまとめられ、Python 実装が GitHub 上で公開されている⁽⁸⁾。

5.3 配列設計情報の多重誤り訂正

筆者⁽¹⁹⁾は、ISITA 2020 において、QR コード型の二次元配列 (配列設計情報) に対する行多重削除・列多重削除訂正符号を、消失訂正符号からの変換法によって構成した。その後の拡張⁽²⁰⁾では、行・列単位の置換誤り及び消失誤りも扱えるようになった。構成にはテンソル積符号 (tensor product code: 二つの線形符号 C_1, C_2 から各行が C_1 、各列が C_2 の符号語となる行列全体として定義される積符号) と誤り位置指定器 (error locator) が用いられ、削除誤りを消失誤りに変換してから線形符号の消失訂正を行う。

Bitar, Smagloy, Welter, Wachter-Zeh, Yaakobi⁽²¹⁾は、同じく ISITA 2020 において、二次元バイナリ配列に対するクリス・クロス削除 (criss-cross deletion) モデルを提案した。このモデルでは、行全体と列全体が必ず同時に削除される誤りを扱っている。各行及び各列に一次元の削除訂正符号 (VT 型符号など) を適用した積符号的な構成により、クリス・クロス削除を訂正できる符号族が与えられた。筆者⁽¹⁹⁾が消失訂正符号からの変換により行・列削除を扱うのに対し、クリス・クロスモデルは各行・列への一次元削除符号の適用という積符号的な構成を特徴とする。

5.4 削除符号の形式化

削除誤り訂正符号の定理を数学的に厳密に保証する試みとして、証明支援系 (proof assistant) による形式検証がある。Kondo⁽²²⁾は ISITA 2020 において、削除誤り訂正符号の性質を証明支援系 **Lean** を用いて形式化する取り組みを報告した。形式検証は、人間が記述した数学的証明をコンピュータが機械的に検証することで、証明の正確性を保証する手法であり、符号理論の複雑な定理への適用は、この分野の信頼性確保に向けた新たな方向性を示している。

6. 量子削除誤り訂正符号

本節の基礎事項・用語・記法については筆者の解説⁽²³⁾も参照されたい。

6.1 量子状態と量子削除誤りの定義

量子系と量子状態。

量子系 (quantum system) とは、量子力学の法則に従う物理系のことである。代表例として、光 (光子の偏光)、電子スピン、超伝導量子回路 (基底状態と励起状態)、イオントラップ中のイオンの電子状態などが挙げられる⁽²³⁾。これらの系は古典ビット (0 か 1 の確定値) と異なり、重ね合わせ (superposition) や量子もつれ (entanglement) を呈する。量子系の状態は、以下で定義する密度行列によって数学的に記述される。

量子ビットと状態空間。

1 個の量子ビット (qubit) の状態空間は二次元複素ベクトル空間 $\mathbb{C}^2$ であり、標準基底を $|0\rangle := (1, 0)^\top$, $|1\rangle := (0, 1)^\top$ と定める。テンソル積 (tensor product) $|u\rangle \otimes |v\rangle$ は、ベクトル $|u\rangle \in \mathbb{C}^m$ と $|v\rangle \in \mathbb{C}^n$ の対に対して $|u\rangle \otimes |v\rangle \in \mathbb{C}^{mn}$ を与える双線形写像であり、行列 A, B に対しては $(A \otimes B)(|u\rangle \otimes |v\rangle) := (A|u\rangle) \otimes (B|v\rangle)$ で定める (Kronecker 積)。 n 量子系の状態空間はテンソル積 $\mathbb{C}^2 \otimes \cdots \otimes \mathbb{C}^2 \cong \mathbb{C}^{2^n}$ であり、標準基底は $|\mathbf{x}\rangle := |x_1\rangle \otimes \cdots \otimes |x_n\rangle$ ($\mathbf{x} = x_1 \cdots x_n \in \{0, 1\}^n$) で与えられる。列ベクトル $|\psi\rangle \in \mathbb{C}^{2^n}$ をケットベクトル (ket) と呼ぶ。これに対し、 $|\psi\rangle$ の転置共役 (エルミート共役)

$$\langle\psi| := |\psi\rangle^\dagger \quad (19)$$

をブラベクトル (bra) と呼ぶ (行ベクトル)。すなわち $\langle\psi|$ は $|\psi\rangle$ の各成分を複素共役に取り転置したものである。

トレースと半正定値。

d 次複素正方行列 M のトレース (trace) を $\text{Tr}(M) := \sum_{i=1}^d M_{ii}$ (対角成分の和) と定める。行列 M が半正定値 (positive semidefinite, $M \geq 0$) であるとは、任意の列ベクトル $\mathbf{v} \in \mathbb{C}^d$ に対して $\mathbf{v}^\dagger M \mathbf{v} \geq 0$ が成り立つことをいい、 M の固有値が全て非負であることと同値である。

—— 定義 —— 密度行列・純粋状態・混合状態 ——

n 量子系の密度行列 (density matrix) とは、半正定値かつ $\text{Tr}(\rho) = 1$ を満たす 2^n 次複素正方行列 ρ である。密度行列全体の集合を $S(\mathbb{C}^{2^n})$ と表す。

単位ベクトル $|\psi\rangle \in \mathbb{C}^{2^n}$ ($\| |\psi\rangle \| = 1$) に対して $\rho = |\psi\rangle \langle\psi|$ (ランク 1 行列) と書けるとき、 ρ を純粋状態 (pure state) と呼ぶ。一般の密度行列 (混合状態, mixed state) は純粋状態の確率混合 $\rho = \sum_j p_j |\psi_j\rangle \langle\psi_j|$ ($p_j > 0$, $\sum_j p_j = 1$) で表される。

本稿では、密度行列 ρ が純粋状態 $\rho = |\psi\rangle \langle\psi|$ である場合、ケットベクトル $|\psi\rangle$ そのもので状態を表すことがある (密度行列 $|\psi\rangle \langle\psi|$ との同一視)。密度行列とケットベクトルの両方の記法が混在するが、ケット表記が許されるのは純粋状態の場合のみであり、混合状態は必ず密度行列で記述される。

$\rho \in S(\mathbb{C}^{2^n})$ の第 i 量子ビットに関する部分トレース (partial trace) を

$$\text{Tr}_i(\rho) := \sum_{b=0}^1 (I^{\otimes(i-1)} \otimes \langle b| \otimes I^{\otimes(n-i)}) \times \rho (I^{\otimes(i-1)} \otimes |b\rangle \otimes I^{\otimes(n-i)}) \quad (20)$$

と定める (I は 2×2 単位行列). これは物理的には第 i 量子ビットに関する「周辺化」 $\text{Tr}_i : S(\mathbb{C}^{2^n}) \rightarrow S(\mathbb{C}^{2^{n-1}})$ として知られる.

$i \in \{1, \dots, n\}$ に対して, i 番めの量子削除誤りを

$$D_i(\rho) := \text{Tr}_i(\rho) \quad (\rho \in S(\mathbb{C}^{2^n}))$$

で定義する⁽²³⁾. 削除位置の集合 $P = \{i_1 < i_2 < \dots < i_t\} \subseteq \{1, \dots, n\}$ に対して, t -量子削除誤り D_P を部分系 P 全体のトレースアウト (部分トレース) として定義する:

$$D_P(\rho) := \text{Tr}_{i_1} \circ \dots \circ \text{Tr}_{i_t}(\rho).$$

異なる量子系への部分トレースは順序によらず同じ結果を与えるため, D_P は P のみで定まる.

古典の削除誤り (x_i を除去して $x_1 \dots x_{i-1} x_{i+1} \dots x_n$ を得る) と対応するように, 量子削除誤りは i 番めの量子系をトレースアウトし, 残りの $(n-1)$ 量子系の状態を返す写像である.

純粋状態 $\rho = |\psi\rangle\langle\psi|$ に量子削除誤りが生じると, 混合状態 (純粋でない密度行列) に変化することがある. このため, 符号語 (符号器の出力) はケットベクトル $|\psi\rangle$ で記述できるが, 削除誤り後の状態や復号操作は密度行列による記述が必要となる.

本稿では, 量子削除符号のパラメータを $[[n, M, t]]$ で表す: n は符号長 (物理量子ビット数), M は論理次元 (符号化する量子情報の次元, $M \times M$ 密度行列で情報を担う), t は削除誤り訂正数である.

$[[n, M, t]]$ 量子削除符号とは, 符号化 Enc と復号 Dec の対であって任意の t -量子削除誤り D_P ($|P| = t$, $P \subseteq \{1, \dots, n\}$ は削除位置の集合) と任意の密度行列 σ に対して

$$\text{Dec}(D_P(\text{Enc}(\sigma))) = \sigma$$

が成り立つことである.

6.2 NH 条件と量子削除符号の一般構成

量子削除誤り訂正符号の最初の研究は中山・筆者⁽²⁴⁾によって行われた (IEICE Commun. Express, 2019). これは量子削除誤り訂正の可能性を初めて示した歴史的に重要な論文である. 続く論文⁽²⁵⁾において, 中山・筆者は量子単一削除訂正符号の一般的な構成法を与え, その符号が訂正能力をもつための十分条件を提案した. この条件は Shibayama などから NH 条件と呼ばれている.

$A, B \subseteq \{0, 1\}^n$ を $A \neq \emptyset$, $B \neq \emptyset$, $A \cap B = \emptyset$ を満たす集合とする. 符号語

$$|0\rangle_A := \frac{1}{\sqrt{|A|}} \sum_{\mathbf{x} \in A} |\mathbf{x}\rangle, \quad |1\rangle_B := \frac{1}{\sqrt{|B|}} \sum_{\mathbf{y} \in B} |\mathbf{y}\rangle$$

を定義し, $\text{Enc}_{A,B}(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) := \alpha|0\rangle_A + \beta|1\rangle_B$ で符号器を定める.

以下の 3 条件 (NH 条件) が成り立つならば, $\text{Enc}_{A,B}$ は単一量子削除訂正符号の符号器である (十分条件):

まず, $\Delta_{i,b}^-(A) := \{\mathbf{x}_{-i} \mid \mathbf{x} \in A, x_i = b\}$ ($\mathbf{x}_{-i} := x_1 \dots x_{i-1} x_{i+1} \dots x_n$) を (i, b) -削除集合と呼ぶ. 更に, 空でない $I \subseteq [n]$ と $b \in \{0, 1\}$ に対して

$$A_{I,b} := \left(\bigcap_{i \in I} \Delta_{i,b}^-(A) \right) \cap \left(\bigcap_{j \in [n] \setminus I} \Delta_{j,b}^-(A)^c \right),$$

$B_{I,b}$ も同様 ($\Delta_{j,b}^-(A)^c := \{0, 1\}^{n-1} \setminus \Delta_{j,b}^-(A)$) と定める.

(C1) 比率条件: 任意の空でない $I \subseteq [n]$ と $b \in \{0, 1\}$ に対して $|A| |B_{I,b}| = |B| |A_{I,b}|$.

(C2) 外部距離条件: 任意の $i_1, i_2 \in [n]$ と $b_1, b_2 \in \{0, 1\}$ に対して $|\Delta_{i_1,b_1}^-(A) \cap \Delta_{i_2,b_2}^-(B)| = 0$.

(C3) 内部距離条件: 任意の $i_1, i_2 \in [n]$ に対して $|\Delta_{i_1,0}^-(A) \cap \Delta_{i_2,1}^-(A)| = |\Delta_{i_1,0}^-(B) \cap \Delta_{i_2,1}^-(B)| = 0$.

この定理により, 量子削除符号の設計問題が古典的な集合 A, B の組合せの問題に帰着される⁽²³⁾.

筆者・中山⁽²⁶⁾は長さ $n = 4$ の具体的な量子単一削除訂正符号を与えた:

$$A = \{0000, 1111\},$$

$$B = \{0011, 0101, 0110, 1001, 1010, 1100\}.$$

この A, B が NH 条件を満たすことは直接確認できる. 任意の $i \in [4]$ に対して $\Delta_{i,0}^-(A) = \{000\}$, $\Delta_{i,1}^-(A) = \{111\}$, $\Delta_{i,0}^-(B) = \{011, 101, 110\}$, $\Delta_{i,1}^-(B) = \{001, 010, 100\}$ が共通であるため, $A_{[4],0} = \{000\}$, $A_{[4],1} = \{111\}$, $B_{[4],0} = \{011, 101, 110\}$, $B_{[4],1} = \{001, 010, 100\}$ となり, $I \subsetneq [4]$ のときは $A_{I,b} = B_{I,b} = \emptyset$. (C1) は $I = [4]$ のとき $2 \times 3 = 6 \times 1$ で, $I \subsetneq [4]$ のとき $0 = 0$ で成立する. (C2) は $\{000\}$, $\{111\}$ と $\Delta_{i,b}^-(B)$ の交差が全て空であることから, (C3) は $\Delta_{i,0}^-(A) = \{000\}$ と $\Delta_{j,1}^-(A) = \{111\}$ が交わらないことから, それぞれ成立する. ここから作られる符号を 4 量子ビット符号と本稿では呼ぶ. 具体的には次に符号化される.

$$|0\rangle_A = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0000\rangle + |1111\rangle),$$

$$|1\rangle_B = \frac{1}{\sqrt{6}}(|0011\rangle + |0101\rangle + |0110\rangle$$

$$+ |1001\rangle + |1010\rangle + |1100\rangle).$$

6.3 最短量子単一削除訂正符号

— 定理 (筆者・中山⁽²³⁾, ⁽²⁶⁾) —

$[[n, 2, 1]]$ 量子削除符号の最小符号長は $n = 4$ である. すなわち 4 量子ビット符号 $[[4, 2, 1]]$ は最小符号長の符号である.

6.4 置換不変量子符号と多重削除訂正

置換不変量子符号 (Permutation-Invariant Quantum Codes, PIQC) は, n 個の粒子の任意の置換に対して不変な符号語で構成される量子符号である⁽²⁷⁾.

柴山・筆者⁽²⁸⁾は PIQC の枠組みを用いて, 多重量子削除誤りを訂正できる量子符号の例を与えた.

— 定理 (柴山・筆者⁽²⁸⁾) —

$X, Y \subseteq \{0, 1, \dots, N\}$ ($X \cap Y = \emptyset$) と写像 $f: X \cup Y \rightarrow \mathbb{C}$ が以下の条件 (D1) (D2) (D3) を満たすとき, 符号 $Q_{X,Y}^f$ は $[[N, 2, t]]$ 量子削除符号である:

$$(D1) \quad \sum_{w \in X} |f(w)|^2 \binom{N}{w} = \sum_{w \in Y} |f(w)|^2 \binom{N}{w} = 1.$$

$$(D2) \quad \text{任意の } 0 \leq k \leq t \text{ に対して}$$

$$\begin{aligned} \sum_{w \in X} |f(w)|^2 \binom{N-t}{w-k} \\ = \sum_{w \in Y} |f(w)|^2 \binom{N-t}{w-k} \neq 0. \end{aligned}$$

$$(D3) \quad \text{任意の } w_1, w_2 \in X \cup Y \text{ } (w_1 \neq w_2) \text{ に対して} \\ |w_1 - w_2| > t.$$

Ouyang⁽²⁷⁾や Aydin ら⁽²⁹⁾も PIQC の枠組みで量子削除符号の成果を挙げている. 松本・筆者⁽³⁰⁾は情報理論のタイプ理論により量子削除訂正符号を Ouyang と同時期に独立に構成している. その符号は本質的に PIQC と同等のものである.

6.5 量子 RS 符号からの多重削除訂正符号

筆者⁽³¹⁾は量子 Reed-Solomon (RS) 符号を基礎に用いた多重量子削除訂正符号の新しい構成法を与えた.

主なアイデアは, 次の二つである.

- (1) 交互サンドイッチ写像 (alternating sandwich mapping): 量子 RS 符号語を状態にもつ隣り合う量子系の間に, 古典の長さ $2t$ のビット列 $0^t 1^t$ を挟みこむことで, 削除誤りの位置を特定する.
- (2) 2^M 準位の量子状態の量子ビット化: 量子 RS 符号語の各量子系の状態が 2^M 準位であるとき, M 量子ビットに置き換える.

この構成の利点は:

- t 個の削除誤りを t -消失誤りとして訂正できる.
- 固定 t のもとで任意の符号レートが実現可能 (符号長 N ,

次元 2^K を柔軟に設定できる).

- 受信量子系の光子数を計測する光子カウンタが不要 (従来の多くの量子削除符号は必要).

ただし, この方法では相対削除誤り訂正可能数 (訂正可能削除誤り数/符号長) は小さい. 相対削除誤り訂正可能数を上げられるか, 今後の展開が待たれる.

6.6 量子挿入・削除訂正能力の等価性

古典では, t -削除訂正符号は t -挿入訂正符号でもあることが Levenshtein⁽³⁾によって示されている (2.5 節).

量子版において, 世界で最初の量子挿入誤り訂正符号の例は筆者⁽³²⁾によって与えられた: 第 6.3 節の長さ 4 の量子削除訂正符号の復号器を変えることで, 量子単一挿入誤りが訂正可能であることを示した.

なお, Nakamura & Nozaki⁽³³⁾は量子符号の削除と挿入の等価性が成り立たない可能性を示唆する結果を得ている. 特に, 量子 t -削除符号は量子 t -挿入符号である可能性が見込めるが, 量子 t -挿入符号は量子 t -削除符号ではないかもしれない. 更に, Nakamura & Nozaki⁽³³⁾は量子インデル距離を提案し, その正当性を論じた. 量子 t -挿入訂正符号 (t 個の量子挿入誤りを訂正できる符号; 古典の定義の量子版) が t -削除訂正符号であるとは限らないことを示唆する例が構成され, 古典との非対称性が期待されている. 柴山・筆者は (C1), (C2), (C3) の類似条件で量子挿入符号の構成方法を与えている.⁽³⁴⁾

7. ま と め

本稿では, 削除誤りと挿入誤りを訂正するための符号を, 古典符号理論と量子符号理論の両面から概説した.

古典の削除誤り訂正符号においては, t -削除訂正と t -挿入訂正が同値であり, 冗長度の最適オーダーは $\Theta(\log n)$ であることが基本的な性質として知られている. 単一削除では, VT 符号が冗長度 $\log_2 n + O(1)$ で最適オーダーを達成し, 多元アルファベット・置換複合誤りへの拡張も研究されている. 多重削除については, 符号の明示的構成と冗長度下界の間にギャップが存在しており, また DNA ストレージや二次元配列など多様な応用へ向けた符号設計の研究が広がっている.

量子削除誤り訂正符号については, NH 条件のもとで量子単一削除訂正符号を組合せ的に設計できることが示され, 最短の例として 4 量子ビット符号が構成されている. 多重削除への拡張や量子インデル距離の理論整備など, 量子削除符号の研究は現在も進行中である.

削除誤り訂正符号は, 1960 年代の VT 符号から現在の量子削除符号まで豊かな展開を見せており, 本稿がこの分野への入門として役立てば幸いである.

文 献

- (1) Y.M. Chee, H.M. Kiah, A. Vardy, V.K. Vu, and E. Yaakobi, "Coding for racetrack memories," Proc.

- IEEE ISIT, pp.2553–2557, Aachen, Germany, June 2017.
- (2) M. Mitzenmacher, “A survey of results for deletion channels and related synchronization channels,” *Probab. Surveys*, vol.6, pp.1–33, 2009.
 - (3) V.I. Levenshtein, “Binary codes capable of correcting deletions, insertions, and reversals,” *Soviet Physics Doklady*, vol.10, no.8, pp.707–710, 1966.
 - (4) R.R. Varshamov and G.M. Tenengol’ts, “Codes which correct asymmetric errors,” *Avtomatika i Telemekhanika*, vol.26, no.2, pp.288–292, 1965 (in Russian; translated in *Automat. Remote Control*, vol.26, 1965).
 - (5) A.S.J. Helberg and H.C. Ferreira, “On multiple insertion/deletion correcting codes,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol.48, no.1, pp.305–308, Jan. 2002.
 - (6) N.J.A. Sloane, “On single-deletion-correcting codes,” in *Codes and Designs* (Ohio State Univ. Math. Res. Inst. Publ. 10), K.T. Arasu and A. Seress, Eds., pp.273–291, De Gruyter, Berlin, 2002.
 - (7) M. Hagiwara, “On ordered syndromes for multi insertion/deletion error-correcting codes,” *Proc. IEEE ISIT*, pp.625–629, Barcelona, Spain, July 2016.
 - (8) H. Takahashi and M. Hagiwara, “Decoding algorithms of monotone codes and azinv codes and their unified view,” *Des. Codes Cryptogr.*, vol.90, pp.2893–2922, 2022.
 - (9) G.M. Tenengol’ts, “Nonbinary codes, correcting single deletion or insertion,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol.30, no.5, pp.766–769, Sept. 1984.
 - (10) K.A.S. Abdel-Ghaffar, F. Paluncic, H.C. Ferreira, and W.A. Clarke, “On Helberg’s generalization of the Levenshtein code for multiple deletion/insertion error correction,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol.58, no.3, pp.1804–1808, March 2012.
 - (11) M. Hagiwara, “A short proof for the multideletion error correction property of Helberg codes,” *IEICE Commun. Express*, vol.5, no.2, pp.49–51, Feb. 2016. DOI: 10.1587/comex.2015XBL0182
 - (12) R. Gabrys and F. Sala, “Codes correcting two deletions,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol.65, no.2, pp.965–977, Feb. 2019.
 - (13) J. Sima, R. Gabrys, and J. Bruck, “Optimal two-deletion correcting codes,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol.67, no.6, pp.3375–3391, June 2021.
 - (14) J. Brakensiek, V. Guruswami, and S. Zbarsky, “Efficient low-redundancy codes for correcting multiple deletions,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol.64, no.5, pp.3403–3410, May 2018.
 - (15) B. Haeupler and A. Shahrabi, “Synchronization strings: Codes for insertions and deletions approaching the Singleton bound,” in *Proc. 49th ACM STOC*, pp.33–46, Montreal, Canada, June 2017.
 - (16) V.I. Levenshtein, “On perfect codes in deletion metric,” *Problems of Information Transmission*, vol.2, no.4, pp.43–44, 1966.
 - (17) M. Hagiwara, “Perfect codes for single balanced adjacent deletions,” *Proc. IEEE ISIT*, pp.1938–1942, Aachen, Germany, June 2017.
 - (18) T. Mori and M. Hagiwara, “A number theoretic formula and asymptotic optimality of cardinalities of BAD correcting codes,” *Discrete Math.*, vol.343, no.6, 111852, June 2020.
 - (19) M. Hagiwara, “Conversion method from erasure codes to multi-deletion error-correcting codes for information in array design,” *Proc. ISITA 2020*, pp.274–278, Kapolei, Hawai’i, USA, Oct. 2020.
 - (20) M. Hagiwara, “Multi deletion/substitution/erasure error-correcting codes for information in array design,” *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E106-A, no.3, pp.368–376, March 2023.
 - (21) R. Bitar, I. Smagloy, L. Welter, A. Wachter-Zeh, and E. Yaakobi, “Criss-cross deletion-correcting codes,” *Proc. ISITA 2020*, pp.304–308, Kapolei, Hawai’i, USA, Oct. 2020.
 - (22) T. Kondo et al., “Formal verification of deletion error-correcting codes using Lean,” *Proc. ISITA 2020*, pp.597–601, Kapolei, Hawai’i, USA, Oct. 2020.
 - (23) M. Hagiwara, “Introduction to quantum deletion error-correcting codes,” *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E108-A, no.3, pp.363–375, March 2025.
 - (24) A. Nakayama and M. Hagiwara, “First study of quantum deletion error-correcting codes,” *IEICE Commun. Express*, vol.8, no.5, pp.148–151, 2019.
 - (25) A. Nakayama and M. Hagiwara, “Single quantum deletion error-correcting codes,” *Proc. ISITA 2020*, pp.329–333, Kapolei, Hawai’i, USA, Oct. 2020.
 - (26) M. Hagiwara and A. Nakayama, “A four-qubits code that is a quantum deletion error-correcting code with the optimal length,” *Proc. IEEE ISIT*, pp.1876–1881, Los Angeles, USA, June 2020.
 - (27) Y. Ouyang, “Permutation-invariant quantum codes,” *Phys. Rev. A*, vol.90, no.6, 062317, 2014.
 - (28) T. Shibayama and M. Hagiwara, “Permutation-invariant quantum codes for deletion errors,” *Proc. IEEE ISIT*, pp.1493–1498, Melbourne, Australia, July 2021.
 - (29) N. Aydin, T. Herr, and L. Pereira, “A family of permutationally invariant quantum codes,” *Quantum*, vol.8, p.1309, 2024.
 - (30) R. Matsumoto and M. Hagiwara, “Constructions of l -adic t -deletion-correcting quantum codes,” *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E105-A, no.3, pp.571–574, March 2022.
 - (31) M. Hagiwara, “Quantum multi deletion codes derived from quantum Reed-Solomon codes,” *Proc. IEEE ISIT*, Ann Arbor, USA, June 2025.
 - (32) M. Hagiwara, “First examples of quantum insertion error-correcting codes,” *IEICE Commun. Express*, vol.9, 2020XBL0191, 2020. DOI: 10.1587/comex.2020XBL0191
 - (33) K. Nakamura and T. Nozaki, “Insertion correcting capability for quantum deletion-correcting codes,” *arXiv:2602.20635v1 [cs.IT]*, Feb. 2026.
 - (34) T. Shibayama and M. Hagiwara, “Equivalence of quantum single insertion and single deletion error-correctabilities, and construction of codes and decoders,” *Proc. IEEE ISIT*, pp.2957–2962, Espoo, Finland, June 2022.

(IT 研究会提案, 2026 年 6 月 5 日受付,
2026 年 6 月 27 日再受付)



萩原 学 (正員)

1997 年千葉大学理学部数学科卒業，2002 年東京大学大学院数理科学研究科博士課程修了．東京大学生産技術研究所 博士研究員，産業技術総合研究所 情報セキュリティ研究センター 研究員及び主任研究員を経て，2013 年千葉大学大学院理学院准教授に就任．2020 年より現職．専門は符号理論．電子情報通信学会において国際会議の実行委員長などを歴任し，次期東京支部長に就任．符号理論及び量子誤り訂正に関する研究では，2025 年に「Double-Stack Erasure-Filled Channel and Level-By-Level Error Correction」により第 81 回（令和 6 年度）論文賞（内川浩典氏との共同受賞），更に「Introduction to Quantum Deletion Error-Correcting Codes」により第 7 回（令和 6 年度）最優秀論文賞を受賞．また，2021 年には The four qubits deletion code is the first quantum insertion code が ComEX Top Downloaded Letter Award を受賞，2020 年にはキオクシア奨励研究 優秀研究賞，そして The first quantum error-correcting code for single deletion errors により ComEX Top Downloaded Letter Award を受賞するなど，量子削除誤り訂正コードの分野で成果を挙げている．学内におけるクラフトビールの教育・研究・地域連携を推進する「千葉大ビールプロジェクト CURAFT」を立ち上げ，千葉大学リサーチブルワリー（CURB）の醸造責任者を務める．研究で生み出したレシピは各所で製品化され，インターナショナル・ビアカップ（IBC）2023 では緑茶ビールで，IBC2025 ではコーヒービール（ケルシュベース）で金賞及びカテゴリーチャンピオンを受賞．現在は千葉大学生協の理事長も務め，大学コミュニティの活性化と学生生活の向上に多角的に尽力している．

巨大クレーンの自動振れ止め制御を可能にする音波に基づく吊り荷位置推定システム

Sway Angle Estimation Systems for Anti-Sway Control of Huge Crane Based on Sound Waves

中本昌由 Masayoshi NAKAMOTO

アブストラクト クレーンの振れ止め制御に関する研究は国内外で盛んに行われており、一般的な制御手法だけでなく、強化学習などの適用が検討されている。しかしながら、実スケールの巨大クレーンでこれを実現するためには、吊り荷位置を正確に推定する必要がある。この吊り荷位置の推定は非常に難しく、振れ止め制御の実用化において大きな障害になっている。本稿では、巨大クレーンの吊り荷の振れ止め制御を目的とした音波に基づく吊り荷位置推定システムについて解説する。また、音波を用いた場合に発生する諸問題を示し、問題を解決するための信号処理について解説する。

キーワード 巨大クレーン、自動振れ止め制御、音波、吊り荷位置推定

Abstract Anti-sway control has been the subject of extensive research both domestically and internationally, addressing not only general control schemes but also reinforcement learning methodologies. Accurate estimation of the sway angle is crucial for the effective implementation of anti-sway control. However, the estimation of the sway angle presents significant challenges, constituting a major obstacle to the realization of anti-sway control. In this study, we introduce the estimation of the sway angle of crane payloads by utilizing the phase difference of sound waves detected by two microphones. Furthermore, we show several issues associated with this sound-based sway angle estimation method and signal processing techniques to address these challenges.

Key words Huge crane, Anti-sway control, Sound waves, Sway angle estimation

1. はじめに

国内のインフラは、高度経済成長期に多くが整備されており、今後はその老朽化が加速度的に進むことが予想されている⁽¹⁾。したがって、老朽化が原因で水道などの重要なライフラインが突然寸断されるリスクが今後高まってくる。更に、地震、台風、集中豪雨といった自然災害の発生時には、被災者の生活を立て直すために、ライフラインの迅速な復旧が必要がある。クレーンは、こうしたインフラ補修や災害復旧の現場において、非常に重要な役割を担っている。一方で、建設業界全体で就業者の高齢化が進んでおり⁽²⁾、クレーンのオペレータの人手不足が深刻な問題になりつつある。

クレーンのオペレータにとって特に難易度の高い操作は、吊り荷の振れ止め操作である。吊り荷の揺れが自然に収まるのを待っていると、作業に膨大な遅延が発生する。したがって、振れ止め制御はクレーンオペレータにとって、必要不可欠なスキルとなる。振れ止め操作は、吊り荷の位置（振れ角）や速度を考慮し、タイミングよくジブの起伏動作や旋回動作を行う必要

がある。特に巨大クレーンのジブの起伏動作はウインチの回転によって制御されるため、この動作によって吊り荷の揺れを止めることは非常に難しい。そのため、オペレータが振れ止め操作のスキルを取得するためには、長年の操作経験が必要となる。前述したように、熟練オペレータは人手不足が深刻化しており、このままでは将来のインフラ老朽化や自然災害に対応することが困難になる。このような背景から、クレーンの振れ止め操作をコンピュータにより自動化する「自動振れ止め制御」が注目を集めている。

クレーンの振れ止め制御に関する研究は、海外を中心に盛んに行われている^{(3)~(51)}。近年では、様々な分野において注目されている強化学習をクレーンの振れ止め制御に利用する研究も報告されている^{(43), (51)}。振れ止め制御は、吊り荷の揺れを打ち消すように、クレーンのジブの起伏動作と旋回動作を行う必要がある。このとき、起伏動作や旋回動作は吊り荷の位置や速度に基づいて決定されるので、振れ止め制御には正確な吊り荷位置の推定が必要である。

ラボスケールの実験では、エンコーダ（文献(3)など）やイメージセンサ（文献(6)など）が振れ角推定に使用されてきた。一方、実際のクレーンでエンコーダを使用する場合、センサはワイヤに常に物理的に接触している必要がある。しかしながら、ワイヤの巻き上げ、巻き下げの際にも常にセンサとワイヤを密着させることは困難である。それに対し、カメラは、被写体（吊り荷フック）の至近距離に位置していれば非接触で振れ角を推定可能であるが、カメラは吊り荷と至近距離を保ったまま一緒

中本昌由 正員：シニア会員 広島大学大学院先進理工系科学研究科

E-mail nakamoto@m.ieice.org

Masayoshi NAKAMOTO, Senior Member (Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University, 1-4-1 Kagamiyama, Higashihiroshima, Hiroshima, 739-8527, Japan).

電子情報通信学会 基礎・境界サイエンス

Fundamentals Review Vol.20 No.2 pp.75-82 2026 年 10 月

©電子情報通信学会 2026

に移動しなければならない。このような付加的な作業を行うことは、人手不足の現状において現実的でない。また、カメラと吊り荷フックの間に障害物がある場合や、カメラと吊り荷フックの距離が遠い場合に吊り荷を画像認識することは容易ではない。すなわち、ワイヤ長が数十メートルの巨大クレーンにおいて、吊り荷位置を正確に推定することは困難である。

巨大クレーンの振れ角を推定する手法として、音波の位相差を利用した推定法が提案されている^{(52)~(54)}。文献(53)では、吊り荷用フックに設置した音源から特定の周波数をもつ音波を発生させ、これをクレーンのジブ上に設置した二つのマイクロホンで計測し、その位相差に基づいて振れ角を推定する手法が提案されている。また、屋外での実スケールクレーンを用いて吊り荷の振れ角推定の実験が行われており、その有効性が示されている。この手法では、音波の位相差の推定法、複数の振れ角候補が発生する空間エイリアシングの抑圧法、低域通過デジタルフィルタによる振動成分の除去法などの信号処理が利用されている。更に、文献(54)では、文献(53)の拡張バージョンが提案されている。本稿では、これらの手法について解説し、音波と信号処理技術に基づく巨大クレーンの吊り荷位置の推定技術を紹介する。

2. 音波位相差に基づく振れ角推定

タワークレーンのモデルにおいて、 x 軸、角度 θ 、点 O, P, Q, R, M_1, M_2 及び空間 S を図 1 のように配置する。ここで、2 マイクロホンをそれぞれ M_1, M_2 とする。また、吊り荷位置（吊り荷フック）を P とし、音源は P に配置する。更に、図 2 は、図 1 を側面から見て、横軸を x 軸とした図である。いま、既知のパラメータとして $\varphi = \angle M_1 M_2 Q$, $m_1 = OM_1$, $m_2 = OM_2$, $L = OP$ とおく。ただし、 $m_1 > 0$, $m_2 > 0$, $m_2 - m_1 > 0$, $L > 0$, $r > 0$, $0 \leq \varphi < \pi/2$ とする。更に、 θ は吊り荷の振れ角に対応しており、

$$\theta = \angle POQ \quad (1)$$

と定義する。また、音源からマイクロホン M_1 までの距離を

$$r = PM_1 \quad (2)$$

とおく。ここで、 θ と r は未知パラメータとする。なお、 L は既知であるため、 θ を求めることで吊り荷の x 軸上の位置を推定することも可能になる。

また、音源とマイクロホン M_2 の距離 PM_2 と、音源とマイクロホン M_1 の距離 PM_1 の差を δ を以下のように定義する。

$$\delta = PM_2 - PM_1 \quad (3)$$

後述するように、 δ はマイクロホン M_2 とマイクロホン M_1 で観測した音波の位相差から計算できる。

次に、 $\triangle OPM_1$ に対して、余弦定理を用いると

$$r^2 = m_1^2 + L^2 - 2m_1L \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2} - \varphi\right) \quad (4)$$

となる。同様に、 $\triangle OPM_2$ に対して余弦定理を用いると

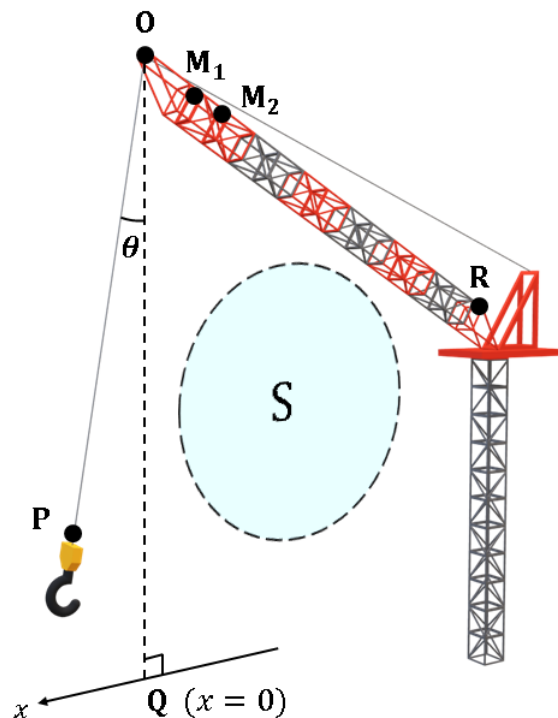


図 1 タワークレーンにおけるマイクロホン M_1, M_2 , 吊り荷フック（音源） P の配置

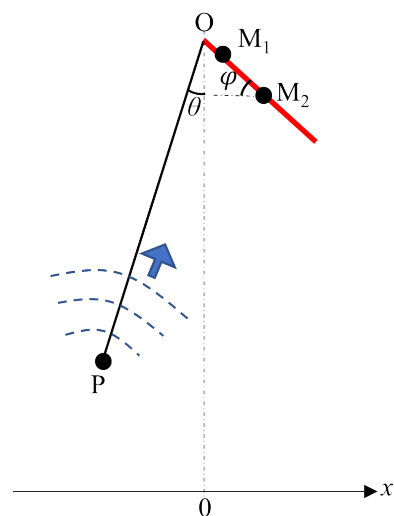


図 2 マイクロホン M_1, M_2 , 音源 P と音波の進行方向（青矢印）

$$(r + \delta)^2 = m_2^2 + L^2 - 2m_2L \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2} - \varphi\right) \quad (5)$$

となる。したがって、式 (4), (5) より、次式が得られる。

$$(m_2 - m_1)r^2 - 2m_1r\delta - m_1^2m_2 - m_2L^2 - m_1\delta^2 + m_1m_2^2 + m_1L^2 = 0 \quad (6)$$

ここで、式 (6) は r に関して二次方程式になるので、以下の形で求めることができる。

$$r = \alpha \pm \beta \quad (7)$$

ただし、

$$\alpha = \frac{m_1 \delta}{m_2 - m_1}, \quad (8)$$

$$\beta = \frac{\sqrt{\gamma}}{m_2 - m_1}, \quad (9)$$

$$\gamma = m_1^2 \delta^2 + (m_2 - m_1)(m_1^2 m_2 + m_2 L^2 + m_1 \delta^2 - m_1 m_2^2 - m_1 L^2) \quad (10)$$

したがって、 r の値は $\alpha - \beta$ と $\alpha + \beta$ のいずれの値になるか検討する必要がある。

まず、 L はワイヤ長であるので、十分な長さであると仮定する。更に、 δ, m_1, m_2 は L に比べて十分に小さい（短い）と仮定する。また、マイクロホン間の距離は 1 m 以上と仮定する。このとき、式 (10) は以下のように近似できる。

$$\gamma \simeq (m_2 - m_1)^2 L^2 \quad (11)$$

ここで、式 (11) を式 (9) に代入することで、

$$\beta \simeq L \quad (12)$$

となる。仮定より、 δ, m_1, m_2 は L に比べて十分に小さい（短い）ので、式 (8), (12) より、

$$|\alpha| \ll \beta \quad (13)$$

となる。したがって、式 (13) より、 r の符号は β の符号によって決定されることが分かる。 r は P と M_1 の距離であるから、真の r は正である。よって、

$$r = \alpha + \beta \quad (14)$$

となる。 r が求まれば、式 (4) より、振れ角 θ は

$$\theta = \arcsin \left(\frac{r^2 - m_1^2 - L^2}{2m_1 L} \right) + \varphi \quad (15)$$

と求まる。つまり、 θ は δ より求まることが分かる。また、 δ と θ は時系列信号となるので、以後、時間インデックス i を用いて $\delta(i), \theta(i)$ と記述する。なお、O, M_1, M_2 が同一直線上に配置されていない場合、式 (10) のように二次方程式にならないが、この場合はニュートン法を用いて θ を求めることができる⁽⁵⁴⁾。

以上より、数学的には式 (3) が求まれば、式 (15) より振れ角が求まる。しかしながら、音波位相差から振れ角を推定するためには、物理的に幾つかの制約が存在する。まず、マイクロホンはジブの先端 O 付近に配置する必要がある。もし、マイクロホンを O 付近ではなく、R 付近や OR の中点付記に配置した場合、音波は空間 S を通過することになる。しかし、空間 S には、実用上、障害物が存在する可能性がある。障害物が存在しない領域は、ワイヤの周辺、すなわち直線 OQ の周辺ということになる。したがって、音波の通路を確保するため、マイクロホンはジブの先端 O 付近に配置しなければならない。

ここで、音源 P から発生する音波は、以下の理由により指向性をもつことが望ましい。

- (i) 強い音圧の音波をマイクロホンに伝えることができる。
- (ii) 周辺へ音波が拡散すると、作業員、周辺住民への迷惑や健康被害の原因となる。

(iii) 吊り荷フック（音源）に電力を供給することは難しいため、音源は電池駆動である。よって、音波のエネルギーを特定方向のみに集中させることで電力を無駄なく利用できる。

更に、音波の周波数についても注意が必要である。一般的に音波の周波数が高ければ、指向性が強くなり、位相推定の精度が向上する。一方で、周波数が高ければ、減衰率も高くなり、音源とマイクロホンの距離が長い場合、正しく音波を観測できなくなる。更に、指向性が強くなりすぎると、音波の経路は非常に狭いものとなり、マイクロホンに音波をあてることが難しくなる。一方、音波の周波数を低くすれば、一般に指向性が弱くなり、周辺へ音波が拡散する。また、低い周波数の音波は、作業員、周辺住民への迷惑や健康被害がより深刻になる。更に、建設現場などにおける環境騒音はおおむね 5000 Hz 以下の低周波数帯域に存在するので、正しく位相差を検出できない。したがって、音波の周波数については、適切な周波数帯が存在すると考えられる。なお、電力の効率利用の観点からは、複数の周波数をもつ音波よりも単一周波数の正弦波が望ましい。

また、マイクロホンの間隔は一般的に広い方が望ましい。マイクロホン間隔が狭い場合、片方のマイクロホンに音波が当たることによって音波が回折・反射し、もう片方のマイクロホンに直接届く音波と干渉することで、二つの音波の位相差の算出精度が低下するためである。しかし、マイクロホン間隔を広くすることで、音波の経路が空間 S に重なってしまう。そのため、マイクロホンの位置や間隔も最適化が必要である。

以上より、音源周波数の選択やマイクロホンの配置・間隔については、実験的な試行錯誤が必要とされている。

3. 音波位相差の推定と音源周波数

マイクロホン M_1, M_2 で観測された信号の到達時間差から δ を求めることを考える。 δ は、 M_1, M_2 で観測された離散信号の到達時間差に音速を乗ずることで計算できる。まず、雑音の影響を取り除くため、 M_1, M_2 で観測したそれぞれの離散信号に対して逆ノッチフィルタを適用し、そのフィルタ出力をそれぞれ $\sigma_1(n), \sigma_2(n)$ とする。到達時間差を推定する方法としては、時間領域で相関

$$R_{12}(\tau) = \sum_n \sigma_1(n) \sigma_2(n + \tau) \quad (16)$$

を計算する方法が知られている。すなわち、 $R_{12}(\tau)$ を最大化する τ から、到達時間差が求まる。しかし、 τ は整数であるため、推定可能な到達時間差はサンプリング周期の整数倍に限定される。一方、周波数領域において位相スペクトルを利用すれば、サンプリング周期の非整数倍でも到達時間差を算出できる。

次に、 $\sigma_k(n)$ ($k = 1, 2$) の N 点ごとの離散フーリエ変換 (DFT) を考える。このとき、 N 点ごとに振れ角 $\theta(i)$ が算出される。最初のステップ ($i = 0$) では区間 $[0, N - 1]$ の $\sigma_k(n)$ 、次のステップ ($i = 1$) では区間 $[\Delta N, \Delta N + N - 1]$ の $\sigma_k(n)$ 、一般化して i 番めのステップでは、次のように DFT を計算する。

$$S_k(i) = \sum_{n=i\Delta N}^{i\Delta N+N-1} \sigma_k(n) e^{-j \frac{2\pi}{N} \kappa n} \quad (k = 1, 2) \quad (17)$$

ただし、 j は虚数単位、 κ は $0 \leq \kappa \leq N-1$ を満たす整数であり、 ΔN は 1 より大きい正の整数である。

このとき、 $\sigma_k(n)$ ($k=1, 2$) の位相スペクトルは

$$\lambda_k(i) = \arctan \left(\frac{\text{Im}[S_k(i)]}{\text{Re}[S_k(i)]} \right) \quad (k=1, 2) \quad (18)$$

と算出される。よって、音波の位相差は以下のように計算される。

$$\Delta\lambda(i) = \lambda_1(i) - \lambda_2(i) \quad (19)$$

更に、式 (19) を用いることで、 $\delta(i)$ は以下のように計算される。

$$\delta(i) = \frac{v_s}{2\pi F} \Delta\lambda(i) \quad (20)$$

ただし F は音源の周波数であり、 v_s は音速である。このとき、 $\theta(i)$ 及び $\delta(i)$ の時間間隔は、以下ようになる。

$$\Delta t = \frac{\Delta N}{f_s} \quad (21)$$

DFT の周波数スペクトルは、 f_s/N ごとの離散的な値をとる。したがって、音源の周波数 F が前述の離散点以外の値を取ると、DFT の計算精度が低下する可能性がある。そこで、音源の周波数 F を DFT の離散点と一致するように以下のように設定する。

$$F = \kappa \frac{f_s}{N} \quad (22)$$

なお、音波の位相差を推定する方法として、デジタル微分器を用いる方法も提案されている⁽⁵⁴⁾。

4. 後 処 理

4.1 空間エイリアシングとその抑圧法

前述したように音波の位相は、DFT により計算できる。しかし、マイクロホンの間隔が広い場合や音波の周波数が高い場合、音波位相差の候補が無数に発生する。この現象は空間エイリアシングとして知られている。このとき、音波位相差は l を整数として

$$\Delta\lambda_l(i) = \lambda_1(i) - \lambda_2(i) + l\pi \quad (23)$$

となる。振れ角 $\theta(i)$ は $\delta(i)$ を経由して位相差 $\Delta\lambda(i)$ から算出されるので、振れ角も無数に存在することになる。したがって、音波位相差から振れ角を算出するためには、適切な l の値を見つけるアンチエイリアシング処理が必要となる。

いま、 $\Delta\lambda_l(i)$ のインデックス l に対応する振れ角を $\theta_l(i)$ とする。真の振れ角のインデックスを m とし、その近傍の角度とは、 $\theta_{m-1}(i) < \theta_m(i) < \theta_{m+1}(i)$ なる関係が成立すると仮定する。ここで、振れ角の最大値はあらかじめ想定できるものとする。よって、想定する最大振れ角を u とし、 $|\theta_m(i)| < u$ と仮定する。

ここで、もし

$$\theta_{m-1}(i) < -u < \theta_m(i) < u < \theta_{m+1}(i) \quad (24)$$

ならば、 $|\theta_m(i)| < u$ の条件より、 m は容易に求めることがで

きる。しかしながら、

$$-u < \theta_{m-1}(i) < \theta_m(i) < \theta_{m+1}(i) < u \quad (25)$$

ならば、真の振れ角 $\theta_m(i)$ とその近傍値 $\theta_{m-1}(i)$, $\theta_{m+1}(i)$ を区別することができない。ここで、音源周波数が低くなるにつれて、 $\theta_m(i)$, $\theta_{m-1}(i)$, $\theta_{m+1}(i)$ は互いに接近し、式 (25) となる可能性が高くなる。したがって、音源周波数を低くすれば空間エイリアシングの発生は回避できるが、屋外では低周波数帯域に騒音成分などが存在し、音波位相差の推定精度が劣化する。

マイクロホンの間隔を狭くすることで空間エイリアシングを回避することもできる。しかしながら、マイクロホンの間隔を狭くすると、振れ角の推定精度が劣化する。したがって、精度よく振れ角を推定するためには、式 (25) の条件下で m を見つける必要がある。そこで、文献(53)では、吊り荷の振り子運動の性質を利用した手法が提案されている。

いま、インデックス l に対応する吊り荷の振り子の運動方程式を考え、振幅を A_l 、位相を ϕ_l 、直流成分を c_l として、振り子の運動方程式を以下のように記述する。

$$\tilde{\theta}_l(t) = A_l \sin(\Omega t + \phi_l) + c_l \quad (26)$$

ただし、 Ω は吊り荷の振り子運動の角周波数である。公知のように、 Ω はワイヤ長 L を用いて以下のように表される。

$$\Omega = \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (27)$$

ここで、 g は重力加速度である。

振り子運動の直流成分は 0 であるため、 m は以下のように推定できる。

$$m = \arg \min_l |c_l| \quad (28)$$

ここで、 c_l は振り子運動を 1 周期待てば容易に求めることができる。したがって、十分時間が経過すれば式 (28) を満たす m を求めることができる。しかし、巨大なクレーンではワイヤ長は 40m 以上になり、周期も 10 秒以上となるため、 c_l を求めるための待機時間も長くなる。この待機時間は、振れ止め制御を実行するたびに発生するので、工期の大幅な遅れにつながる。よって、できるだけ迅速に c_l を求める必要がある。

そこで、 ξ をデータ数とし、 $\tilde{\theta}_l(t_i)$ と振れ角の推定データ $\theta_l(i)$ の平均 2 乗誤差

$$E_l = \frac{1}{\xi} \sum_{i=0}^{\xi} (\tilde{\theta}_l(t_i) - \theta_l(i))^2 \quad (29)$$

を最小化することで c_l を求めることを考える。そのため、新たなパラメータ a_l , b_l を用いて、式 (26) を以下のように書き換える。

$$\tilde{\theta}_l(t) = a_l \sin(\Omega t) + b_l \cos(\Omega t) + c_l \quad (30)$$

ここで、 $A_l = \sqrt{a_l^2 + b_l^2}$ 、 $\phi_l = \arctan(b_l/a_l)$ である。いま、

$$\frac{\partial E_l}{\partial a_l} = \frac{\partial E_l}{\partial b_l} = \frac{\partial E_l}{\partial c_l} = 0 \quad (31)$$

とすれば、以下の連立方程式が得られる。

$$a_l \sum_{i=0}^{\xi} \sin^2(\Omega t_i) + b_l \sum_{i=0}^{\xi} \sin(\Omega t_i) \cos(\Omega t_i) + c_l \sum_{i=0}^{\xi} \sin(\Omega t_i) = \sum_{i=0}^{\xi} \theta_l(i) \sin(\Omega t_i), \quad (32)$$

$$a_l \sum_{i=0}^{\xi} \sin(\Omega t_i) \cos(\Omega t_i) + b_l \sum_{i=0}^{\xi} \cos^2(\Omega t_i) + c_l \sum_{i=0}^{\xi} \cos(\Omega t_i) = \sum_{i=0}^{\xi} \theta_l(i) \cos(\Omega t_i), \quad (33)$$

$$a_l \sum_{i=0}^{\xi} \sin(\Omega t_i) + b_l \sum_{i=0}^{\xi} \cos(\Omega t_i) + c_l \xi = \sum_{i=0}^{\xi} \theta_l(i) \quad (34)$$

したがって、 c_l は連立方程式 (32)~(34) を解くことで求まる。

4.2 低域通過デジタルフィルタの利用

吊り荷は振り子運動するため、振れ角の推定値は式 (27) の角周波数 Ω に大きなスペクトルが発生する。 Ω よりも大きな成分は除去すべき振動成分となる。音波位相差に基づいて推定された振れ角の値には振動成分が含まれている。この振動成分を除去するために低域通過デジタルフィルタを利用する。

一般的な無限インパルス応答 (IIR) デジタルフィルタの伝達関数は、周波数 f を用いて以下のように表される。

$$H(e^{j2\pi f}) = \frac{\sum_{q=0}^{\nu} \tilde{b}_q e^{-j2\pi f q}}{\sum_{p=0}^{\mu} \tilde{a}_p e^{-j2\pi f p}}, \quad \tilde{a}_0 = 1$$

ここで、 $\tilde{a}_p$ と $\tilde{b}_q$ はフィルタ係数、 μ と ν はそれぞれの次数を表す。IIR フィルタを設計するためには、次数に加えてカットオフ周波数 f_c を決定する必要がある。そこで、以下では、 f_c の決定法について議論する。

まず、クレーンの運転中にワイヤ長 L は変化するため、式 (27) において、 Ω は L の関数となるので、 $\Omega(L)$ と記述する。また、 L の想定最小値と想定最大値をそれぞれ $L_{\min}$ 、 $L_{\max}$ とおき、 $0 < L_{\min} \leq L \leq L_{\max}$ とする。このとき、式 (27) より、

$$0 < \Omega(L_{\max}) \leq \Omega(L) \leq \Omega(L_{\min}) \quad (35)$$

となる。したがって、

$$\frac{\Omega(L_{\min})}{2\pi} < f_c$$

を満たすように f_c を設定すればよい。これにより、クレーン運転中にワイヤ長が変化 (ワイヤの巻き上げ、巻き下ろし) してもデジタルフィルタを使用することができる。

5. 実験

5.1 実験環境

図 3 のように、株式会社北川鉄工所本山工場に設置されて



図 3 実スケールクレーン (株式会社北川鉄工所本山工場)

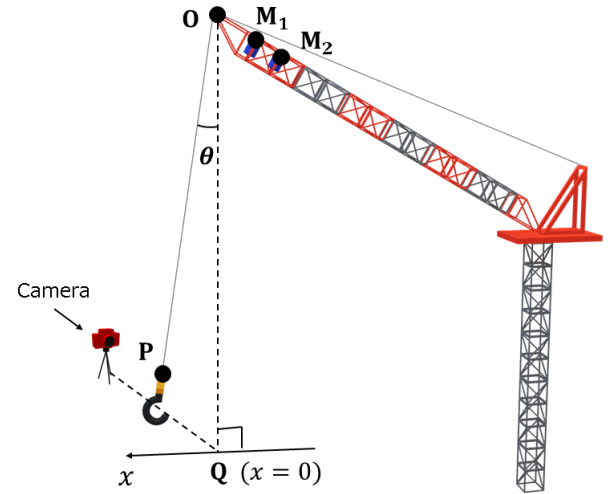


図 4 クレーンの実験とカメラ配置

いる実スケールクレーンに対し、音源を吊り荷フックに取り付け、2本のマイクロホンをジブ上に設置することで吊り荷の振れ角推定の実験を行った。ここで、パラメータは $m_1 = 4.2 \text{ m}$ 、 $m_2 = 5.2 \text{ m}$ 、 $L = 42.0 \text{ m}$ 、 $\varphi = 10.0 \text{ deg}$ とした。また、 $N = 256$ と $\Delta N = 12800$ とし、サンプリング周波数は $f_s = 96000 \text{ Hz}$ とした。更に、音速は $v_s = 338.7 \text{ m/s}$ とした。音源周波数は、4125、5250、6000 Hz とした。また、吊り荷フックが静止している点を原点とし、その点から 3 m 吊り荷を引っ張って静かに離すことで振り子運動を発生させた。振り子の振幅は約 4.1 deg、角周波数は約 0.48 rad/s である。また、比較のため、図 4 のようにカメラを吊り荷フックの至近距離に配置し、画像認識による振れ角の推定を行った。

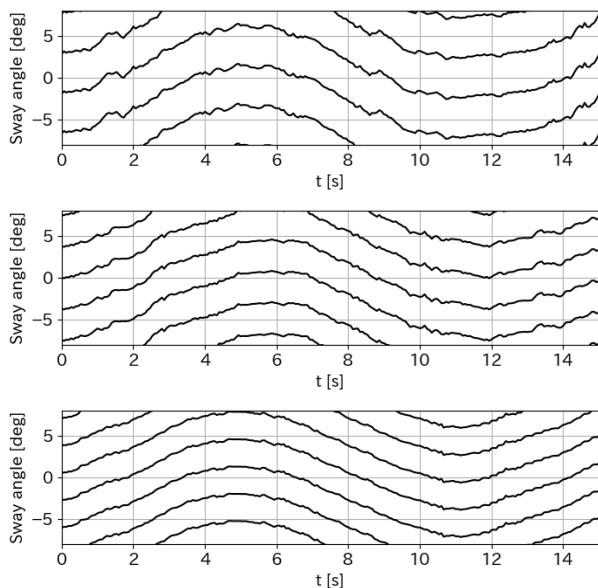


図5 空間エイリアシングを含む振れ角推定結果 上から 4125, 5250, 6000 Hz の場合.

5.2 実験結果

図5は4125, 5250, 6000 Hzの場合における複数の振れ角候補を示している. 図5は, 空間エイリアシングが発生した状態であるので, そのまま振れ角を算出することはできない. 更に, 周波数が高くなるにつれて, 振れ角候補が互いに近接していることが確認できる. ここで, 最大想定振れ角を $u = 4.1 \text{ deg}$ と設定したとしても, いずれの周波数においても $\theta_l(i) < |u|$ を満たす振れ角 $\theta_l(i)$ は複数存在していることから, 最大想定振れ角に基づいて適切な振れ角を一意に定めることは難しい. したがって, c_l を算出し, 式(28)に基づいて適切な振れ角のインデックスを算出した. これがアンチエイリアシング処理に相当する. ただし, アンチエイリアシングには数秒の待機時間を要する点に注意する必要がある.

また, $L_{\min} = 0.25 \text{ m}$ として $f_c = 1 \text{ Hz}$ を想定し, 文献(55)の設計法を用いて低域通過 IIR デジタルフィルタを設計した. ここで, フィルタの次数を $\mu = 2, \nu = 4$, 群遅延を 2, 最大極半径を 0.95, 通過域の重みを 100 とした. 設計した低域通過 IIR デジタルフィルタの振幅応答を図6に示す. また, 図7は, 空間エイリアシングを除去した後, 振れ角信号に低域通過 IIR デジタルフィルタを適用した結果である. 比較として, 吊り荷の至近距離に設置したカメラによる振れ角の推定値を青破線で示した.

また, フィルタの次数を大きくした場合, 振動成分の抑圧効果を高めるためには群遅延を大きく設定する必要がある. 一般に, 制御対象から得られる出力(ここでは, 振れ角値)に大きな遅延があると制御は難しくなる. したがって, デジタルフィルタの群遅延を大きく設定する場合, 振れ止め制御の難易度が高くなる点に注意する必要がある.

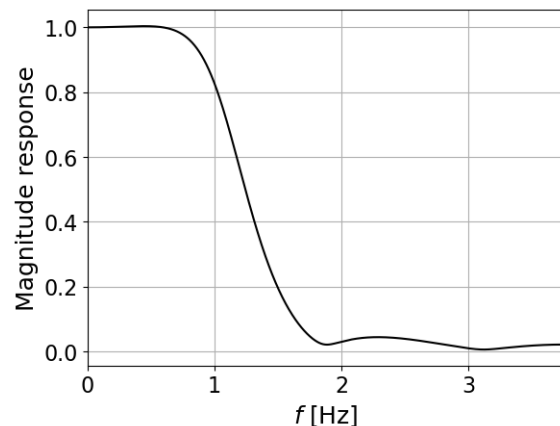


図6 低域通過 IIR デジタルフィルタの振幅応答

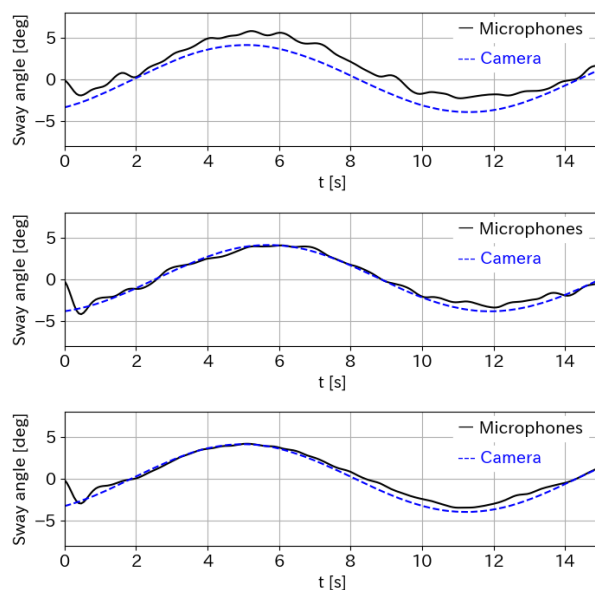


図7 マイクロホンによる振れ角の推定結果とカメラによる推定結果の比較 上から 4125, 5250, 6000 Hz の場合.

6. まとめ

巨大クレーンの吊り荷の振れ止め制御を目的とした音波に基づく吊り荷位置推定システムについて解説した. 次に, 音波を用いた場合に発生する空間エイリアシングなどの諸問題を示し, その解決策を紹介した. また, 推定精度を改善するためのデジタルフィルタを用いた信号処理について解説した.

クレーンの吊り荷位置推定システムは屋外で使用されるため, 精度だけでなく, 雨, 雪, 風などの環境に左右されないロバスト性が必要とされる. また, 高価で高性能な特殊センサではなく, 安価で容易に入手可能なハードウェア(音源やマイクロホン)でシステムを構築できれば, 使用者にとって利点が多い. こういった要求を満たす吊り荷位置推定システムが実現されれば, 巨大クレーンの自動振れ止め制御の実用化が大きく前進すると思われる.

最後に, 実験にご協力頂いた株式会社北川鉄工所の皆様に感謝致します.

- (1) 国土交通省, “社会資本の老朽化の現状と将来,” <https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02.01.html>.
- (2) 国土交通省, “建設業を巡る現状と課題,” <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001610913.pdf>.
- (3) C.-Y. Chang, “Adaptive fuzzy controller of the overhead cranes with nonlinear disturbance,” *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol.3, no.2, pp.164–172, May 2007.
- (4) M.-S. Park, D. Chwa, and S.-K. Hong, “Antisway tracking control of overhead cranes with system uncertainty and actuator nonlinearity using an adaptive fuzzy sliding-mode control,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.55, no.11, pp.3972–3984, Nov. 2008.
- (5) W. Chen and M. Saif, “Output feedback controller design for a class of MIMO nonlinear systems using high-order sliding-mode differentiators with application to a Laboratory 3-D crane,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.55, no.11, pp.3985–3997, Nov. 2008.
- (6) C.-Y. Chang and H.W. Lie, “Real-time visual tracking and measurement to control fast dynamics of overhead cranes,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.59, no.3, pp.1640–1649, March 2012.
- (7) N. Sun and Y. Fang, “New energy analytical results for the regulation of underactuated overhead cranes: An end-effector motion-based approach,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.59, no.12, pp.4723–4734, Dec. 2012.
- (8) C. Vazquez, J. Collado, and L. Fridman, “Control of a parametrically excited crane: A vector Lyapunov approach,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol.21, no.6, pp.2332–2340, Nov. 2013.
- (9) Y. Fang, P. Wang, N. Sun, and Y. Zhang, “Dynamics analysis and nonlinear control of an offshore boom crane,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.61, no.1, pp.414–427, Jan. 2014.
- (10) K. Zavari, G. Pipeleers, and J. Swevers, “Gain-scheduled controller design: Illustration on an overhead crane,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.61, no.7, pp.3713–3718, July 2014.
- (11) L.-H. Lee, C.-H. Huang, S.-C. Ku, Z.-H. Yang, and C.-Y. Chang, “Efficient visual feedback method to control a three-dimensional overhead crane,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.61, no.8, pp.4073–4083, Aug. 2014.
- (12) W. He, S. Zhang, and S.S. Ge, “Adaptive control of a flexible crane system with the boundary output constraint,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.61, no.8, pp.4126–4133, Aug. 2014.
- (13) X. Zhang, Y. Fang, and N. Sun, “Minimum-time trajectory planning for underactuated overhead crane systems with state and control constraints,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.61, no.12, pp.6915–6925, Dec. 2014.
- (14) N. Sun, Y. Fang, and H. Chen, “A new antiswing control method for underactuated cranes with unmodeled uncertainties: Theoretical design and hardware experiments,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.62, no.1, pp.453–465, Jan. 2015.
- (15) G. Hillhorst, G. Pipeleers, W. Michiels, R.C.L.F. Oliveira, P.L.D. Peres, and J. Swevers, “Fixed-order linear parameter-varying feedback control of a lab-scale overhead crane,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol.24, no.5, pp.1899–1907, Sept. 2016.
- (16) N. Sun, Y. Fang, H. Chen, B. Lu, and Y. Fu, “Slew/Translation positioning and swing suppression for 4-DOF tower cranes with parametric uncertainties: Design and hardware experimentation,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.63, no.10, pp.6407–6418, Oct. 2016.
- (17) J. Smoczek and J. Szpytko, “Particle swarm optimization-based multivariable generalized predictive control for an overhead crane,” *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol.22, no.1, pp.258–268, Feb. 2017.
- (18) N. Sun, Y. Fang, H. Chen, and B. Lu, “Amplitude-saturated nonlinear output feedback antiswing control for underactuated cranes with double-pendulum cargo dynamics,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.64, no.3, pp.2135–2146, March 2017.
- (19) X. Wu and X. He, “Nonlinear energy-based regulation control of three-dimensional overhead cranes,” *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol.14, no.2, pp.1297–1308, April 2017.
- (20) D. Chwa, “Sliding-mode-control-based robust finite-time antisway tracking control of 3-D overhead cranes,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.64, no.8, pp.6775–6784, Aug. 2017.
- (21) N. Sun, Y. Fang, H. Chen, Y. Wu, and B. Lu, “Nonlinear antiswing control of offshore cranes with unknown parameters and persistent ship-induced perturbations: Theoretical design and hardware experiments,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.65, no.3, pp.2629–2641, March 2018.
- (22) B. Lu, Y. Fang, N. Sun, and X. Wang, “Antiswing control of offshore boom cranes with ship roll disturbances,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol.26, no.2, pp.740–747, March 2018.
- (23) P. Cai, I. Chandrasekaran, J. Zheng, and Y. Cai, “Automatic path planning for dual-crane lifting in complex environments using a prioritized multiobjective PGA,” *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol.14, no.3, pp.829–845, March 2018.
- (24) N. Sun, T. Yang, Y. Fang, B. Lu, and Y. Qian, “Nonlinear motion control of underactuated three-dimensional boom cranes with hardware experiments,” *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol.14, no.3, pp.887–897, March 2018.
- (25) N. Sun, T. Yang, H. Chen, and Y. Fang, “Dynamic feedback antiswing control of shipboard cranes without velocity measurement: Theory and hardware experiments,” *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol.15, no.5, pp.2879–2891, May 2019.
- (26) T. Yang, N. Sun, H. Chen, and Y. Fang, “Motion trajectory-based transportation control for 3-D boom cranes: Analysis, design, and experiments,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.66, no.5, pp.3636–3646, May 2019.
- (27) N. Sun, Y. Wu, X. Liang, and Y. Fang, “Nonlinear stable transportation control for double-pendulum shipboard cranes with ship-motion-induced disturbances,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.66, no.12, pp.9467–9479, Dec. 2019.
- (28) N. Sun, Y. Fu, T. Yang, J. Zhang, Y. Fang, and X. Xin, “Nonlinear motion control of complicated dual rotary crane systems without velocity feedback: Design, analysis, and hardware experiments,” *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol.17, no.2, pp.1017–1029, April 2020.
- (29) L.A. Tuan, “Neural observer and adaptive fractional-order backstepping fast-terminal sliding-mode control of RTG cranes,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.68, no.1, pp.434–442, 2021.
- (30) Y. Wu, N. Sun, H. Chen, and Y. Fang, “Adaptive output feedback control for 5-DOF varying-cable-length tower cranes with cargo mass estimation,” *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol.17, no.4, pp.2453–2464, 2021.
- (31) J. Kim, D. Lee, B. Kiss, and D. Kim, “An adaptive unscented kalman filter with selective scaling

- (AUKF-SS) for overhead cranes,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol.68, no.7, pp.6131–6140, 2021.
- (32) T. Yang, N. Sun, H. Chen, and Y. Fang, “Observer-based nonlinear control for tower cranes suffering from uncertain friction and actuator constraints with experimental verification,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol.68, no.7, pp.6192–6204, 2021.
- (33) Z. Liu, Y. Fu, N. Sun, T. Yang, and Y. Fang, “Collaborative anti-swing hoisting control for dual rotary cranes with motion constraints,” IEEE Trans. Ind. Info., vol.18, no.9, pp.6120–6130, 2022.
- (34) 進藤智則, “巨大クレーンの制御に強化学習技術 劣駆動でもオーバーシュートなしに操縦自動化,” 日経 Robotics, no.88, pp.4–9, 2022.
- (35) J. Ye and J. Huang, “Control of beam-pendulum dynamics in a tower crane with a slender jib transporting a distributed-mass load,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol.70, no.1, pp.888–897, 2023.
- (36) G. Li, X. Ma, Z. Li, and Y. Li, “Time-polynomial-based optimal trajectory planning for double-pendulum tower crane with full-state constraints and obstacle avoidance,” IEEE Trans. Mechatron., vol.28, no.2, pp.919–932, 2023.
- (37) Z. Liu, N. Sun, T. Yang, and Y. Fang, “Optimal collaborative motion planning of dual boom cranes for transporting payloads to desired positions and attitudes,” IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol.24, no.6, pp.6096–6110, 2023.
- (38) Y. Wang, T. Yang, M. Zhai, Y. Fang, and N. Sun, “Ship-mounted cranes hoisting underwater payloads: Transportation control with guaranteed constraints on overshoots and swing,” IEEE Trans. Ind. Inform., vol.19, no.10, pp.9968–9978, 2023.
- (39) G. Wang, Q. Zhang, Y. Wang, N. Xie, and C. Lu, “Model-independent control for tower cranes with unmodeled dynamics and actuator saturation,” IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.73, pp.1–11, 2024.
- (40) W. Tian, J. Huang, and W. Singhose, “Control of cooperative-transportation dynamics in twin-lift cranes suspending a liquid container,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol.71, no.4, pp.4016–4025, 2024.
- (41) Z. Tian, X. Wang, J. Yang, S. Li, D. Niu, and Q. Li, “Safety-critical disturbance rejection control of overhead crane systems: Methods and experimental validation,” IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol.32, no.6, pp.2253–2266, 2024.
- (42) G. Li, X. Ma, and Y. Li, “Adaptive sliding mode control based on time-delay estimation for underactuated 7-DOF tower crane,” IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. Syst., vol.55, no.3, pp.2277–2288, 2025.
- (43) P. Tan, J. Liu, M. Sun, and Z. Chen, “Disturbance compensation-based deep reinforcement learning control strategy for underactuated overhead crane systems: Design and experiments,” IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol.26, no.4, pp.4380–4390, April 2025.
- (44) Z. Liu, T. Yang, L. Zhou, Y. Fang, and N. Sun, “Fixed-time tracking control of 3-D collaborative double boom cranes with obstacle avoidance and prescribed performance,” IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. Syst., vol.55, no.6, pp.4175–4187, 2025.
- (45) J.-K. Wang, Y. Liu, R. Chi, X. Bu, and Z. Hou, “Tuning function-based light computational adaptive fixed-time control for overhead cranes with multiple uncertainties,” IEEE Trans. Autom. Sci. Eng., vol.22, pp.16428–16439, 2025.
- (46) Y. Gao, Z. Zhang, P. Huang, and Y. Wu, “CDF-based filter and fuzzy-based adaptive CPFTS controller for constrained underactuated crane system: Theory and experiment,” IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol.26, no.7, pp.9711–9725, 2025.
- (47) J. Wang, Z. Tian, J. Sun, J. Yang, and S. Li, “Event-triggered safety-critical model predictive control for underactuated overhead cranes,” IEEE Trans. Ind. Informat., vol.21, no.9, pp.6857–6867, Sept. 2025.
- (48) G. Wang, Q. Zhang, Y. Wang, and X. Gao, “Anti-swing control of underactuated rotary cranes: An improved iterative learning scheme,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol.72, no.10, pp.10826–10836, Oct. 2025.
- (49) J. Xia and S. Xu, “Saturated control for underactuated tower cranes with accurate gravitational compensation and finite-time disturbance observer,” IEEE Trans. Mechatron., vol.30, no.6, pp.5120–5131, Dec. 2025.
- (50) C. Liu, Z. Zhang, X. Liu, H. Wang, Y. Liu, and C. Li, “Nonlinear coupling end-effector tracking control and application for underactuated tower cranes,” IEEE Trans. Autom. Sci. Eng., vol.22, pp.23873–23883, 2025.
- (51) Z. Wang, Y. Zhang, W. Xu, and F. Yang, “Soft actor-critic-based anti-sway control for port crane systems based on a novel set-membership global estimation strategy,” IEEE Sens. J., vol.26, no.2, pp.2736–2748, Jan. 2026.
- (52) 中本昌由, “音響信号処理を用いたクレーンの振れ止め制御,” 信学誌, vol.104, no.1, pp.49–54, Jan. 2021.
- (53) M. Nakamoto, K. Matsuoka, and T. Funai, “Sway angle sensor system for full-scale tower crane using the phase difference of sound waves,” IEEE Trans. Ind. Informat., vol.21, no.8, pp.6476–6485, 2025.
- (54) Y. Ino, M. Nakamoto, and T. Funai, “Extended schemes for sound-based sway angle estimation for full-scale tower cranes with no spatial aliasing,” IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.75, pp.1–12, 2026.
- (55) M. Nakamoto and S. Ohno, “Design of multi-band digital filters and full-band digital differentiators without frequency sampling and iterative optimization,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol.61, no.9, pp.4857–4866, 2014.

(CAS 研究会提案, 2026 年 3 月 9 日受付,
2026 年 5 月 29 日再受付)



中本昌由 (正員: シニア会員)

2002 年 3 月広島大学大学院工学研究科博士後期課程修了。日本学術振興会特別研究員 PD、広島大学大学院工学研究科助手などを経て、現在、同大学大学院先進理工系科学研究科先進理工系科助教。デジタル信号処理、数値最適化、機械学習に関する研究に従事。博士 (工学)。IEEE、電気学会、計測自動制御学会の各会員。

反射像と車載ステレオカメラを用いた自律型見通し外障害物位置推定システムの開発

Autonomous non-Line-of-Sight obstacle detection technology

高取祐介 Yusuke TAKATORI

アブストラクト 自動運転や先進運転支援システムの安全向上において、インフラに依存しない自律的な見通し外（NLOS）障害物検出は重要な課題である。本稿の前半では、自律的な障害物検出センサデバイスを用いた見通し外検出に関する従来技術を紹介する。後半では他車車体などの反射性塗装平面をミラーとして活用し、車載ステレオカメラから NLOS 障害物の位置を特定する手法に関して位置推定原理・アプリケーション例・原理検証について説明する。更にシステム化のためのフレームワークと各パイプライン処理について解説を行う。

キーワード 見通し外（NLOS）障害物位置推定システム、車載ステレオカメラ、自律型センシング

Abstract In the development of automated driving technology and advanced driver assistance systems (ADAS), autonomous non-line-of-sight (NLOS) obstacle detection without relying on infrastructure is a critical challenge. The first half of this paper introduces conventional technologies for NLOS detection using autonomous obstacle detection sensor devices. The second half describes the method which utilizes the reflection images on painted surfaces of surrounding vehicles as mirrors to estimate the location of NLOS obstacles via an on-board stereo camera, explaining its geometric principle, application examples, and principle verifications. Furthermore, this paper outlines the framework and each pipeline process for system implementation.

Key words Non-Line-of-Sight (NLOS) obstacle position estimation system, On-board stereo camera, Autonomous sensing

1. はじめに

自動運転及び先進運転支援システム（ADAS）の黎明期から発展期にかけて、環境認識技術の中心は自車に搭載されたカメラや LiDAR、ミリ波レーダーなどの「車載センサ」の高度化であった。これらのセンサは、見通し内（Line-Of-Sight: LOS）に存在する物体の検出及び位置推定において極めて高い精度を実現した。しかし、光や電波の直進性という物理的制約から、交差点の死角や大型車両の陰など、遮蔽物の向こう側に存在する「見通し外（Non-Line-Of-Sight: NLOS）」の障害物を直接検知することは原理的に困難であった。

車載センサ単体での物理的限界（見通し内の限界）を克服するため、2000 年代以降、無線通信を用いた協調型の障害物検出・位置推定システムの検討が世界的に進められてきた。そのアプローチの一つとして「路車間（Vehicle-to-Infrastructure: V2I）通信」の利用が挙げられる。これは、交差点などに設置された路側インフラセンサが死角領域の障害物を検出し、その位置情報を通信によって周辺車両に共有するシステムである⁽¹⁾。

もう一つは「車車間（Vehicle-to-Vehicle: V2V）通信」を利用するアプローチであり、各車両が自車の高精度な位置情報や動的状態を直接ブロードキャストし、互いの存在と位置を共有する仕組みである⁽²⁾。これら通信技術の導入は NLOS 問題に対する有力な解決策とされているが、一方で、「システム特有のインフラが整備された特定の場所でしか機能しないこと」、「通信デバイス非搭載の車両・歩行者を検知できないこと」、「普及率への依存」などの構造的な弱点も有している。路側インフラを利用する V2I システムは、インフラが整備された特定の交差点やエリアにのみ対応可能であり、面的なカバレッジの確保には莫大なコストを要する。一方、V2V システムは、通信やポジショニングのためのデバイスを搭載・稼働させていない車両の情報を取得できない。更に、最も保護すべき対象でありながら、通信・ポジショニング機能をもつデバイスの常時保有や稼働が担保されない歩行者や自転車（Vulnerable Road Users: VRU）を検知・共有することが困難であるという課題を残していた。

上記の課題を背景として、インフラの整備範囲や対象物の通信機能の有無に依存しない、「自律型見通し外位置推定システム」への関心が高まっている。これは、障害物検出用センサを搭載した車両が、通信による他者からの情報提供に頼らず、自律的なセンシングのみを用いて NLOS 領域の物体の存在と位置を推定するアプローチである。環境中の物理現象（光の反射や電波の回折、影の微小変動など）の利用や、AI による物体認識などを駆使することで、従来の車載センサが抱えていた直進性の制約を克服し、見通し外領域を可視化する技術として、現在活発

高取祐介 正員 神奈川工科大学
E-mail takatori@ele.kanagawa-it.ac.jp
Yusuke TAKATORI, Member (Kanagawa Institute of Technology,
1030 Shimoogino, Atsugi-shi, Kanagawa, 243-0292 Japan).
電子情報通信学会 基礎・境界サイエンス
Fundamentals Review Vol.20 No.2 pp.83-91 2026 年 10 月
©電子情報通信学会 2026

に研究が進められている。

2. 見通し外障害物の検出・位置推定に関する研究

ここでは、主に車載センサとして近年利用が進む電波（ミリ波レーダー、UWB レーダー）、LiDAR、カメラを用いた研究例についてまとめる。

2.1 電波ベースの検出・位置推定

電波を用いた NLOS 検知は、遮蔽物背後からの微弱な反射や回折を利用する点に特徴がある。例えば、ミリ波車載用ドップラーレーダーを用いた手法として、Scheiner らは建物の壁や駐車車両を反射面とみなし、そこからの散乱信号を解析することで、直接視認できない物体の位置や速度をリアルタイムで検出・追跡するモデルを構築している⁽³⁾。同研究では、実環境シナリオにおける歩行者や自転車の高精度な位置推定において有効性が示されている。また、佐保らは 24GHz 帯のマイクロドップラーレーダーを利用し、見通し外にいる歩行者の行動（歩行、走行、立ち止まりなど）を計測・分類する手法を提案している⁽⁴⁾。同研究では、得られた速度-時間分布画像を畳み込みニューラルネットワークに入力することで、歩行者が死角から飛び出してくるリスクを高い精度で判定するアプリケーションを開発している。一方、電波の回折を利用した研究例として、Yang らは比較的低い周波数帯の UWB レーダーを用いている⁽⁵⁾。同研究では、壁面での一次・二次反射（鏡面反射）に加えて、コーナーの頂点（エッジ）で発生する回折波の伝搬経路と到達時間を数学的にモデル化し、取得したマルチパス信号と関連付けることでターゲットを検知している。また、佐保らは 2.4GHz 帯を活用し、壁のエッジを回り込む回折波を用いて見通し外の歩行者の行動推定を行う手法の検討も行っている⁽⁶⁾。

2.2 LiDAR ベースの検出・位置推定

LiDAR の基本的な測定原理は、光の飛行時間（Time of Flight: ToF）に基づき対象までの距離を測定することである。NLOS 検知における標準的なアプローチでは、鏡面などの反射面を介してレーザーパルスが伝搬する現象が利用される。このとき、反射面を経由して遮蔽物裏の物体に照射された反射点群は、鏡面の奥に「ゴースト（Virtual Object）」として観測される。そこで、鏡面となる平面の方程式を検出し、その面を対称軸としてゴースト点群を反転（鏡像変換）させることで、遮蔽物裏の物体の真の位置を復元する。図 1 に概念図を示す。

Henley らは、LiDAR の二次・三次反射情報を幾何学的に解析することで、不可視の鏡面反射面を特定して NLOS マッピングを行うフレームワークを提唱している⁽⁷⁾。また、Wang らは LiDAR によって得られた点群から、反射面とゴーストの幾何学的関係を機械学習によってモデル化する取り組みを報告している⁽⁸⁾。しかし、これら従来の LiDAR を用いたゴーストの検証

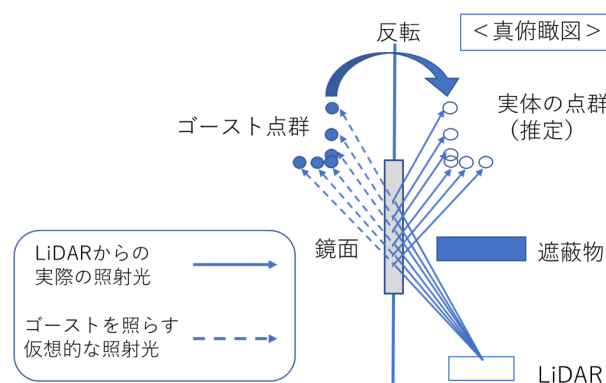


図 1 LiDAR による鏡面を用いた見通し外障害物位置推定の概念図

は基礎的な実験環境にとどまり、実際の交通環境における多様な反射面（車両の塗装面や窓ガラスなど）への対応や、具体的な見通し外障害物の位置推定に関する研究例は現時点では極めて限定的である。

2.3 カメラベースの検出・位置推定

カメラベースの技術においては、そもそも見通し内（LOS）の障害物に対して、物体・危険事象の「検出技術」と「位置推定技術」がそれぞれ展開されてきた。前者の物体検出技術は三次元的な位置推定を必要としないため、画像内に危険事象（あるいは対象物体）が映り込んでいるか否かを判定することが主な課題となる。一方、後者の位置推定技術においては、画像内の物体認識に加えて、対象までの相対位置を算出するアルゴリズムが必要となる。

危険事象の検出例として、夜間の無信号交差点において建物の陰から接近する他車両のヘッドライト光に着目し、それがアスファルト路面を照らす輝度の変化を車載カメラで捉えることで、直接視認する前に接近を認知するアプローチが提案されている⁽⁹⁾。この手法は路面をいわば「スクリーン（拡散反射面）」として捉え、光源そのものが死角にあっても、交差点付近における路面輝度の空間的・時間的变化から他車両の接近を判断し、衝突までの時間（Time-to-Contact: TTC）を推定するものである。

また、物体検出の例として小野らは、車載カメラ画像から路側に設置されたカーブミラー領域を抽出し、その内部に映る接近物体（車両や歩行者）を検出することで危険を察知する手法を提案している⁽¹⁰⁾。自車両に対する相対的な位置推定までは行わないものの、検出した物体のフレーム間における移動を考慮することで、対象が接近しているかどうかの判定を可能にしている。

これら見通し外の危険事象検出手法に対し、著者は見通し外障害物の位置推定手法としてステレオカメラを用いた手法を提案している⁽¹¹⁾。この手法は、前節の LiDAR によるアプローチと同様に光の反射を活用するものであるが、LiDAR と異なるのは LiDAR が能動的に放出した光を利用することに対し、本アプローチでは被写体に照らされた光を受動的に利用する点である。本アプローチでは左右のカメラ画像からそれぞれの反射面

の写りこむ領域を特定し、各領域をステレオペアとしてステレオマッチングを行うことで反射面内に映り込む障害物のゴーストの視差マップを取得し、NLOS 領域における位置推定を実現している。次章以降では、この具体的な位置推定方法について詳細に説明する。

3. 反射像を用いるステレオカメラベース見通し外障害物位置推定手法

3.1 位置推定原理

車両の移動空間において、地面に対し非垂直な平面には路面や空が映り込むため、車両移動平面上の障害物が捉えられる確率は低い。そこで本手法では、地面に垂直な反射面を対象とし、 z 軸を車両進行方向（カメラ奥行き方向）、 y 軸を高さ方向、 x 軸をこれらと垂直な方向として構成される三次元空間としたときの二次元水平面（ x - z 平面）上における見通し外障害物の位置推定を行う。反射面がカメラの視線方向と非平行な一般的な位置関係にある見通し外障害物検出想定環境の真俯瞰図を図 2 に示す。本アプローチでは、まずステレオカメラにより反射面内に写りこむ障害物の虚像（以下、ゴーストと呼ぶ）を捉え、鏡像空間におけるその位置を推定する。次いで、推定されたゴーストの座標を反射面基準で幾何学的に反転させることで、NLOS 領域に存在する障害物の実像位置を導出する。 x - z 平面上において反射面の端点 P_{M1} 、 P_{M2} を通る直線を L_1 とする。また、直線 L_1 に直交し、かつゴーストの座標点 P_3 を通る直線を L_2 と定義する。直線 L_1 と L_2 の交点がゴーストと実像を結ぶ線分の中点（ P_2 ）となる幾何学的性質から、最終的な実像の座標 $P_1(x_1, z_1)$ は一意に決定される。

3.2 アプリケーション例

3.1 で述べた位置推定原理を応用することで、様々な見通し外（NLOS）障害物検出システムの実現が期待される。本節で

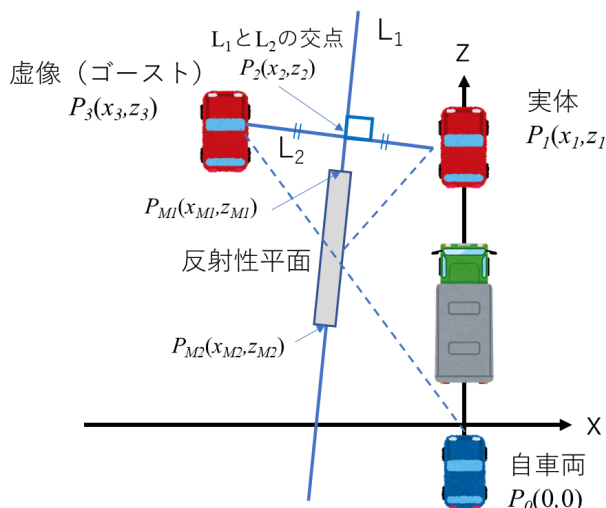


図 2 反射像を用いた見通し外障害物位置推定

は、著者が現時点で想定している NLOS 障害物位置推定原理を活用可能な具体的なアプリケーション例について紹介する。

3.2.1 隣接車両の側面反射画像を利用した先行車両前方の障害物位置推定

前方を走行する大型車両によって視界を遮られている状況において、隣接車線を走行する他車両の側面に、見通し外（NLOS）領域に存在する車両が映り込むケースがある。このような状況の例として実際の道路環境における撮影画像を図 3 に示す。ここで紹介するアプリケーションは、このような状況において先行車両の前方に存在する NLOS 車両の位置を、隣接車両の側面に反射したゴースト（虚像）を利用して推定するものである。図 3 の状況の真俯瞰図を図 4 に示す。実際の交通環境においては、隣接車両からの反射のみならず、路側建物のガラス面などからの反射画像の利用も考えられる。自車から数えて 2 台前方の車両に関する情報を取得することで、更に前方から伝播してくる車両位置や車両速度の変化をより早期に検知できるようになり、より安全な車両制御や運転支援に貢献する。また、取得した情報をほかの車両と共有する協調型運転支援・自動運転システムへと適用すれば、従来の LOS センサのみに頼る場合と比較して、より包括的な周辺環境情報を共有することが可能となる。

3.2.2 見通しの悪い曲がり角における認知領域拡大

図 5 に示すような、曲率半径が比較的小さく先の視界が制限される曲がり角（ブラインドカーブ）のシナリオにおいて、先行車両が曲がり角を通過する際にその側面に映り込む反射像を利用すれば、自車から直接視認できない NLOS 領域をカバーし、認知領域を拡大することが期待される。

同様のシナリオケースでは一般にカーブミラーが設置されて



図 3 隣接車線を走行する他車両側面（図中左側車両）に映り込む見通し外車両

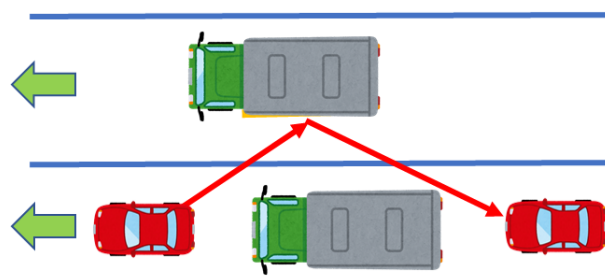


図 4 隣接車線走行車両の側面に反射する見通し外障害車両（真俯瞰図）

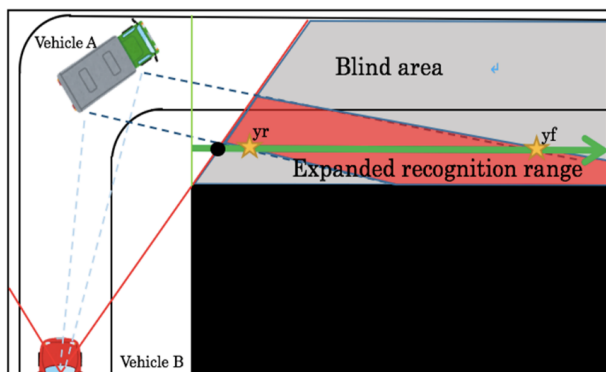


図 5 見通しの悪い曲がり角における認知領域拡大

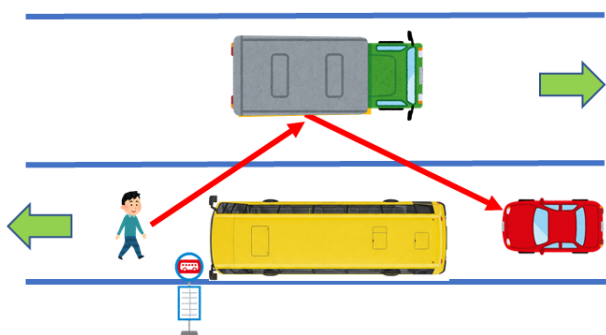


図 6 停車中大型車両前方を横断する歩行者の検知

いることも多い。しかしながら前方を走行する他車両の車体や、路肩の樹木などが繁茂して視線が遮られる場合には、カーブミラーを十分に活用できない。更に、一般的なカーブミラーは凸面鏡であるため、ブラインドカーブの先から接近する他車両の有無は認識できるものの、距離感がひずむためその「正確な位置」を推定することは困難である。これに対し、先行車両の側面（平面）の鏡像を利用する本アプリケーションは、既存インフラの死角や物理的限界を補完し、見通し外への認知領域拡大を実現する。

3.2.3 停車中大型車両前方を横断する歩行者の検知

都市環境において、一時的に路側に停車しているバスなどの大型車両を追い越す際、大型車両前方の見通し外領域となる領域での歩行者との衝突リスクを低減することは重要である。図 6 に本アプリケーションの利用シナリオを示す。大型車両の後方で追い越しの機会（対向車線が途切れるタイミングなど）を待機している自車は、対向車線を走行する他車両の側面に映り込む反射像を利用する。これにより、大型車両前方の見通し外領域を横断する歩行者を事前に検出し、その位置を推定することが可能となる。

対向車が接近・通過するにつれて、その反射面（車体側面）は空間内を連続的に移動する。そのため、対向車の通過に伴い得られる反射情報を時系列で集約・統合することで、あたかも対向車線上に単一の連続した鏡面が存在するかのようになり、大型車両によって遮られた NLOS 領域の障害物（歩行者）情報を取得できる点が本アプリケーションの大きな特徴である。

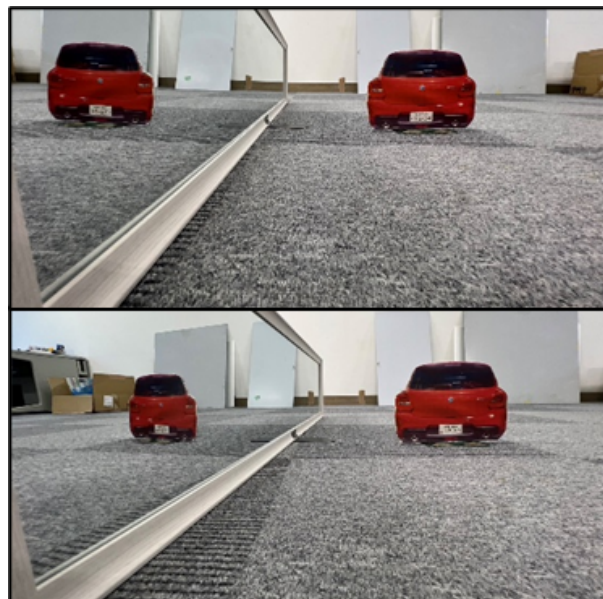


図 7 反射面の角度によるゴーストの映り込みの違い

3.3 基礎原理実証実験

3.3.1 実験シナリオと実験環境

基本原理を実証するため、3.2.1 で述べたアプリケーションを想定した原理確認実験が行われている。実験では、カメラ正面に位置する対象物について、ステレオカメラを用いて直接計測した障害物の位置（以下、直接推定位置）と、反射像から計測した障害物の位置（以下、反射ベース推定位置）との誤差の評価が行われている。

3.2.1 の直線道路における使用シナリオ（図 4）では、自車のカメラ光軸と他車側面の反射面は平行として描かれている。しかし実際の交通環境では、隣接車線の車両が自車と並走している場合であっても、カメラの向きと反射面との間に僅かな角度差が生じる可能性がある。この場合、図 7 に示すように、反射面の向き（角度）によってゴースト（虚像）が反射される位置が変化する。したがって、反射面とカメラ光軸との角度が位置推定精度に及ぼす影響について検証が行われている。実験では照明条件の急激な変動を抑え、再現性を確保するため、実環境の 1/6 スケールに縮小した実験室環境（模擬環境）が構築された。測定対象（ターゲット）には、車両の後方外観を模した 1/6 スケールのパネルが使用されている。実験環境の概略図を図 8 に示す。座標系の原点はステレオカメラシステムの左カメラの中心位置に設定され、 x 軸はステレオカメラの基線方向（横方向）、 z 軸はカメラの視線（奥行き）方向にそれぞれ配置された。ターゲットは自車前方の $x = 0$ 軸上かつ $z = 1.7\text{m} \sim 3.7\text{m}$ の範囲に配置された。反射面には、理想的な平面鏡として長さ 120 cm のミラーが用意され、その中点が線 $x = -40\text{cm}$ 上に位置するように配置された。各測定点では 10 回の繰り返し計測を行い、その平均値及び標準偏差が算出される。鏡の角度を調整する際は、その中心点を中心に回転させ、ターゲットの仮想像（ゴースト）が鏡内に完全に収まるように配置されている。

反射面の様々な向きをシミュレートするため、鏡は地面

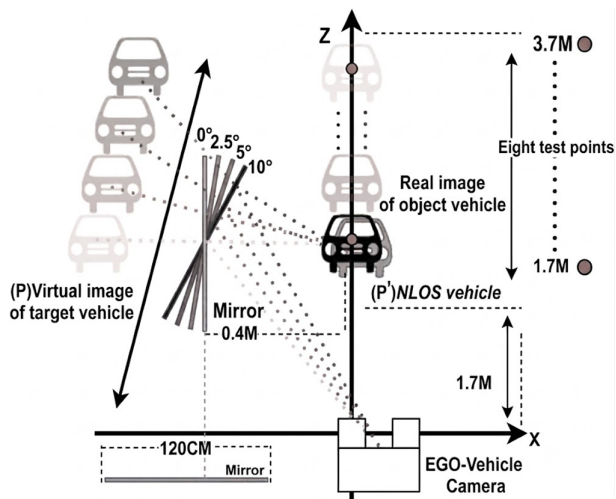


図 8 実験環境概略図

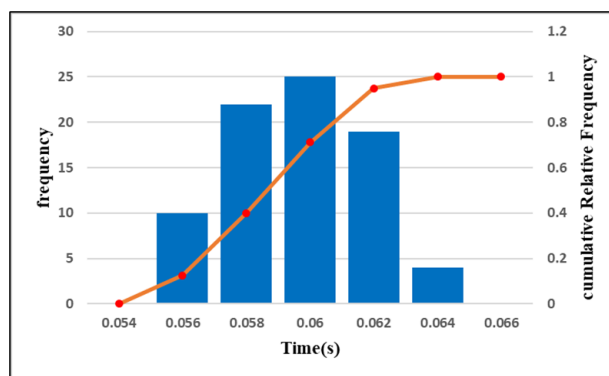


図 9 処理時間のヒストグラムと累積相対度数

に対して垂直な状態を保ちながら、中心軸を中心に角度 $\alpha = 0^\circ, 2.5^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ だけ回転された。各角度構成において、鏡に反射するゴースト（虚像）のステレオ画像を撮影し、位置推定の評価を行った。

3.3.2 処理時間の評価結果

システムのリアルタイム性を評価するため、各フレームにおける処理時間の分布を検証した。測定結果を図 9 に示す。平均処理時間は 1 フレームあたり約 0.059 秒（約 17 fps）であった。処理時間の分布はこの平均値を中心としたほぼ正規分布を示しており、フレームごとの処理時間の変動は極めて小さく、安定した処理性能を維持していることが確認された。

3.3.3 位置推定精度の評価結果

ステレオカメラの光軸上にターゲットを配置し、障害物がステレオカメラから直接視認できる位置（以下、直接推定位置）における位置推定性能の評価結果を図 10 に示す。奥行き方向の誤差 ΔZ は、レーザー距離計で測定した真値に対するステレオカメラの測定値の相対誤差を表す。誤差範囲は約 10 mm から 73.9 mm であり、ステレオカメラに基づく推定は距離が長くなるにつれて精度が低下することを示している。この結果をステレオカメラの基本的な測位性能とし、以降の反射画像を用いた

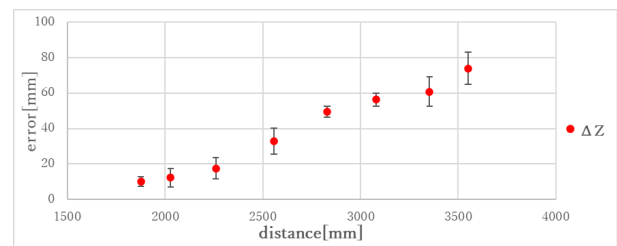


図 10 直接推定位置における奥行き方向誤差

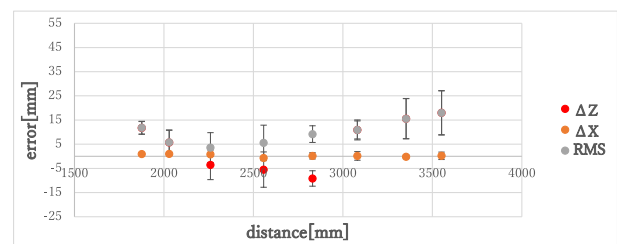


図 11 X 軸と Z 軸の両方における位置推定誤差、及び RMS 誤差 ミラー面回転角度 0° 。

位置推定性能を評価している。

続いて、直接計測（ステレオカメラによる直接撮影）と反射画像に基づく推定値との整合性の評価結果を示す。図 11 に、X 軸と Z 軸の両方における位置推定誤差、RMS（2 乗平均平方根）誤差をそれぞれ示す。各方向の誤差（ ΔX 及び ΔZ ）は、それぞれ直接計測値を基準とした場合の反射画像に基づく推定値の絶対誤差を表している。評価結果より、得られた RMS 誤差の平均値は 3.5 mm から 18 mm の範囲に収まっていることが分かる。これは実スケール（6 倍換算）においては約 0.02 m から 0.1 m に相当する。この誤差は、図 10 に示したステレオカメラ自体の直接計測精度（最大 73.9 mm）と比較しても十分に小さく、反射を利用した位置推定がシステム全体の位置推定精度に大きな悪影響を及ぼさないことを示している。これは理想的な反射条件下における性能基準となり、ミラー面がカメラの光軸方向と平行な場合（ $\alpha = 0^\circ$ ）の NLOS 位置推定における潜在的な精度の高さを示している。

続いて反射面とカメラの視線方向とのなす角（ミラーの回転角 α ）が位置推定精度に与える影響を評価した結果を示す。本評価では、ミラー面を $2.5^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ 回転させ、本提案手法による推定精度への影響を検証している。図 12～14 に、それぞれ X 軸誤差、Z 軸誤差、及び RMS 誤差の測定結果を示す。

それぞれの結果より、X 軸方向の推定誤差は角度 α の増加に伴って増大する傾向があることが分かる。一方、Z 軸方向の誤差は角度の増加に伴って減少する傾向を示した。これは、鏡像変換の基準となる反射面の傾きに依拠して、本来 Z 軸（奥行き）方向に生じるべき誤差成分が X 軸方向へと幾何学的に配分されるためと考えられる。また、RMS 誤差は角度が変化しても約 45 mm で推移しており、ミラーの回転に対して安定している。また、ミラー角度が 10° まで変化した場合でも、システムは実用的な精度を維持しており、Z 軸方向の最大誤差は約 42.6 mm であった。これは実スケール（6 倍換算）で約 0.255 m に相当する。この結果は、他車車体などの反射面が完全にアライメン

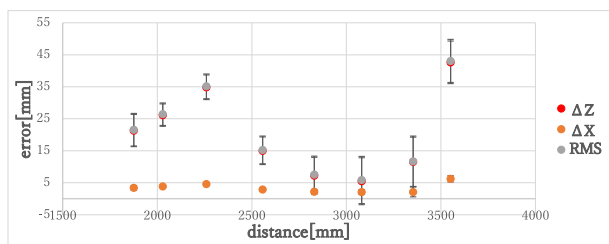


図 12 X 軸と Z 軸の両方における位置推定誤差、及び RMS 誤差 ミラー面回転角度 2.5°.

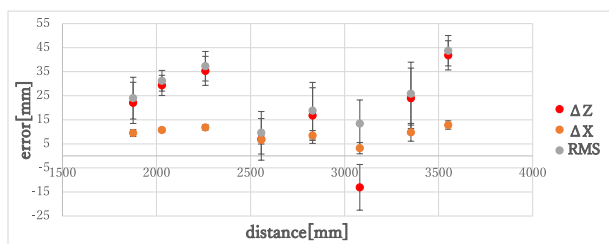


図 13 X 軸と Z 軸の両方における位置推定誤差、及び RMS 誤差 ミラー面回転角度 5°.

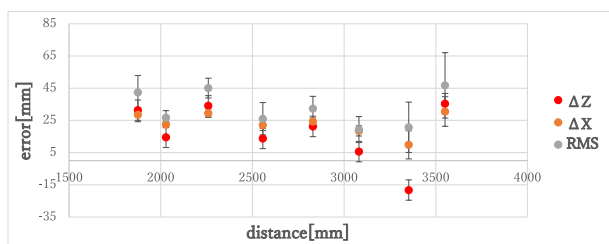


図 14 X 軸と Z 軸の両方における位置推定誤差、及び RMS 誤差 ミラー面回転角度 10°.

ト（並行配置）されていない場合でも本推定法が有効であり、実車換算での誤差が 0.03 m から 0.26 m の範囲内に収まることを示している。したがって、本手法は、環境変動によって反射面の向きが僅かに変化するような実世界の幅広いシナリオにおいて、実用的な見通し外（NLOS）車両位置特定を可能にする。

以上の結果は、提案する反射ベース位置推定法が微小な角度偏差に対しても優れた頑健性を維持することを検証したものであり、ステレオカメラを搭載した実車両への将来的な実装に向けた、基本的な実現可能性を立証している。

4. システム構築

本章では、3.1 で述べた幾何学的な位置推定原理に基づき、開発を進めている見通し外（NLOS）障害物位置推定システムの全体構成及び処理アルゴリズムについて解説する。システムの全体的なフレームワークと一連の処理手順の概要を図 15 に示す。本システムにおける具体的な処理の手順は以下のとおりである。まず、車載ステレオカメラにより、一定のサンプリング周期ごとに左右の周辺画像を同期キャプチャする。これと並行して、ステレオカメラあるいはほかの LOS 障害物検出用センサ（LiDAR など）を用いて車両周辺に存在する反射性平面を特定し、自車両に対する当該平面の相対位置を測定する（LOS 障

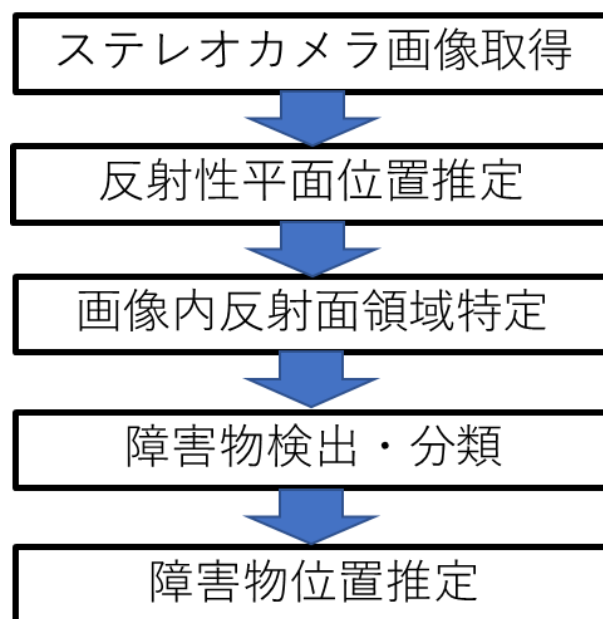


図 15 NLOS 障害物位置推定システムの処理手順

害物検出用センサについては、今後の ADAS や自動運転の普及に伴い多くの車両に標準搭載されることが十分見られるため、本システムとの組み合わせに特段のコストを要せずに利用できると想定している。次に、撮影された左右の画像内において、その反射性平面が映り込んでいる領域を特定する。この際、必要に応じて AI ベースの物体検出技術を適用し、反射性平面内に映り込む障害物のバウンディングボックス及び属性（クラス）の特定を行う。その後、左右の画像における反射平面の領域のみを対象として限定的にステレオマッチング処理を実行し、反射平面領域におけるデプスマップを取得する。最終的に、反射性平面に映り込む障害物の二次元座標とデプスマップの情報をもとに、前述の幾何モデルを用いて、自車両に対する対象障害物の水平面上（X-Z 平面）の座標を一意に推定する。以上のパイプラインにより、インフラや通信に依存しない自律的な NLOS 位置推定の達成を目指す。次節より、これら一連の処理手順の詳細について、各フェーズに分けて詳述する。

4.1 反射性平面の位置特定⁽¹²⁾

本フェーズの主な役割は、周辺環境から「鏡」として機能している反射性平面を自動的に識別し、画像内におけるその投影領域を特定することである。投影領域の特定イメージを図 16 に示す。

本システムにおける反射性平面の基本的な判定アルゴリズムは、見通し内（LOS）位置情報とステレオ計測位置情報の空間的な位置関係に基づいている。まず、LiDAR などの LOS 障害物検出デバイスを用いて、車両周辺に存在する平面オブジェクト（並走車の側面や壁面など）の三次元点群座標を取得する。これと同時に、車載ステレオカメラにより周辺障害物の三次元点群座標を計測する。取得された双方の三次元点群は、車両の走行平面である二次元水平面（x-z 平面）へと投影され、同一平面



図 16 反射面の投影領域の特定イメージ（画面右端）

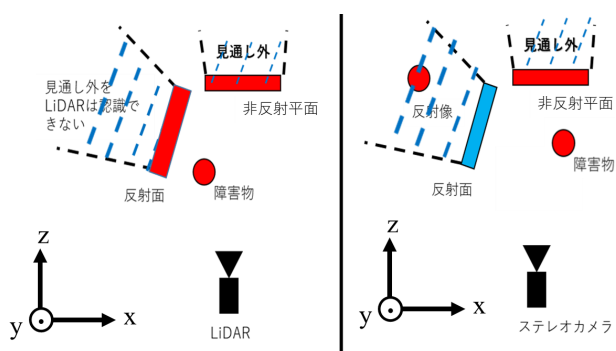


図 17 LiDAR（左）及びステレオカメラ（右）のデバイスで取得される障害物位置情報のイメージ（真俯瞰図）

上での位置関係が比較される。ここでは LOS デバイスとして LiDAR を利用することを想定し、LiDAR 及びステレオカメラそれぞれのデバイスで取得される障害物位置情報のイメージ（真俯瞰図）を図 17 に示す。

このとき、ステレオカメラによって検出された障害物の座標が、LOS デバイスで捉えた平面領域よりも奥に存在する場合、システムは当該平面領域を「反射性平面（ミラー）」、奥方の点群を「反射面に映り込んだゴースト（虚像）」であると識別する。更に、特定された反射性平面（ x - z 平面状の線分）の x , z 座標を含む LOS デバイス点群三次元座標から撮影画像の二次元座標を逆算することで、撮影画像中においてその反射面が占める具体的な投影領域（関心領域：ROI）を算出する。なお、利用 LOS デバイスの選定及びこれらの処理を統合した網羅的なシステム評価については現在検討中であるため、本稿では機能概要の提示に留める。

4.2 反射面における物体検出⁽¹³⁾

4.1 節で特定された反射性平面領域（関心領域：ROI）から見通し外（NLOS）の障害物を認識・識別するにあたり、本システムでは以下の二つのアプローチについて検討を行っている。

アプローチ (a)：塗装面への映り込み画像（反射画像）を大量に収集し、専用の検出モデルを新規に構築して物体検出を行う手法。

アプローチ (b)：反射面の特性を考慮した色調変換をキャプチャ

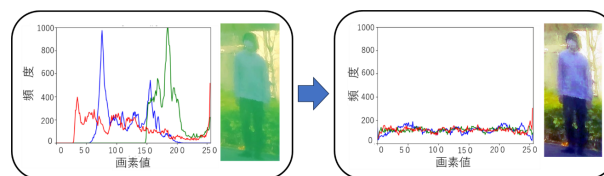


図 18 ヒストグラム平坦化による塗装面反射像の色調変換



図 19 塗装反射面に映り込む人物検出結果

画像に施し、直接撮影された画像に近づけた上で、汎用の大規模既学習モデル（YOLO など）を活用して物体検出を行う手法。

本システムでは、検討の結果アプローチ (b) を採用している。アプローチ (a) のように塗装面の反射画像のみで高精度なモデルを構築するには膨大な学習データが必要となるが、実際の交通環境において対象物が好条件で映り込む画像を大量かつ網羅的に集めることは、多大な手間とコストを伴う。また、検出対象を「歩行者」とする場合には、被写体へのプライバシー保護に関する処理（匿名化処理や被験者への同意取得など）に多大な労力を要するという実用上の大きな課題がある。

文献(13)では、アプローチ (b) に基づいて、反射性塗装平面に映り込む歩行者検出手法を提案している。提案手法では、車体塗装面の色情報が及ぼす影響を緩和するために「ヒストグラム平坦化（均等化）」による色調変換を適用した上で、汎用既学習モデルへと画像を入力する。色調変換を施した画像の一例を図 18 に示す。

この提案手法を用いて、実際の塗装面に歩行者が映り込む画像に対する検出実験を行った。実験の結果、YOLO の既学習モデルをそのまま塗装面反射像に用いた場合には検出が困難であったが、本手法（色調変換前処理）を介することで、高精度に検出可能となることが確認された（図 19）。

4.3 反射面領域のリアルタイムステレオマッチングと位置推定⁽¹⁴⁾

4.2 での物体検出によって反射面内の障害物の存在や属性が確認された後、本フェーズでは、4.1 で得られた反射性平面の映り込み領域（関心領域：ROI）全体を対象として、ステレオマッチング及び幾何変換による三次元位置復元を行う。本フェーズの実装にあたっては、リアルタイム性と環境頑健性を確保する

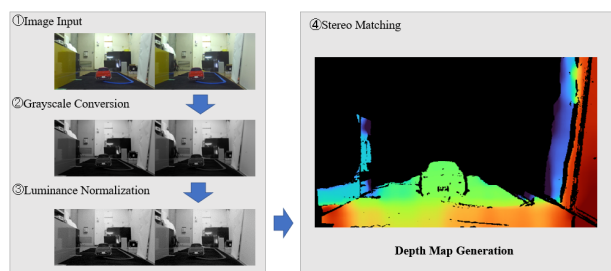


図 20 デプスマップ生成

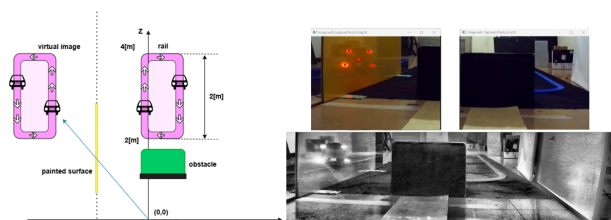


図 21 リアルタイム連続位置推定のための実験環境

ために、以下の二つの課題の解決を図っている。第一の課題は、車載システムにおいて不可欠なマッチング処理の高速化である。これに対しては、GPU ベースの並列コンピューティングによる高速ステレオマッチングアルゴリズムを導入することでリアルタイム性を確保した。第二の課題は、左右画像間における反射像の輝度（明るさ）の不一致に伴うマッチングの失敗である。これは、左右のカメラの僅かな視点差に起因して反射面への入射角・反射角が異なるため、車体塗装面の反射特性によって左右カメラに到達する光量に差が生じることで発生する。この現象に対しては、マッチング処理の前ステージとして、左右の反射面領域内の画像に対し「適応的ヒストグラム変換処理」を施すことで輝度の局所的な偏差を相殺し、マッチングの安定化を達成した。図 20 にステレオカメラからのデプスマップ生成の例を示す。

構築したプロトタイプシステムを用いて、想定道路環境の 1/6 スケールで構成された実験環境における動的な見通し外位置推定性能を評価した結果について述べる。動リアルタイム連続位置推定のため、図 21 に示す周回路を作成し、車両後方パネルを搭載した対象物を周回コース上を走行させる環境を構築した。反射性塗装面を対象物移動方向に平行に配置し、対象物の四角に LED を付け、その重心点を参照点とし、参照点に対応する反射面内の仮想的な三次元座標を測定している。

誤差分析の結果、反射像からの推定位置における全体の標準偏差は 42 mm であった。また、直接視認 (LOS) による推定位置と、反射画像に基づく推定位置との平均誤差は約 61 mm (相対誤差約 2%) に抑えられている。処理速度に関しては、反射像の位置特定に要する平均処理時間は約 100 ms 程度であり、実用的なリアルタイム性を備えた見通し外 (NLOS) 車両位置特定が可能であることを実証している。

5. おわりに

本稿では、車載ステレオカメラと他車車体などの反射性塗装

平面を活用し、死角に遮蔽された見通し外 (NLOS) 障害物の三次元位置を自律的に特定する新しいセンシング技術、及びそのリアルタイムシステムフレームワークについて解説した。

今後は、本システムの実環境への適用や実用化に向け、各処理フェーズにおけるアルゴリズムの更なる検討と様々な環境を想定した性能検証を進める予定である。本技術が死角障害物を検知する有効な車載自律型センシング技術として確立され、見通しの悪い道路における安全性の飛躍的な向上に貢献することを期待する。

文 献

- (1) 上田敏, “AHS (走行支援道路システム) に関する研究開発,” 平 10 土木研講演会, 1998.
- (2) 藤田敦, 梅津高朗, 山口弘純, 東野輝夫, 金田茂, 高井峰生, “車車間通信を用いた車両間協調による周辺車両群の存在把握,” 情処学論, vol.56, no.11, pp.2092–2105, Nov. 2015.
- (3) N. Scheiner, F. Kraus, F. Wei, B. Phan, F. Mannan, N. Appenrodt, W. Ritter, J. Dickmann, K. Dietmayer, B. Sick, and F. Heide, “Seeing around corners with automotive radar,” Proc. CVPR, pp.2068–2077, 2020.
- (4) S. Hayashi, K. Saho, D. Isobe, and M. Masugi, “Pedestrian detection in blind area and motion classification based on rush-out risk using micro-Doppler radar,” Sensors, vol.21, no.10, 3388, 2021.
- (5) X. Yang, S. Fan, S. Guo, S. Li, G. Cui, and W. Zhang, “NLOS target localization behind an L-shaped corner with an L-band UWB radar,” IEEE Access, vol.8, pp.31270–31286, 2020.
- (6) 飯田諒介, 神谷和秀, 孔祥博, 橋本周平, 佐保賢志, “2.4 GHz 帯レーダの回折波を用いた死角領域からの歩行者飛び出し予測の基礎実験検討,” 電学論, vol.144, no.4, pp.404–405, 2024.
- (7) C. Henley, S. Somasundaram, J. Hollmann, and R. Raskar, “Detection and mapping of specular surfaces using multibounce LiDAR returns,” Optics Express, vol.31, no.4, pp.6370–6388, 2023.
- (8) L. Wang, S. Giebenhain, C. Anklam, and B. Goldluecke, “Radar ghost target detection via multi-modal transformers,” IEEE Robotics Autom. Lett., vol.6, no.4, pp.7703–7710, 2021.
- (9) Y. Watanabe, F. Sakaue, and J. Sato, “Time-to-contact from image intensity,” Proc. CVPR, pp.4176–4183, 2015.
- (10) 小野晋太郎, 日野裕介, 須田義大, 板垣紀章, “走行中の車載カメラによる死角領域の状況把握,” 情処学 ITS 研報, vol.2021-ITS-86, no.7, Sept. 2021.
- (11) B. Sheng and Y. Takatori, “Feasibility study of non-line-of-sight obstacle location estimation using reflected images from in-vehicle sensors,” IATSS Res., vol.50, no.1, pp.777–785, April 2026.
- (12) [4] 高取祐介, 白石千歩, 青柳尚, “反射像を用いる見通し外障害物位置推定システムのための反射面位置推定に関する一検討,” 信学技報, vol.122, no.115, ITS2022-5, pp.21–26, July 2022.
- (13) R. Oyama and Y. Takatori, “Object Detection Method for Non-Line-of-Sight Obstacles Reflected on Painted Surfaces,” 2025 IEEE 28th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Gold Coast, Australia, pp.783–788, 2025.
- (14) 盛百立, 高取祐介, “塗装面反射像を用いた見通し外障害物リアルタイム位置推定システム,” 信学技報, vol.124, no.394, ITS2024-100, pp.4–9, March 2025.

(ITS 研究会提案, 2026 年 6 月 1 日受付,
2026 年 6 月 30 日再受付)



高取祐介（正員）

2002 年埼玉大・工・電気電子システム工卒，2004 年同大大学院理工学研究科博士前期課程了，2007 年同大大学院理工学研究科博士後期課程了。同年 4 月東京理科大・工・助教，2012 年神奈川工科大・工・助教，2015 年同大工・准教授を経て現在に至る。主として高度交通システムに関する研究に従事。

2026 年電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会開催報告

2026 年電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会実行委員長 杉谷栄規



1. 開催概要

NOLTA ソサイエティ（以下、NLS）が主催する「2026 年電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会」（以下、NLS 大会）が、2026 年 6 月 13 日（土）に対面形式で開催されました。

- ・開催日：2026 年 6 月 13 日（土）
- ・場 所：大阪公立大学 I-site なんば
- ・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 杉谷栄規（大阪公立大学）
 - 総務・庶務 吉田晃基（大阪公立大学工業高等専門学校）
 - 会計 井岡恵理（芝浦工業大学）

2. 開催状況

2026 年 NLS 大会には、全 133 名（招待：10 名、一般：52 名、学生：71 名）の方々にご参加頂きました。また、本大会に先立つ 6 月 11 日（木）、12 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）が同会場において共催され、それに引き続く形で本大会が開催されました。

本大会のタイムテーブルを表 1 に示します。はじめに、大会実行委員長の杉谷栄規（大阪公立大学）から開会の挨拶があり、続いて、2026 年度 NLS 会長の小西啓治先生（大阪公立大学）からご挨拶を頂きました。次に、NLS が主催する国際会議「NOLTA2026」及び「NOLTA2027」について、荒井伸太郎先生（岡山理科大学）及び木村貴幸先生（東京都市大学）より、それぞれ準備状況をご報告頂きました。

続いて、電子情報通信学会フェロー記念講演として、長谷川幹雄先生（東京理科大学）より「Nonlinear Theory and Its Applications in Wireless Communications」、夏目季代久先生（九州工業大学）より「脳と脳波とブレインマシンインターフェイス」と題するご講演を頂きました。いずれの講演も、長年にわたる研究成果と今後の展望を示す大変興味深い内容でした。

その後、二つのポスターセッションが行われ、全 76 件の発表について活発な議論が交わされました。午後には、NLS が発行する国際学術論文誌 *Nonlinear Theory and Its Applications*、IEICE の現状について、編集委員長の上田哲史先生（徳島大学）よりご報告頂くとともに、NOLTA、IEICE Best Paper Award の授賞式及び記念講演が行われました（表 2）。

続いて、NLP 及び CCS の年次報告と研究会奨励賞の授賞式が執り行われました。最後に、2026 年 NOLTA ソサイエティ大会奨励賞の授与式が行われ、2 名の受賞者に賞状が授与されました（表 3）。大会実行委員長による閉会の挨拶と集合写真の撮影をもって、本大会は盛会のうちに終了しました。

表 1 2026 年 NLS 大会タイムテーブル

開始	終了	イベント	プレゼンター
9:30	9:35	開会の挨拶	2026 年 NLS 大会実行委員長 杉谷栄規 (大阪公立大学)
9:35	9:40	NOLTA ソサイエティ会長挨拶	2026 年度 NOLTA ソサイエティ会長 小西啓治 (大阪公立大学)
9:40	9:50	NOLTA2026 について	NOLTA2026 Publicity Chair 荒井伸太郎 (岡山理科大学)
9:50	10:00	NOLTA2027 について	NOLTA2027 General Chair 木村貴幸 (東京都市大学)
10:00	10:30	電子情報通信学会フェロー記念講演	令和 6 年度フェロー 長谷川幹雄 (東京理科大学)
10:30	11:00	電子情報通信学会フェロー記念講演	令和 7 年度フェロー 夏目季代久 (九州工業大学)
11:05	11:55	ポスター発表 (セッション A)	
12:00	12:55	ポスター発表 (セッション B)	
14:15	14:25	NOLTA Journal の現状について・授賞式	2026 年度 NOLTA 誌編集委員長 上田哲史 (徳島大学)
14:25	14:50	NOLTA Journal Best Paper Award 記念講演	大森敏明 (神戸大学)
14:50	15:05	非線形問題研究専門委員会 年次報告・奨励賞授賞式	久門尚史 (京都大学)
15:05	15:20	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・奨励賞授賞式	上山憲昭 (立命館大学)
15:20	15:30	2026 年 NOLTA ソサイエティ大会 奨励賞授与式	2026 年 NLS 大会実行委員長 杉谷栄規 (大阪公立大学)
15:30	15:40	閉会の挨拶・写真撮影	

表 2 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
Hirozo Nakano (Kobe University), Amitava Majumdar (University of California San Diego), Toshiaki Omori (Kobe University)	Data-driven estimation of spatial electrical property of multi-compartment models with neuronal morphology by replica exchange Monte Carlo method	Vol. 15, No. 2, pp. 389-403, 2024

表 3 2026 年 NOLTA ソサイエティ大会奨励賞受賞者

受賞者	発表タイトル
Taishi Segawa (Tokushima University)	Response Characteristics of a Chaotic Circuit with a Memristor Under Different Input Durations
澤田和弥 (東京理科大学)	リカレンスプロットによる時系列のみからの力学系の識別

3. おわりに

本大会には多くの方々にご参加頂き、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・ポスター発表を頂いた皆様、聴講参加された皆様、並びに大会運営にご協力頂いた皆様に深く感謝申し上げます。次回の NOLTA ソサイエティ大会にも、ふるってご投稿・ご参加下さいますよう、よろしくお願い申し上げます。



長谷川幹雄先生（東京理科大学）によるフェロー記念講演



夏目季代久先生（九州工業大学）によるフェロー記念講演



NOLTA ソサイエティ大会奨励賞受賞
澤田和哉先生（東京理科大学）



NOLTA ソサイエティ大会奨励賞受賞
Taishi Segawa さん（Tokushima University）



杉谷栄規（正員）

2016 年大阪府立大学大学院博士後期課程修了、博士（工学）。同年茨城大学助教、2019～2020 年 Northwestern University 客員研究員、2022 年茨城大学講師、2023 年大阪公立大学准教授、現在に至る。非線形システムの制御及びその応用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？

■信号処理研究会（SIP）

第 40 回信号処理シンポジウム開催報告（2025 年 11 月 25 日～27 日開催）

電子情報通信学会信号処理研究専門委員会では，毎年秋に信号処理シンポジウムを開催しています。本シンポジウムは，日本における信号処理分野最大規模の研究集会として，基礎理論から応用技術まで幅広い研究成果の発表と討論を行う場であり，大学・企業・研究機関の研究者や学生が一堂に会する重要な研究交流の機会となっています。本稿では，第 40 回信号処理シンポジウムについて報告します。

1. 第 40 回信号処理シンポジウムについて

第 40 回信号処理シンポジウムは，2025 年 11 月 25 日から 27 日までの 3 日間，茨城県水戸市のホテルレイクビュー水戸において開催しました。今回は第 40 回という節目の開催となり，口頭発表 63 件，ポスター発表 56 件，合計 119 件の研究発表が行われました。参加者は 184 名に達し，全国から多くの研究者・学生が集まり，盛況なシンポジウムとなりました。

開催地である水戸は，弘道館をはじめとする学術・文化の歴史を有する都市であり，本シンポジウムもそのような学問の地にふさわしい研究交流の場となりました。実行委員会は茨城大学を中心として構成し，電子情報通信学会信号処理研究専門委員会との連携のもと運営を行いました。

2. 開催概要

本シンポジウムでは，適応信号処理，画像・映像処理，音声・音響処理，通信・知能信号処理，生体信号処理，AI・IoT・ネットワーク，レーダ・センシングなど，信号処理分野を幅広く網羅する口頭・ポスターセッションを企画しました。各セッションでは，最新の研究成果について活発な発表と討論が行われ，特にポスターセッションでは学生や若手研究者を中心に，時間を超えて議論が続く場面も多く見られました。

今回のシンポジウムでは，2 日目午後に 3 件の特別招待講演と 1 件の特別企画・企業セッションを実施しました。特別招待講演では，Mathews Jacob 教授（University of Virginia）による MRI 画像再構成に関する最新の数理モデル，京セラ株式会社の宝珠山治氏による非線形エコー抑圧技術，更に図のように茨城大学岡田誠教授による地質年代「チバニアン」と地磁気逆転に関する講演を実施しました。いずれも信号処理の応用範囲の広さを示す内容であり，多くの参加者が熱心に聴講しました。

また，特別企画・企業セッションでは，MathWorks Japan による「信号処理研究者の MATLAB 活用法」を開催しました。研究開発における MATLAB の最新機能や活用事例が紹介され，産学双方の参加者による活発な意見交換が行われました。本セッションは企業と研究者をつなぐ企画として大きな関心を集め，実践的な研究開発環境について理解を深める機会となりました。



図 茨城大学岡田誠教授による特別招待講演

このほか、MathWorks Japan、デンソーアイティラボラトリ、網屋の各社よりスポンサーとして御支援を頂き、産学連携の側面からも充実したシンポジウムとなりました。

第40回という節目を迎えた本シンポジウムでは、AIや機械学習をはじめとする新しい研究分野と従来の信号処理技術との融合が数多く見られ、信号処理分野の更なる発展を感じさせる研究討論の場となりました。

なお、第41回信号処理シンポジウムは2026年11月に開催される予定です。詳細は電子情報通信学会信号処理研究専門委員会より案内されますので、多くの皆様に御参加頂き、活発な研究発表と討論が行われることを期待しております。



武田茂樹 (正員)

平8鳥取大学・工・電気電子卒、平12同大学院博士後期課程了。博工。現在、茨城大学工学部電気電子システム工学科教授。無線通信システム、アダプティブアレーアンテナ、RFIDの研究に従事。

■超音波研究会 (US)

超音波研究会 (US) は、超音波に関する基礎研究から応用技術までを広く対象とする学術交流の場です。基礎物理、材料・デバイス、計測、医療、非破壊検査、水中応用など多彩な分野を扱い、研究者、技術者、学生が分野を越えて活発に議論しています。電子情報通信学会、日本音響学会、IEEE UFFC Japan Chapter の共催で運営されています。多くの方に参加頂けるよう、研究会は全国各地で開催されており、オンライン開催も取り入れています。2025年度は東京、京都、仙台、熊本、オンラインなどで開催され、年間で75件の発表が行われました。

本研究会の大きな魅力は、各回で関連する学協会と幅広く連携している点にあります。非線形音響学会、海洋音響学会、日本レオロジー学会、日本超音波医学会、レーザー学会、日本非破壊検査学会など、周辺分野との共催を通じて、異なる専門や立場の参加者と交流し、新しい視点や発想を得ることができます。専門に近い発表から直接学べることはもちろん、少し異なる分野の研究に触れることで、自身の研究を広げるきっかけにもなります。また、学生による優れた発表には学生研究奨励賞が授与され、若手研究者の挑戦を後押ししています。

新しい知見に出会い、研究の可能性を広げる場として、ぜひ超音波研究会にご参加ください。研究会の最新情報はこちらのURLからご確認頂けます。

<https://www.ieice.org/~us/>



垣尾省司 (正員)

1992 東北大・大学院修士課程了。2000 博士 (工学) (東北大)。現在、山梨大・教授。弾性波デバイスの高性能化に関する研究に従事。IEEE、日本音響学会、電気学会、化学工学会、日本工学教育協会各会員。2026年度超音波研究専門委員会委員長。

■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。近年の講演発表では、EDA、設計最適化、高位合成、FPGA 応用、低消費電力・耐放射線設計、Computation-in-Memory などの新デバイス・新アーキテクチャに加え、AI、イジングマシン、量子コンピューティングなどのエマージングコンピューティングを支える設計技術やアルゴリズムも活発に議論されています。

VLD 研究会は、年4回の研究会を開催しています。2026年度の第1回研究会は、6月11日から12日に沖縄県青年会館で、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研究会の共催により開催されました。第2回研究会は、2026年12月2日から4日にかけて、札幌市教育文化会館にて開催予定です。「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ます。今年の共通テーマは「生成AIが拓くLSI設計の新潮流と人材育成」です。一般講演に加え、産学からの興味深い招待講演も予定されています。第3回は2027年1月に横浜でRECONF研究会と、第4回は3月に沖縄でICD研究会、HWS研究会と共催予定です。

VLD 研究会の大きな特徴は、大学の先端研究と企業の実設計の知見が同じ場で交わり、活発な議論と交流が生まれることです。

更に、「優秀技術報告賞」「優秀大会講演論文賞」、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」などを通じて、若手研究者の活躍を積極的に表彰しています。半導体技術が DX/AI 時代の中核技術として注目される中で、VLD 研究会は、設計技術の深化と分野横断的な発展を促す活気ある交流の場です。ぜひご参加頂き、研究発表や議論を通じて本分野の広がりを感じて頂ければと思います。

VLD ホームページ：<https://www.ieice.org/~vld/>



宮村 信 (正員)

2002 東京大学工学系研究科修士課程修了。同年、日本電気株式会社入社。現在、ナノブリッジ・セミコンダクター社においてデジタル回路設計、不揮発 FPGA 及びその EDA 開発に従事。2026 年度 VLSI 設計技術研究専門委員会委員長。

■非線形問題研究会 (NLP)

非線形問題研究会 (NLP) は、その名前のとおり、線形性に基づく解析や設計から飛び出し、新たな枠組みで議論しようという研究会です。ご存じのように、線形性は非常に強力な性質であり、あらゆる分野の理論のベースとなる構造です。一方で、非線形の世界は、それよりはるかに自由度が高く、未知の領域が広がっています。現在生成 AI として注目されているニューラルネットワークもその非線形の自由度を活用した手法です。

非線形問題研究会では、数学・物理学・工学・経済学など、あらゆる分野において、その非線形性に注目した議論を行っています。そこでは、論文にするには未完成な研究速報的発表も含め、理論、実験、応用などの研究成果の発表が行われます。若手の発表が多いのも特徴ですので、初めての方もぜひ一度発表をご検討頂ければと思います。

研究会は毎年全国を回って開催しており、本年度の開催地は下記となっています。

- 6 月：大阪
- 7 月：佐渡
- 10 月：対馬
- 12 月：雲仙
- 1 月：相模原 (JAXA)
- 3 月：奈良

詳細は Web ページ (<https://www.ieice.org/~nlp/>) をご覧ください。研究会で皆様にお会いできることを楽しみにしております。



6 月の NLP-CCS 合同懇親会



久門尚史 (正員)

1995 京大・工・電気電子卒。1997 同大学博士後期課程修了。博士 (工学)。現在京都大学大学院工学研究科電気電子デジタル理工学専攻特定教授。遅延電磁結合を含む回路、P2P エネルギー伝送、グラフニューラルネットワークなどの研究に従事。IEEE 会員。2026 年度非線形問題研究専門委員会委員長。

■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 年度に発足しました。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、近年の研究会では、AI 技術の様々な分野への応用に関する議論がますます活発になっています。

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、また近年では、これらの知的ロボット応用などを含む、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考えております。皆様の研究が横断的であったり、システムを作ってみたもののどこで発表してよいか分からなかったりする場合には、ぜひ SIS 研究会での発表を御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、年 4 回の研究会及び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。2026 年度は、6 月 4、5 日にいわき産業創造館において、現地とオンラインによるハイブリッド形式で研究会を開催しました。10 月 8、9 日には鹿児島大学において、同じくハイブリッド形式で映像情報メディア学会放送技術研究会 (ITE-BCT) との連催を予定しています。今後の研究会についてもハイブリッド形式を基本としており、これまで SIS 研究会に参加したことのない方にも気軽に御参加頂ける研究会となっています。

各回の研究会では、主に大学学部生や博士課程学生を対象としたチュートリアル講演を実施し、最新の研究内容を分かりやすく解説しています。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されていますので、そちらも御覧頂き、皆様の研究に役立てて頂ければと思います。また、若手研究優秀賞を設け、優れた研究発表を行った若手研究者を表彰しています。多くの学生及び若手研究者の皆様の発表を期待しています。

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 を開催しています。本ワークショップは、大学院生を含む若手研究者に国際会議の場を体験してもらい、他国の研究者と積極的に交流して頂くことを主眼に置いたワークショップです。学生発表者を対象とした Student Paper Award も設けています。次回の SISA2027 は、2027 年 12 月に北海道千歳市で開催する予定です。

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 (<https://www.ieice-sis.org/>) を御参照ください。様々な分野からの御発表と御参加を心よりお待ちしております。



田向 権 (正員)

2006 九州工業大学大学院生命体工学研究科博士後期課程修了。博士 (工学)。現在、九州工業大学大学院生命体工学研究科教授。主に、脳型計算機システム、デジタル集積回路、ソフトコンピューティング及びホームサービスロボットに関する研究に従事。2026 年度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。

■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、音の録再生や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・スピーカ、音源の方向・位置の推定、音源分離、雑音・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・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。2025 年度実績として、通年で発表 186 件 (前年比 ± 0 件)、参加者数 485 名 (前年比 -74 名) を達成し、2025 年度研究会も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 105 件 (前年比 -4 件)、参加者 207 名 (前年比 $+20$ 名) を集めました。

2026 年度も、2025 年度と同様に 6 回の開催を予定しており、5 月北海道、7 月オーストラリア (NZ)、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・地区にて現地世話役や共催する他研究会とともに開催を企画しております。特に 2026 年度は、7 月に 9 年ぶり 2 度めとなる海外開催 (オーストラリア大学, NZ) を実施し、発表 17 件と参加者 52 名 (うち日本からの参加者 16 名) を集めました。更に 2026 年度より、新たに「応用音響研究会 学生研究奨励賞/学生研究優秀賞」選奨規程を制定し、優れた発表を行った学生を支援する仕組みを強化しました。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。2025年より応用音響研究専門委員会(EA)委員長。

■技術と社会・倫理研究会 (SITE)

技術と社会・倫理研究会 (Social Implications of Technology and Information Ethics, SITE) では、情報通信や工学一般に関する倫理問題を中心として、情報リテラシー、知的財産権、情報セキュリティなど、種々の分野を対象として講演発表、意見交換を行っています。例年原則として6月 (IPSJ-EIP 共催)、7月 (セキュリティサマーサミット)、11月~12月 (IPSJ-CE 共催)、3月 (IA, IPSJ-IOT 共催) に研究会を開催しており、2026年6月の研究会では会場校として共催の立教大学 AI 研究科の大庭弘継先生に招待講演「軍民両用化する情報技術」でデュアルユース問題を論じて頂きました。また研究発表として、「素朴概念 (naive concept) としての社会受容」「北川敏男にみる戦後日本のサイバネティクス受容」「宗教 AI の現状」「アジア太平洋地域における高等教育機関向け AI 教育に関する提言」「若年層向け生成 AI リテラシー・倫理教育の設計原理」「Society 5.0 における法のほころびとシステム要件の適合性の解決について」などが行われました。連催を引き受けられた IPSJ EIP 研究会からも各国の AI 法政策やサイバネティック・アバターの社会実装における課題などのご発表を頂き、議論が大いに進みました。また、2026年7月にはセキュリティサマーサミットに参画し、「日本における AI ガバナンスをめぐる法規制の体系的考察」「EU クラウド主権フレームワークの構造と展開」「ブロックチェーン・DLT 基本用語 100」などの研究発表を行いました。

当研究会は学際研究の要として、他研究会との共催や、他学会の他研究会との連催を積極的に行っており、知的財産では IPSJ-EIP、情報セキュリティでは ISEC、BioX、HWS、ICSS、EMM、IA、IPSJ-CSEC、IPSJ-SPT、JSAI-SEC、教育関係では IPSJ-CE と議論を深めております。最新の情報は、<https://www.ieice.org/ess/site/> をご覧ください。

会員の皆様、研究者の皆様の御発表・御参加をお待ちしています。



村上祐子 (正員)

1991 東京大学教養学部教養学科科学史及び科学哲学分科卒業。2005 インディアナ大学 PhD (philosophy)。現在、立教大学大学院人工知能科学研究科・教授。人工知能の哲学・倫理、人工知能の社会受容、情報教育などを研究している。2025 年度技術と社会、倫理研究会副委員長。

国際会議開催報告

IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT2026, <https://2026.ieee-isit.org>)

Guangzhou Yuexiu International Congress Center, Guangzhou, China

2026年6月28日～7月3日

2026年6月28日から7月3日にかけて、中国・広州市において、2026 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT2026) が開催されました(図1)。ISITは、IEEE Information Theory Societyが毎年開催している情報理論分野の代表的な国際会議で、情報理論、符号理論、通信理論、信号処理、機械学習、セキュリティ、量子情報理論など、情報に関わる幅広い分野の研究者が一堂に会します。

初日には7件のチュートリアル講演とウェルカム・レセプションが行われました。私は、最近興味をもっている Large Language Model (LLM) とセマンティック情報理論に関する、次の二つの講演を聴講しました。

- ・ Shao-Lun Huang and Yingbin Liang, Mathematical Theory of In-Context Learning and Chain-of-Thought Capability in Transformers
- ・ Lingyang Song, Qingyu Liu, Hongliang Zhang, and Shuhang Zhang, Beyond Bits: Semantic Information Theory and Methods

前者は、LLMに関する話題の中でも、特に In-Context Learning (ICL) と Chain-of-Thought (CoT) について、情報理論的な概念や手法を用いて理論解析や解釈を行う内容でした。会場には立ち見が出るほど多くの聴講者が集まっており、情報理論コミュニティにおいても非常に関心の高いトピックであることがうかがえました。その後のウェルカム・レセプションでも、LLMを研究活動にどのように活用しているかが話題になりました。研究に積極的に活用しているという人もいれば、全く利用していないという人もおり、その利用状況は研究者によって千差万別のようなのでした(ちなみに私は、研究上のディスカッション、証明のアシス

タント、原稿の校正などに積極的に活用しています)。

LLMが急速に研究活動の中に入りつつある現在、情報理論の研究者がこれをどのように捉え、どのように利用しているのかを直接聞くことができたのも興味深い経験でした。後者の講演は、Weaverが整理した有名な通信の三つのレベルの問題、

- ・ Level A: Technical problem
➤記号をどれだけ正確に伝送できるか
- ・ Level B: Semantic problem
➤伝送された記号が、意図された意味をどれだけ正確に伝えるか
- ・ Level C: Effectiveness problem
➤受け取られた意味が、望ましい行動・効果をどれだけ生じさせるか

の紹介から始まりました。Shannonの情報理論では主として Level A の問題が扱われますが、セマンティック情報理論では、その先にある Level B、更には Level C の問題をどのように数学的に扱うかが重要になります。講演では、特に Level B に関連する基礎的な結果が紹介され、伝送される記号そのものではなく、その背後にある意味を評価対象とすることで、より効率的な通信や圧縮が可能になることが示されていました。セマンティック通信という言葉は近年よく耳にするようになりましたが、それを情報理論としてどのように定式化するのかという観点から、非常に興味深い内容でした。

2日め以降の朝にはプレナリー講演及び Shannon Lecture が行われました。講演者と表題は次のとおりです。

- ・ Wen Tong, On the Capacity Scaling in Wireless Communications-Past and Future 30 Years
- ・ Tara Javidi, From Source Coding to Active World Models: Information Theory of Physical Intelligence
- ・ Emanuele Viterbo, Nanopores, Bases, and Bits: An Information Theorist's Guide to DNA Storage
- ・ Frans Willems, The Context-Tree Weighting Algorithm as a Language Modeler
- ・ Giuseppe Caire, The Information Theory of ISAC

今年の Shannon Lecture は、Frans Willems 教授による Context-Tree Weighting (CTW) に関する講演でした(図2)。CTWは、ユニバーサル符号化や文脈木モデルに関する重要な手法として知られています。講演では、まず二値情報源に対する CTW の基本的な考え方が説明され、その後、テキスト情報源への応用や生成モデルとしての側面についても解説されており、大変分かりやすく興味深い講演でした。

各プレナリー講演の後には一般セッションが行われ、筆者



図1 会場前の看板

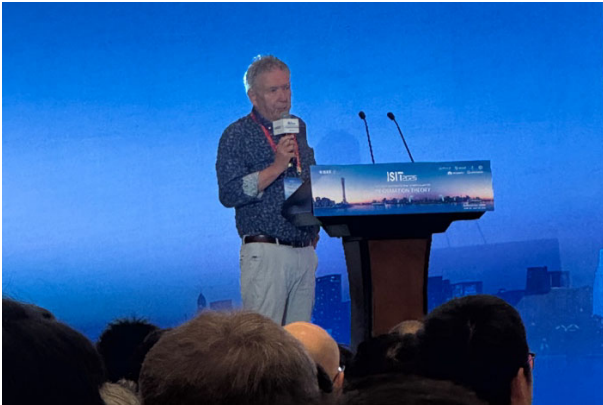


図2 Frans Willems 教授による Shannon Lecture



図4 Li Chen 共同実行委員長による「オールド・ラング・サイン」の歌唱



図3 Banquet の料理

がプログラムから数えた限りでは、合計 570 件、最終日のワークショップの講演を含めると 620 件ほどの発表があったようです。また、開催地が中国であることもあって、中国の大学・研究機関からの参加者が多いように感じました（ちなみに日本からの参加者は 15 名ほどでした）。私は主に、関心のある Privacy と Information Measures に関連するセッションを行き来していました。二つの分野は一見すると別のテーマにも見えますが、聴講者の顔ぶれにはかなりの重なりがあり、「研究上の興味というものは自然と近いところに集まるのだな」と実感しました。私は火曜日午後の“Leakage Measures and Privacy Composition Theorems”セッションで発表を行ったのですが、発表終了直後に、台湾の大学に所属する学生と思われる参加者から声をかけられ、私が最近投稿した別の論文についても質問を受けました。自分の論文を読んでくれている海外の研究者と、その場ですぐに議論できるというのは興味深い経験でした。このような予定されていない対面でのコミュニケーションが生まれることも、国際会議に現地参加する楽しさの一つであると改めて実感しました。

セッション以外の催しとしては、火曜日に Award Session があり、林正人教授及び山崎隼汰准教授と、Ludovico

Lami 教授による一般化量子 Stein の補題に関する研究に対して、Information Theory Society Paper Award の受賞が発表されました。また、木曜日の夜の Banquet では、今年の Shannon Award 受賞者が Andrea Goldsmith 教授であることがアナウンスされたほか、豪華な料理（図 3）や実行委員長による歌唱パフォーマンス（図 4）などで会場は大いに盛り上がりました。

最後に、来年の ISIT2027 はソレント（イタリア）での開催が予定されています。ISIT に参加すると、最新の研究動向を知ることに加えて、研究に対する刺激を得られるので、来年も参加しようと思います。

鎌塚 明（正員）



平 24 早大・基幹理工・応用数理卒。平 30 同大学院数学応用数理専攻博士後期課程了。博士（工学）。同年、同大グローバルエデュケーションセンター・講師に着任。

現在、湘南工科大学・准教授。情報理論、統計的決定理論、プライバシー保護、データ科学の研究に従事。

国際会議開催報告

The 41st International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications

(ITC-CSCC 2026, 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)

Royal Orchid Sheraton Riverside Hotel Bangkok, タイ

2026 年 7 月 7 日～10 日, <https://itc-cscc2026.ecti-thailand.org/>

第 41 回 ITC-CSCC 2026 は、2026 年 7 月 7 日から 10 日にかけて、タイ・バンコクにて開催されました（図 1）。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、IEICE ESS, IEIE（韓国）、ECTI（タイ）が共同主催し、毎年、6 月下旬から 7 月中旬の期間で開催されています。

今回の会議では、上述の主催 3 か国に加え、バングラデシュ、カンボジア、中国など 19 か国から 378 名の参加者でした。発表論文数は、スペシャルセッション、レギュラーセッション、ポスターセッション、合計 351 件でした。プログラム構成としては、22 のスペシャルセッション、13 のレギュラーセッション、ポスターセッションがありました。

全体企画の Plenary Talk は 3 件あり、韓国科学技術院 (KAIST) 教授である Chang D. Yoo 氏による “The Agentic Shift: From Passive Models to Autonomous Actors”, 日本の湘南工科大学の教授である岡崎秀晃氏による “A Mathematical Model Including a Typed Higher-Order Logic Model for Updating Prompts of Generative AI, Its Applications, and an Academic Patent Strategy”, タイのマヒドン大学の教授である Yodchanan Wongsawat 氏による “Thai Researchers on the Global Stage: Perspectives, Opportunities, and Strategic Expectations”, でした（図 2）。

チュートリアル講演も 3 件あり、韓国 Ewha Womans 大学の Seongjae Cho 氏による “Recent Advances in Capacitorless DRAM Technology towards Logic

Compatibility”, 日本の富山県立大学の榊原一紀氏による “Hybrid Approaches to Mathematical Programming and Metaheuristics for Large-Scale and Highly Constrained Optimization Problems”, タイ Khon Kaen 大学の Chayada Surawanitkun 氏による “Electrical Engineering Innovation for Sustainable and Intelligent Society” でした。

3 日め夜に Banquet が開催され、最初は、ホテル内のメイン会場にてタイの伝統的なダンスが披露され、その後、チャオプラヤ川の大型クルーズ船へ乗り移り、食事をしながら歓談し、お互いの交流を深めていました（図 3）。

会議全体をととした全てのセッションにおいて、活発な議



図 2 岡崎先生による Plenary Talk の様子



図 1 メイン会場の様子



図 3 Banquet の様子

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、第42回は、2027年7月6日から9日に、韓国の釜山にて開催される予定です。

ホームページは既に公開されています。

<https://www.itc-cscc2027.org/2027/>



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、副学長、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。

電子情報通信学会に関連する賞を受賞された方を御紹介します。

第 82 回（令和 7 年度）論文賞

令和 7 年度は学会全体で 12 編の論文が論文賞を受賞しました。そのうち、基礎・境界ソサイエティでは 3 編の論文が受賞しています。受賞した 3 編の論文の著者にインタビューしました。

中山翔太（北海道大学）、小林孝一（北海道大学）、山下 裕（北海道大学）

[A Common Lyapunov Function Approach to Event-Triggered Control with Self-Triggered Sampling for Switched Linear Systems]⁽¹⁾

Q. 論文賞を受けられた御感想をお聞かせ下さい。

このような名誉ある賞を受賞できて大変光栄です。編集委員会の皆様をはじめ、関係する全ての皆様に深く感謝申し上げます。

Q. 論文賞を受けられた御研究について教えて下さい。

大規模な物理的システムでは、制御器が通信ネットワークを介して計測データを収集し、制御入力を計算することがあります。例えば植物工場では、温度計、湿度計や照度計の計測データを基に、エアコンや植物に与える水量を調整します。一般にはサイバーフィジカルシステムと呼ばれるこの制御系の枠組みでは、通信回数の削減が重要となります。

本研究では、スイッチドシステムというダイナミクスが切り替わるシステムに対して、自己駆動サンプリングと事象駆動制御を組み合わせた新しい制御方法を提案しました。この方法では、現在の計測データに基づき次に計測する時刻を計算し、センサに指示します（自己駆動サンプリング）。制御器がセンサから計測データを受信すると、制御入力の更新有無を判定します（事象駆動制御）。制御入力の更新が必要な場合は、制御入力を制御対象に送信したうえで、次に計測する時刻を計算します。制御入力の更新が不要な場合は次に計測する時刻を計算します。この手順を各時刻で実行することで、通信回数を抑制しつつ高性能な制御が実現できます。

Q. 現在、御興味をもたれている研究テーマを教えてください。

Transformer などの深層学習モデルを用いたサイバーフィジカルシステムの制御に興味をもっています。AI を活用しつつも制御性能を厳密に保証する方法の開発に興味をもっています。（小林）



中山翔太氏



小林孝一氏



山下 裕氏

Q. 今後の抱負をお聞かせ下さい。

どの分野でも多かれ少なかれ AI をどのように使うかが重要になっていると思います。私の専門はシステム制御理論ですが、AI を使うのか？ AI に取り込まれるのか？ がむずかしい時代になっています。より個性的で尖った研究が求められているように感じています。新しいことを取り込みつつ、自分を見失わないように研究を進めたいです。（小林）

Q. 読者へのメッセージをどうぞ！

私は、普段はシステム数理と応用研究会（MSS）と高信頼制御通信研究会（RCC）によく参加しています（2026、2027 年は RCC の委員長を担当しています）。大会や研究会で会えることを楽しみにしています。（小林）

潮 俊光（南山大学）

[Shield-Based Safe Control with Compensation of Computation Delays of Nonlinear Discrete-Time Systems]⁽²⁾

Q. 論文賞を受けられた御感想をお聞かせ下さい。

このような素晴らしい賞を受賞することができて、とても喜んでいます。私事で恐縮ですが、この論文は、2023 年 4 月に南山大学に就職して最初に書いた論文で、久しぶりの単著論文でした。そのような論文が受賞の栄誉にあずかるとは、思ってもおりませんでした。ありがとうございました。

Q. 論文賞を受けられた御研究について教えて下さい。

デジタル制御システムにおいては、制御則の計算など、状態を観測してから制御入力更新されるまでに時間がかかります。この計算遅延時間がシステムの安定性に影響を与えることは古くから知られており、様々な解決策が提案されてきました。その中に美多勉先生が提案された方法があります。一方、最近、自動運転などでは、安定性だけでなく、安全性も考慮した制御システムの構築が重要課題になっており、安全フィルタ、またはシールドイングと呼ばれる安全制御法への関心が急速に高まっています。安全制御においても計算遅延による影響があり、本研究では、美多の方法を安全制御に拡張し、その有効性を確認しました。

Q. 現在、御興味をもたれている研究テーマを教えてください。

非線形離散時間システムや離散事象システムに対する安全制御です。

Q. 今後の抱負をお聞かせ下さい。

私は 2028 年 3 月に南山大学を定年退職する予定です。残された時間は少ないですが、非線形システム・離散事象システムの制御に関する研究を引き続き行いたいと思っています。また、最近では、若手研究者から研究室運営などで相談を受けることがありますが、30 年近く教授を務めた経験をもとに若手研究者へのアドバイスもできればと思っています。



潮 俊光氏

Q. 読者へのメッセージをどうぞ！

私が学生時代にパソコンが世の中に出始め、将来計算機がシステムの構成要素となる時代が来ると思い、システム工学の視点から計算機と向き合ってきました。私の学生時代は「組み込みシステム」という言葉が生まれようとする黎明期でした。計算機がシステム工学に与える影響を「妄想」すると、様々な研究テーマが浮かんできました。それが私の研究人生です。システム工学の研究の面白さは、最先端の技術をいかに上手くシステムの中に取り入れていくかを妄想することだと思います。

西澤真一（早稲田大学）、木村晋二（早稲田大学）

[Standard Cell Structure and Diffusion Reordering for Block Area Reduction in Double Diffusion Break FinFET Process]⁽³⁾

Q. 論文賞を受けられた御感想をお聞かせ下さい。

一度 Reject された論文なので今回受賞に至ったことは不思議に感じています。

Q. 論文賞を受けられた御研究について教えて下さい。

本論文は Double Diffusion Break (DDB) FinFET プロセスにおける面積ペナルティを軽減させるためのスタンダードセルにおける拡散領域の再配置法の提案です。第一世代の FinFET プロセスでは隣接セル間のリーク電流によって意図せず拡散領域の電位が変化し信号レベルが悪化する課題があるため DDB により隣接セル間のリーク電流を遮断することとしていましたが、セル境界に二つのダミートランジスタを要し面積オーバーヘッドが大きい課題がありました。一方で DDB が必要なプロセスであってもダミートランジスタ両側の拡散領域が同電位であればリーク電流は流れないため、DDB を Single Diffusion Break (SDB) とし面積オーバーヘッドを削減することがセル設計で利用されていました。本論文では本手法を回路設計に応用するために必要な幾つかの技術を提案しています、(1) DDB プロセスにおいて SDB を積極的に活用するセルレイアウト構造、(2) 提案するセルレイアウト構造を積極的に利用するためのセル内の拡散領域を移動する拡散領域再配置アルゴリズム、(3) 回路内で隣接するセルの境界を適切に制御し DDB と SDB を使い分ける配置配線ツール制御法について述べています。実験の結果提案方法によりベンチマーク回路面積を平均 8.39% 削減できることを示しました。

Q. 現在、御興味をもたれている研究テーマを教えてください。

大規模集積回路を最適設計するための設計自動化技術について取り組んでいます。近年発展している生成 AI の基盤となる大規模言語モデルなどを用いた設計自動化技術についても取り組んでいきたいと考えています。

Q. 今後の抱負をお聞かせ下さい。

優秀な学生や精力的に研究を進めている共同研究者に負けないように手を動かし続けたいと思います。



左：電子情報通信学会 2025 年度会長 植松友彦氏、中央：西澤真一氏、右：木村晋二氏

Q. 読者へのメッセージをどうぞ！

大規模集積回路の設計製造がますます複雑化しているなか、システム・設計・製造の協調設計技術は大規模集積回路を搭載した情報システムの性能を向上させていくためにますます重要となっています。これは既製の大規模集積回路を購入してシステム実装するのではなく、対象のシステムに最適設計した大規模集積回路を設計・搭載する、そのための設計環境・ツールのカスタマイズをするという方向性です。今回の研究のような大規模集積回路の設計自動化技術や回路設計法は引き続き重要で多くのプレイヤーに参入して頂いて盛り上げていくことは重要だと思いますし、それらの参入障壁を下げる取り組みがISHI会 (<https://ishi-kai.org/>) やオープンソース EDA 研究会 (<https://www.oseda-silicon.org/>) などで行われていますので、ぜひお立ち寄りください。

-
- (1) 中山翔太, 小林孝一, 山下 裕, "A Common Lyapunov Function Approach to Event-Triggered Control with Self-Triggered Sampling for Switched Linear Systems," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E108-A, no. 4 April 2025.
 - (2) 潮 俊光, "Shield-Based Safe Control with Compensation of Computation Delays of Nonlinear Discrete-Time Systems," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E108-A, no. 5 May 2025.
 - (3) 西澤真一, 木村晋二, "Standard Cell Structure and Diffusion Reordering for Block Area Reduction in Double Diffusion Break FinFET Process, " IEICE Trans. Fundamentals, vol. E108-A, no. 6 June 2025.

開催案内



General Secretary 麻原寛之 (近畿大学)

2026年11月17日から20日にかけて、2026 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, NOLTA2026 (<https://nolta2026.org/>) が、フランス・グルノーブルにて開催されます。NOLTAは、非線形理論とその応用に関する国際シンポジウムであり、非線形現象、複雑系、計算知能、回路・システム、通信、信号処理、制御、数理科学など、幅広い分野の研究者が一堂に会し、分野横断的な議論を行う国際会議です。本年も世界各国から多数の研究発表が予定されており、最先端の研究成果と活発な意見交換の場となることが期待されています。開催地であるグルノーブルは、フランス南東部、アルプス山脈の麓に位置する学術・研究都市であり、多くの研究機関や大学が集積しています。豊かな自然環境と世界有数の研究・イノベーション拠点が共存するグルノーブルは、「アルプスの首都」として知られ、科学技術分野における国際的な研究交流の中心地の一つとなっています。

NOLTA2026では、非線形現象、カオス、ニューラルネットワーク、深層学習、進化計算、非線形回路、制御システム、通信ネットワーク、信号処理、大規模ネットワーク、数理経済学など、多岐にわたるテーマについて最新の研究成果が発表されます。また、韓国マルチメディア学会 (Korea Multimedia Society : KMMS) との連携により、International Workshop on Complex Communication and Multimedia Sciences (CCMS Workshop 2026) が併催されます。

本シンポジウムでは、以下の3件のPlenary Talkが予定されています。

*Prof. Ulrich Parlitz (Max Planck Institute for Dynamics and Self-Organization, Germany)

Prediction and control of chaotic dynamics

*Prof. Rodolphe Sepulchre (University of Cambridge, UK)

Memristive circuit design for neuromorphic control

*Prof. Naoki Masuda (University of Michigan, USA)

Sentinel nodes for observing and anticipating nonlinear network dynamics

いずれの講演も、カオス制御、ニューロモルフィックシステム、複雑ネットワークといった、非線形科学の最前線を紹介する内容となっています。

NOLTA2026 の主催は電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティであり、General Co-Chairs には Prof. Gildas Besançon (Grenoble INP-UGA) および高橋規一教授 (岡山大学) が就任しています。また、本シンポジウムでは Student Paper Award も実施され、優れた学生発表が表彰されます。

参加登録やプログラム、現地情報などの最新情報は公式 Web サイトにて随時公開されています。多くの皆様のご参加を心よりお待ちしております。

論文募集

2027 年暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2027)

2027 Symposium on Cryptography and Information Security

開催期日：2027 年 1 月 26 日（火）～1 月 29 日（金）

開催会場：広島国際会議場（広島県広島市）

開催形式：現地開催のみ

Web ページ：<https://www.iwsec.org/scis/2027/>

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 44 回となる SCIS2027 は、広島県広島市で開催します。

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。

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。

4. 開催場所

広島国際会議場 〒730-0811 広島県広島市中区中島町 1-5 (平和記念公園内)

5. 主なスケジュール (予定)

2026 年

- ・ 10 月 1 日 (木) マイページ作成受付開始
- ・ 11 月 11 日 (水) 発表申込受付開始
- ・ 11 月 30 日 (月) 発表申込メ切
- ・ 12 月 15 日 (火) 発表題目・概要、原稿提出メ切
- ・ 12 月末 プログラム公開

2027 年

- ・ 1 月 5 日 (火) 早期参加登録メ切
- ・ 1 月 19 日 (火) 論文集公開開始
- ・ 1 月 26 日 (火)～29 日 (金) SCIS 2027 開催
- ・ 1 月 29 日 (金) 通常参加登録メ切

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

参加登録を 10 月 1 日、発表申込みを 11 月 11 日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 判, 1.5MB 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)

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
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

岩本 貢 (電気通信大学)
池田 誠正 (東京大学)
和田山 正也 (名古屋工業大学)
小嶋 徹也 (東京工業高専)
宮本 俊幸 (大阪工業大学)
西浦 敬信 (立命館大学)
楯 勇一 (名古屋大学)
西川 清史 (東京都立大学)
藤澤 匡哉 (東京理科大学)
高島 康裕 (北九州市立大学)
吉田 隆弘 (日本大学)
土谷 亮 (関西大学)
西新 幹彦 (信州大学)
佐藤 隆英 (山梨大学)
花谷 嘉一 (株式会社東芝)
伊藤 大輔 (岐阜大学)
中井 雄士 (豊橋技術科学大学)
塩見 準 (大阪大学)
國廣 昇 (筑波大学)
鈴木 幸太郎 (豊橋技術科学大学)
—
—
定兼 邦彦 (東京大学)
宮北 和之 (新潟大学)
二神 拓也 (同志社大学)
相川 直幸 (東京理科大学)
斉藤 友彦 (湘南工科大学)
中野 秀洋 (東京都市大学)
葛岡 成晃 (和歌山大学)
真田 亜紀子 (長岡技術科学大学)
前田 義信 (新潟大学)
永井 宏 (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
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

小嶋 徹也 (東京工業専門高等学校)
宮本 俊幸 (大阪工業大学)
西浦 敬信 (立命館大学)
楯 勇一 (名古屋大学)
西川 清史 (東京都立大学)
西新 幹彦 (信州大学)
佐藤 隆英 (山梨大学)
越田 俊介 (八戸工業大学)
三村 和史 (広島大学)
岡村 寛之 (山梨大学)
垣尾 省司 (立命館大学)
西浦 敬信 (ナノブリッジ・セミコンダクター株式会社)
宮村 信 (早稲田大学)
高島 克幸 (北海道大学)
田中 章 (日本大学)
石川 博康 (大阪工業大学)
宮本 俊幸 (滋賀県立大学)
吉田 悦子 (サイバーエージェント)
森下 一郎 (三重大学)
羽多野 裕之 (九州工業大学)
田向 権勝 (日本電信電話株式会社)
土田 孝一 (北海道大学)
小林 孝一 (日立製作所)
高橋 健太 (立命館大学)
井ノ口 宗成 (大阪大学)
三浦 典之 (静岡大学)
大木 哲史 (中央大学)
篠田 庄司 (宮崎大学)
横田 光広 (金沢工業大学)
根岸 一平 (電気通信大学)
岩本 貢 (東京大学)
池田 誠 (東京理科大学)
藤澤 匡哉 (北九州市立大学)
高島 康裕 (東京都市大学)
中野 秀洋 (電子情報通信学会)
永井 宏

NOLTA ソサイエティ運営委員会

ソサイエティ会長
次期ソサイエティ会長
庶務幹事
庶務幹事
会計幹事
電子広報担当幹事
NOLTA 編集委員長
NOLTA 編集幹事
NLP 委員長
NLP 副委員長
CCS 委員長
CCS 副委員長
特別委員
特別委員
特別委員
特別委員
特別委員
特別委員
特別委員
特別委員
特別委員
特別委員
特別委員
特別委員

小西 啓治 (大阪公立大学)
若宮 直紀 (大阪大学)
杉谷 栄規 (大阪公立大学)
松浦 隆文 (日本工業大学)
井岡 惠理 (芝浦工業大学)
美井野 優 (鳴門教育大学)
上田 哲史 (徳島大学)
清水 邦康 (千葉工業大学)
久門 尚史 (京都大学)
香取 勇一 (はこだて未来大学)
上山 憲昭 (立命館大学)
荒井 伸太郎 (岡山理科大学)
伊藤 大輔 (岐阜大学)
鳥飼 弘幸 (法政大学)
高橋 規一 (岡山大学)
木村 貴幸 (東京都市大学)
中野 秀洋 (東京都市大学)
木村 真秀 (摂南大学)
加藤 秀之 (大分大学)
砂田 哲 (金沢大学)
中村 遼 (福岡大学)
堀尾 喜彦 (帝京大学)
鈴木 秀幸 (大阪大学)
佐藤 雅俊 (玉川大学)
関屋 大雄 (千葉大学)
黒川 弘章 (東京工科大学)

Fundamentals Review 編集委員会

編集委員長	定兼 邦彦 (東京大学)
編集幹事会幹事 (正)	宮北 和之 (新潟大学)
編集幹事会幹事 (副)	二神 拓也 (同志社大学)
編集幹事会幹事補佐	矢嶋 純 (富士通株式会社)
編集委員	
編集委員 (CAS)	篠宮 紀彦 (創価大学)
編集委員 (VLD)	請園 智玲 (近畿大学)
編集委員 (SIP)	京地 清介 (法政大学)
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)	梶窪 孝也 (日本大学)
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)	保坂 亮介 (芝浦工業大学)
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 (筑紫女学園大学)
編集委員 (ITS)	自見 圭司 (群馬大学)
編集委員 (SIS)	松岡 丈平 (東京工科大学)
編集委員 (IMQ)	山添 崇 (山梨県立大学)
編集委員 (BioX)	加賀 陽介 (株式会社日立製作所)
編集委員 (RCC)	リム 勇仁 (北陸先端科学技術大学院大学)
編集委員 (CCS)	佐々木智志 (東京都市大学)
編集委員 (ICTSSL)	新 浩一 (広島市立大学)
編集委員 (HWS)	初山 陽一 (株式会社ソシオネクスト)

(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
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)	宮北 和之 (新潟大学)
編集幹事会幹事 (副)	二神 拓也 (同志社大学)
編集幹事会幹事補佐	矢嶋 純 (富士通株式会社)
編集幹事 (総務)	松田 哲直 (埼玉大学)
編集幹事 (渉外)	松井健太郎 (日本放送協会)
編集幹事 (企画)	山岸 昌夫 (法政大学)
編集幹事 (Web: 正)	中井 雄士 (豊橋技術科学大学)
編集幹事 (Web: 副)	塩見 準 (大阪大学)
特別編集幹事 (Vol. 20, No. 1)	佐々木智志 (CCS) (東京都市大学)
特別編集幹事 (Vol. 20, No. 2)	若山 圭吾 (EA) (NTT 株式会社)
特別編集幹事 (Vol. 20, No. 3)	加賀 陽介 (BioX) (株式会社日立製作所)
特別編集幹事 (Vol. 20, No. 4)	自見 圭司 (ITS) (群馬大学)
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

今号も様々な解説論文とレビュー論文をお届けします。計測・制御・推定などの広い意味での情報技術や、誤り訂正符号のようなまさに情報といった内容など、皆様に興味をもって頂ける内容だと思います。これらはコンピュータがなければ実現できないことで、今後の発展が楽しみです。(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。この号が出版される頃には、ちょうどソサイエティ大会が終わったところです。また、ESS シンポジウムをはじめ、各種国際会議が開催される時期でもあります。こうして見ていると、基礎・境界ソサイエティの活動の幅広さを、改めて実感させられます。(宮北和之)

今号の「会議報告」「開催案内」「論文募集」を担当いたしました。記事の作成にご対応頂いた方々へ、御礼申し上げます。私自身、これほど様々な学会活動があるのかと、編集を通じて視野が広がりました。皆様にも是非お読み頂ければ幸いです。次号以降も精一杯編集活動に取り組んでまいりますので、何卒よろしくお願い申し上げます。(二神拓也)

今号の「受賞者の声」を担当いたしました。今号では論文賞受賞者の方々の御研究の概要や読者の方々へのメッセージなどが掲載されています。受賞者の皆様に心よりお祝いを申し上げますとともに、記事をご執筆頂いた受賞者の皆様、ご担当頂きました事務局、出版社の皆様へ改めて御礼申し上げます。今号をご覧頂き、ご興味をおもち頂きましたら、是非受賞論文をご覧頂ければと思います。よろしく願いたします。(矢嶋 純)

今号の「研究会へ行こう!」の特別編集幹事を務めさせて頂きました。ご多用のところ、ご執筆・ご協力を賜りました皆様に、改めて厚く御礼申し上げます。本号の記事を通じて、各研究会で扱われている多彩で興味深い研究テーマや、参加者同士の活発な議論・交流の様子を知って頂ければと思います。これをきっかけに、これまで研究会に馴染みのなかった方々にも、研究会への参加や発表をご検討頂けますと幸いです。(若山圭吾)

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 第二十巻 第二号

令和八年十月一日発行

発行人 発行所	白石 智 一般社団法人 電子情報通信学会 基礎・境界サイエティ 〒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 WEB化担当会社	山岡影光 三美印刷株式会社 東京都新宿区赤城下町 45 番地