

東海大学紀要

情報理工学部

Vol. 24 2024

目次

紀要論文

| | | |
|--|-------|---|
| マインドフルネス瞑想の反復に伴う自律神経活動の変化に関する研究 | 三浦菜々子 | 1 |
| 縮小方向及び加速・減速する映像刺激によって発生する視覚誘導性自己運動感覚が重心動揺 に与える影響 | 三谷将洋 | 4 |
| 視線方向が日本語の文法的誤り判別に及ぼす影響についての研究 | 久保田周弥 | 8 |

研究室紹介

| | | |
|---|-------|----|
| 研究紹介：コンピュータ応用工学科 浅川研究室 | 浅川 毅 | 11 |
| 研究室紹介：稲葉研究室における近年の研究紹介 | 稲葉 毅 | 13 |
| 抽象情報に基づく自律移動体ナビゲーションの研究について | 村松 聡 | 15 |
| 研究室紹介：東海大学湘南キャンパスにおけるオペレーションズ・リサーチ | 中村太信 | 18 |
| スマートグリッドとセキュリティ：最新技術、課題と今後の方向 | 慎 祥揆 | 24 |
| 研究紹介：視線計測技術の最新研究成果(2022-2023) | 竹村憲太郎 | 32 |
| 研究室紹介：LSI 及び実装基板における信頼性確保 | 土屋 秀和 | 34 |

PROCEEDINGS
OF THE
SCHOOL OF INFORMATION
SCIENCE AND TECHNOLOGY
TOKAI UNIVERSITY

SERIES J
CONTENTS
VOL.24 2024

Papers

| | | |
|--|-------------------|----|
| A study on changes in autonomic nervous activity associated with repeated practices mindfulness meditation | Nanako Miura | 1 |
| The influence of vection generated by video stimuli involving shrinkage direction and acceleration/deceleration on body sway | Msahiro Mitani | 4 |
| Examining the Influence of Gaze Direction on the Detection of Grammatical Errors in Japanese | Shuya Kubota | 8 |
| Introduction of Asakawa laboratory | Takeshi Asakawa | 11 |
| Introductory Article: Recent Research in Inaba Laboratory | Takeshi Inaba | 13 |
| Mobile robot navigation based on abstract information | Satoshi Muramatsu | 15 |
| Introductory Article: Operations Research at Shonan Campus of Tokai University | Taishin Nakamura | 18 |
| Smart Grid and Cyber Security: State of the Art, Challenges and Future Directions | Sanggyu Shin | 24 |
| Introductory Article: Recent Advances in Eye-Tracking Technology (Academic Year 2022-2023) | Kentaro Takemura | 32 |
| Introductory Article: Ensuring reliability for LSI and mounting board | Hidekazu Tsuchiya | 34 |

マインドフルネス瞑想の反復に伴う 自律神経活動の変化に関する研究

三浦菜々子*1、小林優恭*2、久保田周弥*2、矢澤一輝*1、安田拓也*1、桑江曜子*3、高雄元晴*4

A study on changes in autonomic nervous activity associated with repeated practices mindfulness meditation

by

Nanako Miura, Yuki Kobayashi, Shuya Kubota, Kazuki Yazawa, Takuya Yasuda, Yoko Kuwae,
Motoharu Takao

(received Oct 14, 2024 & accepted Nov 5, 2024)

Abstract

Modern people live in a society filled with stress, and companies and public institutions are taking action to help people live in a healthy state, both physically and mentally. One approach that is gaining attention in this context is mindfulness meditation, which is expected to have relaxation effects. Furthermore, since human pupils change depending on the state of the autonomic nervous system, research has been conducted using the pupil as a physiological indicator.

In this study, we used the pupil as a physiological indicator to measure the autonomic nervous system during meditation and examined the practicing effects of mindfulness meditation. The experiment was conducted once a week, and six university students participated. The experiment was conducted up to ten times.

No significant differences in pupil size were observed during meditation from the first to the ten times, so we could not confirm the practicing effects of mindfulness meditation. It is believed that the long intervals between practices of meditation made it difficult to acquire the skill. It is also thought that mastering mindfulness meditation requires a long period of time.

Keywords: 1. mindfulness meditation, 2. Pupil, 3. Breath, 4. Autonomic nerves, 5. several-breath meditation

1. はじめに

1.1 研究背景

現代人はストレス社会で生きている。人々が心身ともに健康に生活できるように、企業や行政は活動や支援を行っている。その活動の一つとして注目を集めているのがマインドフルネス瞑想である。マインドフルネス瞑想はリラックス効果やストレス発散などの効果が期待できる[2]。

マインドフルネス瞑想実践中における自律神経系活動を測る指標として脳波や心電図を用いる研究が行われている[1]。脳波や心電図は長時間計測する必要があるが、瞳孔を指標とする場合は短い時間で計測が終了する。瞳孔を指標とした場合、脳波や心電図と比べて時間分解能力が高いとされている。瞳孔は自律神経系を測る優れた生理的指標として期待できる。

1.2 研究目的

マインドフルネス瞑想中の自律神経系の活動を瞳孔径の変動を指標にして実験を行っていたところ、個人差があることを小林たちは最近報告している[3]。すなわち彼女らによると、マインドフルネス

ス瞑想にある程度慣れている人では瞳孔が縮瞳傾向になっているのに対して、そうでない人はそのような傾向は認められなかった。そこで本研究においては、マインドフルネス瞑想の経験の有無によって瞳孔の変動の違いが生まれるのかどうかを、マインドフルネス瞑想を反復して定期的に行うことに伴う、自律神経系活動の変化を瞳孔径を指標として検討する。

1.3 マインドフルネス

マインドフルネスとは、「今、この瞬間に気づくこと」を指す[5]。マインドフルネスを実践することで、集中力の向上、学習能力の向上、ストレス発散などの効果が期待できる。

マインドフルネス瞑想のストレス軽減について、谷口は次のような実験を行った[4]。大学生 30 名を 15 名ずつの 2 つのグループに分け、片方のグループに 3 つの瞑想訓練からなる集団マインドフルネス瞑想訓練を 2 週間行った。瞑想方法は歩くことに意識を集中する歩行瞑想、食べることに意識を集中する咀嚼瞑想、自分の呼吸に意識を集中する呼吸瞑想の 3 種類で構成された。この瞑想訓練を平日毎朝 8 時に大学で行い、休日は呼吸瞑想を自宅で行うように指示した。もう一方グループは瞑想訓練には参加せず、参加は任意かついつでも中断可能であると説明された。訓練開始前、訓練開始から 1 週間後、訓練終了後のタイミングでストレス反応や脱中心化を測定した。脱中心化とは思考から距離を置くことである。また瞑想前後にその時の気分を測定した。この実験から、両グループとも抑う

* 1 学部生,東海大学情報理工学部情報科学科
* 2 修士課程,東海大学工学研究科電気電子工学専攻
* 3 株式会社 Air Engineering
* 4 教授,東海大学情報理工学部情報科学科

つが訓練終了2週間後に低下する傾向が見られた。瞑想の前後における気分の変化について、訓練1、2週目ともに瞑想後に気分が有意に快方向に変化したことが分かった。このように、マインドfulness瞑想には気分を向上させる効果がある。

2. 実験

2.1 被験者

本実験には、6名の男女大学生が被験者として参加した（男性4名、女性2名、年齢：平均22.7歳（年齢幅21～25歳））。

2.2 実験環境

本実験は、東海大学湘南キャンパス19号館6階シールドルームで行った。部屋の明るさは机上を107Lx、目元を32Lxで実験を行った。また被験者が実験中に眺める画像を、解像度1920×1080ピクセルの27インチの液晶ディスプレイに表示した。被験者とスクリーン間の距離70cm、瞑想中に表示した三重円の半径2.75cm(被験者の視野角：2.2°×2.2°)で実験を行った。実験中に使用するスライドの制御および表示は全てSuper Lab 6.0 (Cedrus社, CA, USA)を用いた。また実験中被験者は瞳孔計測システム(T.K.K2960, 竹井機器工業株式会社, 新潟県)と呼吸計測システム(CPS II Pneumotrace Respiration Sensor, Stoelting Co., IL, USA)を装着した。なお瞳孔計測システムは眼前にある小型カメラの映像から画像解析を行い、画素単位で瞳孔径を求めるように構成されている。実験中、瞬きは自由に行ってもよいが、長時間閉眼しないように教示した。なお、実験中は監視カメラを用いて被験者の様子を監視した。

2.3 方法

Super Labを用いてシールドルーム設置した液晶ディスプレイに実験画像を表示し、被験者は瞑想中に三重円を、瞑想中断中には白い十字を眺めながら実験を行った。実験時間は10分間であり、マインドfulness瞑想の手法として呼吸の回数を数えることに集中する「数息瞑想」を採用した。数息瞑想とは自分の呼吸を1から10まで数えることを繰り返す瞑想方法である。瞑想練習を1分、瞑想中断1分、瞑想3分、瞑想中断1分、瞑想3分、瞑想中断1分の計10分間を測定した。この2回の瞑想を第1セッションと第2セッションとする。この瞑想の実験を週に1回の頻度で10週目まで行った。瞑想練習後の瞑想中断1分間をベースラインとした。

2.4 解析方法

本実験では、1分ごとの瞳孔面積の変動に着目して測定を行った。実験開始から2分後のベースラインの瞳孔面積を基準とし、それ以降の区間の瞳孔面積の割合を求めた。使用した実験器具の瞳孔計測システムは各面積をpixel単位で出力する。1分ごとのpixelの合計値を求め、ベースラインの面積合計値と比較し瞳孔面積の変動を求めた。統計解析として繰り返しがあつた場合の1要因分散分析を用いた。すべてのデータは算術平均±標準誤差で示した。

3. 結果

3.1 瞳孔面積の変動

被験者6人を対象とした瞑想実践中の瞳孔面積の変動平均推移と標準誤差を図1および図2に示す。実験中に行った2回の瞑想を第1セッションと第2セッションとして分割し、それぞれ3分間の瞳孔面積を平均にし、実験回数ごとに被験者全員の平均を表したものである。縦軸はベースラインの瞳孔面積を基準とし、比を算出した。

図1および図2から第1セッション、第2セッションともに1週目と10週目の値を比べると変化は生じていないことが分かった。

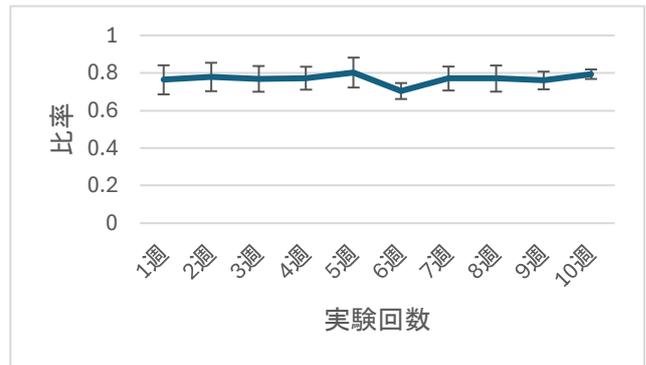


図1 第1セッションの瞳孔面積の変動平均推移

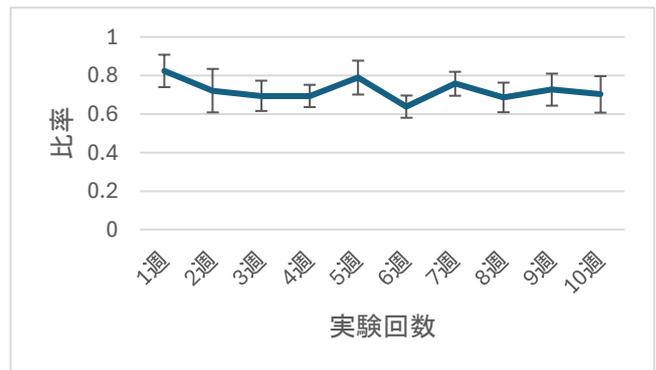


図2 第2セッションの瞳孔面積の変動平均推移

3.2 統計解析結果

実験1週目から10週目の第1セッションと第2セッションのそれぞれで検定を行った。第1セッションについて、回数ごとによる有意差は見られなかった(図1: $F_{(9,45)}=0.62$, ns)。また第2セッションについても回数ごとによる有意差は見られなかった(図2: $F_{(9,45)}=1.02$, ns)。

4. 考察

繰り返しがあつた場合の1要因分散分析より、実験1週目から10週目の瞳孔面積に有意差が見られなかったことから、1週間に1度の10分間の瞑想では反復による変化がないと考えられた。

本研究ではマインドfulness瞑想に慣れていない大学生を対象に実験を行った。実験回数も10週と少なく、1週間に1度と実験ごとの間隔も大きかつた。「自分の呼吸に集中する」ことは普段の生活では触れ合うことのない状況であり、被験者にとってマインドfulness瞑想に慣れることが難しい状況だつたと考えられた。そのため、マインドfulness瞑想中にリラックス効果が得られなかつたため、副交感神経優位による瞳孔径の収縮

が見られなかったと考えられた。マインドフルネス瞑想の上達には、長い時間の瞑想が必要になると考えられた。

本研究では、週に1度の瞑想において、1週目から10週目の瞳孔面積の変動に有意差が見られないことを確認できた。週に1度の瞑想では反復による変動がないと考えられた。今後は被験者に毎日自宅で瞑想の練習をさせるなど、瞑想する機会を増やし定期的の実験を行い、反復による瞳孔径の変動を確認する必要があると考えられる。

また、本研究では実験中に瞳孔だけでなく呼吸も計測したが、解析には使用しなかった。そこで呼吸を指標とした調査を行う。瞳孔の散大縮小は自律神経反応であり、呼吸の深さと回数と同期しているといったことが確認されている。呼吸を指標としてマインドフルネス瞑想中の瞳孔と呼吸と自律神経系の関連を調べるとともに、呼吸の回数の変化なども検討する必要があるだろう。

5. 結論

本研究では、マインドフルネス瞑想を定期的に行うことで変化が見られるかどうかを瞳孔面積の変動を指標として検討した。その実験を10週行った結果、瞳孔面積の変動に有意な差が見られなかった。1週間に1度の瞑想の習慣ではマインドフルネス瞑想が身につかず、変化が生まれないと考えられた。マインドフルネス瞑想の反復による変化を確認するため、今後は条件を変更して実験を行うべきだと考える。

6. 参考文献

[1] Kubota, Y., Sato, W. et al. (2000), Frontal midline theta rhythm is correlated with cardiac autonomic activities during the performance of an attention demanding meditation procedure, *Brain Res Cogn Brain Res* 11: 281-287.

[2] 貝谷久宜・熊野宏明・越川房子(2016). マインドフルネス—基礎と実践—

[3] 小林優恭・久保田周弥・杉山乃愛・松下夏望・桑江曜子・高雄元晴(2023). マインドフルネス実践中における瞳孔径の変動に関する研究 2023 年度日本生理人類学会フロンティアミーティング (秋期) (日本橋ライフサイエンスビルディング, 東京)

[4] 谷口弘一(2018). 集団マインドフルネス瞑想訓練のストレス低減効果 *パーソナリティ研究*, 27(2), 167-170

[5] 長谷川洋介(2017). マインドフルネス瞑想の基本

縮小方向及び加速・減速する映像刺激によって発生する 視覚誘導性自己運動感覚が重心動揺に与える影響

三谷将洋*1, 高雄元晴*2

The influence of vection generated by video stimuli involving shrinkage direction and acceleration/deceleration on body sway

Masahiro Mitani, Motoharu Takao
(received Oct. 29, 2024 & accepted Nov. 9, 2024)

Abstract

This study investigates the impact of visual stimuli involving shrinkage direction and acceleration/deceleration on vection and postural sway. Vection, or visually induced self-motion perception, has been previously evaluated using subjective measures, which are often affected by individual differences. This research aims to establish more objective criteria by analyzing postural sway through center of pressure parameters such as sway length and sway area. A virtual reality environment (VR) was created using Unity, where participants were exposed to various types of optical flow stimuli. Specifically, this study examined the effects of moving optical flow in the shrinkage direction and stimuli involving acceleration and deceleration. The results indicated that shrinkage direction and deceleration visual stimuli significantly impacted postural sway, with sway area and sway length serving as effective indicators of vection. These findings suggest that objective measures of postural sway can reliably assess vection, providing valuable insights for applications in VR and simulator systems.

Keywords: Vection, postural sway, optical flow, visual stimuli, shrinkage direction, acceleration, deceleration, center of pressure, virtual reality (VR), motion sickness

1. 緒論

視覚誘導性自己運動感覚（ベクション）は、視覚的な運動刺激によって実際には動いていないにもかかわらず、自分の身体が動いているかのように感じる錯覚現象である。このベクションは日常生活でも観察されることがあり、代表的な例として「トレイン・イリュージョン」が挙げられる。これは、自分が乗っている電車が静止している際に隣の電車が動き出すと、自分の電車が動き出したかのように錯覚する現象である。この現象は、視覚情報が人間の運動感覚に大きな影響を与えることを示している。

近年、仮想現実（VR）やシミュレーター技術の発展に伴い、ベクションはリアリティや没入感を高める要因として注目されている。しかし、ベクションの強さが増すと、VR酔い（VIMS: Visually Induced Motion Sickness）と呼ばれる不快な症状も発生しやすくなる。VR酔いは、視覚情報と前庭感覚や体性感覚との不一致に起因し、特に視覚的運動刺激が強くなると酔いの発生率が高まることが知られている。酔いとベクションの関係は、ベクションが強く誘発される状況下で酔いのリスクが増大することが確認されているが、酔いは必ずしもベクションの存在に依存するわけではない。酔いの発生には、個人差や感覚の不一致が影響を及ぼす要因として挙げられる（Keshavarz et al. 2015）。

これまでのベクションに関する研究では、主観的な感覚に基づく指標（ベクションの強度、潜時、持続時間）を利用してき

た。しかし、このような主観的評価は個人差が大きく、データの信頼性に限界があるため、近年ではより客観的な評価方法が求められている。その一つとして、重心動揺を用いた評価が注目されている。重心動揺とは、身体の平衡を保とうとする際に生じる微妙な揺れであり、視覚刺激が加わることでその揺れの程度が変化することが知られている。特に、拡大方向の映像刺激が提示された場合、重心動揺の軌跡長が増加し、この現象がベクションの発生と強く関連していることが確認されている（Tanahashi et al. 2007）。

関（2020）は、オプティカルフロー観測時におけるベクションの発生を重心動揺の軌跡長と外周面積によって客観的に評価する方法を提案した。この研究において彼は、拡大方向の映像刺激に対して重心動揺の軌跡長が、縮小方向の映像刺激では外周面積が有効な指標となることを示唆した。この研究は、主観的評価から脱却し、ベクションを客観的に評価するための重要な基盤となった。

その後、神（2022）は拡大方向の映像刺激に対してさらに詳細な分析を行い、軌跡長を用いることでベクションの有無を二値的に評価することは可能であると示唆した。また、映像刺激への順応までの時間や映像刺激が軌跡長に与える影響を評価するために必要な時間についても検討を行った。しかし、これまでの研究は拡大方向の映像刺激に焦点を当てており、縮小方向や加速・減速といった動的な視覚刺激がベクションに与える影響については十分に検討されていない。

本研究では、縮小方向および加速・減速する映像刺激がベク

* 1 修士課程,東海大学工学研究科電気電子工学専攻

* 2 教授,東海大学情報理工学部情報科学科

ションに与える影響を、重心動揺の外周面積と軌跡長という客観的指標を用いて評価することを目的としている。具体的には、異なる種類の視覚的運動刺激が、重心動揺の外周面積や軌跡長にどのように反映されるかを定量的に分析し、これまでの研究を発展させることで、ベクションが重心動揺に与える影響についてより深い研究を行う。

2. 方法

2.1 被験者

本実験には、心身ともに健康であり、課題の遂行に支障のない視力(矯正視力を含む)と色判断が可能な視覚を有する 15 名の大学生が被験者として参加した (男性 15 名, 年齢幅 20~23 才)。

2.2 実験環境

本実験では、3次元仮想環境の作成には Unity (Unity Technologies) を使用し、被験者には Vive Pro Eye (99HARJ006-00, HTC) のヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着させ、オプティカルフローを提示した。Fig.1 は仮想環境を示しており、半径 100m、奥行 600m の円柱型空間で構成し、この空間内には 1 辺が 1m の立方体を 2000 個ランダムに配置した。ただし、Fig.2 で示すように、被験者と立方体が接触させないため、中央から半径 3m の範囲には立方体が配置されないように調整を行った。また、実験ごとの映像刺激に一貫性を保つため、すべての実験で同じ乱数シード値を使用して配置を統一した。

実験中、これらの立方体は視覚的の刺激として移動し、端に到達すると反対側の端から再度出現する仕組みにした。被験者が空間内を移動する際、距離感を感じ取れるように、仮想空間には Fog の設定が施されており、約 100m までの範囲では立方体は鮮明に見えるが、200m 離れた地点では完全に視認できなくなった。また、100m から 200m の範囲では距離に応じて立方体が次第に暗く見えづらくなるような設定にした。

重心動揺の計測には、バランス Wii ボード (RVL-021, 任天堂) を使用し、重心動揺の測定は日本平衡神経科学会運営委員会が作成した検査基準 (鈴木 1995) に則り行った。

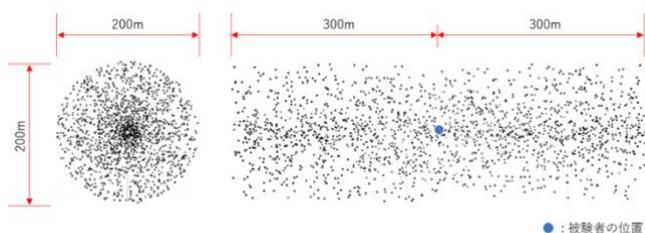


Fig.1 生成空間と被験者の位置

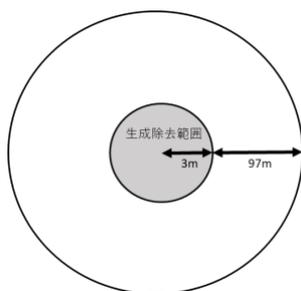


Fig.2 生成除外範囲

2.3 実験手順

はじめに、被験者に実験の所要時間と実験中の注意事項を説明した後、被験者は Wii ボード上に乗る、HMD を装着し、VIVE コントローラー(99HAFR002-00, HTC)を利き手に持たせた。被験者は実験中、正面を向いてもらい、ベクションを感じている間は VIVE コントローラーのトリガーを引かせた。

本実験では 1 回 60 秒の映像を計 12 回提示した。はじめに、何も表示しない映像を提示することで被験者が仮想環境に適応させた。第一実験として、平常時の重心動揺を計測するために静止した視覚刺激での計測を行った。第二実験として、等速かつ縮小方向のオプティカルフローでの計測を異なる速度で計 5 回行った。速度は順に 20(m/s), 40(m/s), 60(m/s), 80(m/s), 100(m/s)で計測した。第三実験として、加速および減速する刺激映像によるオプティカルフローでの計測を異なる速度で計 5 回行った。このオプティカルフローの方向は拡大方向とした。映像前半 30 秒間は速度 0(m/s)から等加速度で加速を行い、実験開始から 30 秒後に最高速度に到達するよう設定した。映像後半 30 秒間は最高速度から等加速度で減速を行い、実験終了時点で速度 0(m/s)に到達するよう設定した。最高速度は順に 20(m/s), 40(m/s), 60(m/s), 80(m/s), 100(m/s)で計測した。日本平衡神経科学会運営委員会では、重心動揺の計測は通常 60 秒間とされているが、困難な場合は明記したうえで 30 秒間の計測データを利用可能と記載した (鈴木 1995)。また、同研究室の神遼河は「拡大方向のオプティカルフロー観測時において平常時の 30 秒の軌跡長と対象とする刺激を提示した際の 30 秒間の軌跡長を比較することでもベクションの有無を二値的に評価することは可能であると示唆された」と示した (神 2022)。本研究では被験者に心理的負担や疲労がかかる可能性を考慮し、加速・減速の計測をそれぞれ 30 秒間で連続して行った。この短縮により、被験者の負担を軽減しつつデータを取得した。

2.4 データ解析

計測した 60 秒間の重心位置の時系列データから軌跡長および外周面積を算出する手法として、過去の研究で利用された WBBSS Analysis (兵頭 2024 確認) のアルゴリズムを採用した。時系列データに対しては、100Hz でリサンプリングを行い、さらに遮断周波数 10Hz のバターワースフィルタを適用してノイズを除去した。各実験のデータが正規分布に従うかどうかを確認するために、正規性の検定 (Shapiro-Wilk 検定) を実施した。その結果、第三実験 (加速・減速) における速度 20(m/s) のデータにおいて正規性が確認されなかった (Table.1; $p=0.003$)。このため、本研究ではノンパラメトリック検定に基づく比較を行った。外周面積と軌跡長は複数の時間分割で算出され、平常時のデータとの間で有意差が存在するかを確認するために、Wilcoxon の符号順位検定を用いて検証を行った。

Table.1 60 秒間外周面積の正規分布検定

| | Shapiro-Wilk | | |
|---------|--------------|-----|-------|
| | 統計量 | 自由度 | 有意確率 |
| 速度0 | 0.903 | 15 | 0.106 |
| 速度20 | 0.871 | 15 | 0.035 |
| 速度40 | 0.917 | 15 | 0.175 |
| 速度60 | 0.894 | 15 | 0.078 |
| 速度80 | 0.933 | 15 | 0.299 |
| 速度100 | 0.899 | 15 | 0.092 |
| 最高速度20 | 0.791 | 15 | 0.003 |
| 最高速度40 | 0.94 | 15 | 0.381 |
| 最高速度60 | 0.874 | 15 | 0.038 |
| 最高速度80 | 0.942 | 15 | 0.406 |
| 最高速度100 | 0.94 | 15 | 0.382 |

3. 結果

3.1 縮小方向オプティカルフロー

まず、平常時（速度 0m/s）と各速度のデータを比較検定した。第二実験（縮小方向オプティカルフロー）の 60 秒間の外周面積を Fig.3, 軌跡長を Fig.4 に示す。外周面積に関しては速度 0(m/s)と速度 40(m/s)間 ([0-40]: p=0.57) には有意差は確認されないが、その他の速度で有意差が確認された ([0-20]: p=0.046, [0-60]: p=0.004, [0-80]: p=0.002, [0-100]: p=0.017)。一方、軌跡長では速度 80(m/s)および 100(m/s)において有意差が確認された([0-80]: p=0.012, [0-100]: p=0.035)。

次に、前半 30 秒と後半 30 秒にわけたデータに基づいて検定を行い、結果の外周面積を Fig.5, 軌跡長を Fig.6 に示す。前半 30 秒間の外周面積では、速度 80(m/s)と速度 100(m/s)で有意差がみられた([0-80]: p=0.047, [0-100]: p=0.036)。後半 30 秒間の外周面積では、すべての速度で有意差が確認された ([0-20]: p=0.008, [0-40]: p=0.009, [0-60]: p=0.001, [0-80]: p=0.027, [0-100]: p=0.002)。前半 30 秒間の軌跡長では、すべての速度で有意差が確認されなかった。後半 30 秒間の軌跡長では、すべての速度で有意差が確認された ([0-20]: p=0.009, [0-40]: p=0.005, [0-60]: p=0.003, [0-80]: p=0.009, [0-100]: p=0.005)。

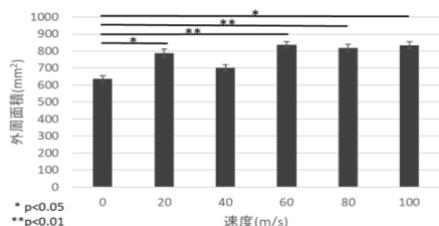


Fig.3 第二実験 60 秒間の外周面積

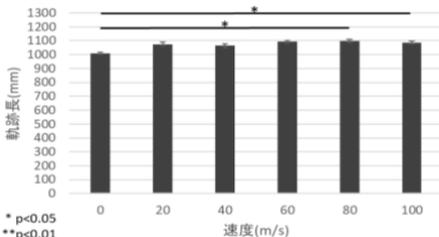


Fig.4 第二実験 60 秒間の軌跡長

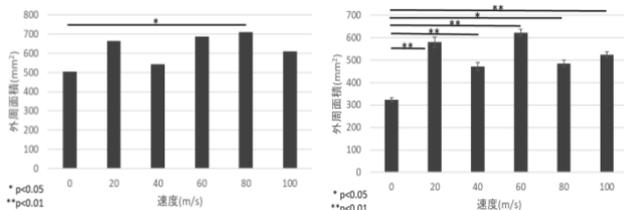


Fig.5 第二実験 30 秒間の外周面積 (左:前半,右:後半)

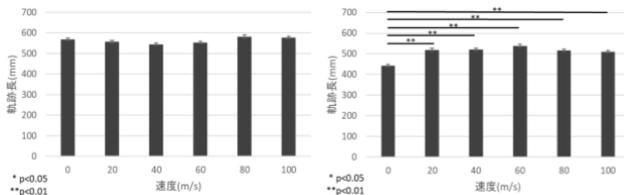


Fig.6 第二実験 30 秒間の軌跡長 (左:前半,右:後半)

3.2 加速・減速する映像刺激によるオプティカルフロー

縮小方向と同様に平常時（速度 0m/s）と各速度の検定を行った。第三実験は加速と減速を分けて 30 秒間のデータで検定を行い、外周面積を Fig.7, 軌跡長を Fig.8 に示す。加速映像における外周面積では、速度 80(m/s)でのみ有意差が確認された ([0-80]: p=0.047)。減速映像において外周面積では、すべての速度で有意差を確認された ([0-20]: p=0.005, [0-40]: p=0.005, [0-60]: p=0.002, [0-80]: p=0.0008, [0-100]: p=0.001)。加速映像における軌跡長では有意差が確認されなかった。減速映像の軌跡長では外周面積同様に、すべての項目で有意差が確認された ([0-20]: p=0.002, [0-40]: p=0.005, [0-60]: p=0.001, [0-80]: p=0.002, [0-100]: p=0.003)。

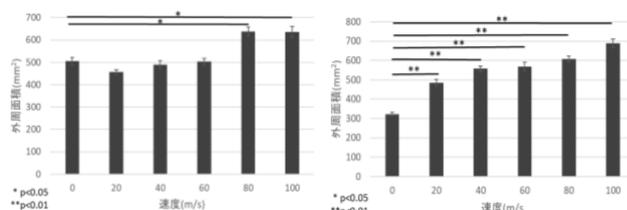


Fig.7 第三実験 30 秒間の外周面積 (左:加速,右:減速)

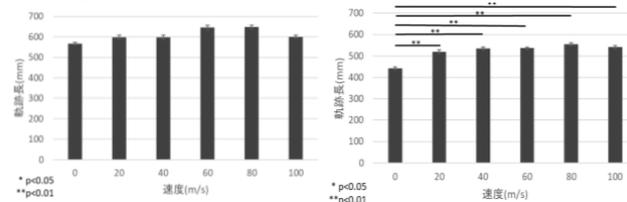


Fig.8 第三実験 30 秒間の軌跡長 (左:加速,右:減速)

3.3 15 秒間の重心動揺

1 分間の重心動揺の変化を確認するため、15 秒ごとに分割し、各ブロックで検定した。第二実験の外周面積、第二実験の軌跡長、第三実験の外周面積、第三実験の軌跡長での p 値を Table.2 に示す。

第二実験では、外周面積と軌跡長の両方で 0~15 秒間、15~30 秒間で有意差は確認されなかった。しかし、外周面積 30~45 秒間、45~60 秒間ではすべての速度で有意差が確認され、軌跡長についても 30~45 秒間ではすべての速度で有意差が確認され、45~60 秒間では速度 60(m/s)及び 80(m/s)の二項目で有意差が確認された。

第三実験では、外周面積と軌跡長の両方で 0~15 秒間のすべてでも速度で有意差が確認されず、15~30 秒間では速度 80(m/s)で有意差が確認されるものの、それ以外の速度では有意差が確認されなかった。30~45 秒間、45~60 秒間では、外周面積と軌跡長の両方ですべての速度で有意差が確認された。

Table.2 15 秒分割した外周面積および軌跡長 (A:第二実験の外周面積, B:第二実験の軌跡長, C:第三実験の外周面積, D:第三実験の軌跡長, 水色 p<0.05, 青色 p<0.01)

| A | | | | | | B | | | | | |
|--------|-------|---------|---------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|
| 第二-外周 | 20m/s | 40m/s | 60m/s | 80m/s | 100m/s | 第二-軌跡 | 20m/s | 40m/s | 60m/s | 80m/s | 100m/s |
| 0-15s | 0.28 | 0.46 | 0.91 | 0.281 | 0.691 | 0.334 | 0.334 | 0.334 | 0.865 | 0.334 | |
| 15-30s | 0.57 | 0.776 | 0.233 | 0.281 | 0.069 | 0.427 | 0.496 | 0.334 | 0.427 | 0.088 | |
| 30-45s | 0.031 | 0.00098 | 0.008 | 0.012 | 0.008 | 0.0199 | 0.006 | 0.02 | 0.0199 | 0.017 | |
| 45-60s | 0.017 | 0.047 | 0.00008 | 0.012 | 0.0125 | 0.112 | 0.112 | 0.006 | 0.0268 | 0.078 | |

| C | | | | | | D | | | | | |
|--------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| 第三-外周 | 20m/s | 40m/s | 60m/s | 80m/s | 100m/s | 第三-軌跡 | 20m/s | 40m/s | 60m/s | 80m/s | 100m/s |
| 0-15s | 0.496 | 0.865 | 0.334 | 0.394 | 0.532 | 0.691 | 0.82 | 0.307 | 0.334 | 0.865 | |
| 15-30s | 0.191 | 0.427 | 0.233 | 0.027 | 0.173 | 0.14 | 0.307 | 0.0535 | 0.031 | 0.156 | |
| 30-45s | 0.036 | 0.0106 | 0.001 | 0.0199 | 0.008 | 0.008 | 0.031 | 0.002 | 0.017 | 0.017 | |
| 45-60s | 0.003 | 0.005 | 0.005 | 0.008 | 0.001 | 0.006 | 0.002 | 0.011 | 0.002 | 0.005 | |

4. 考察

4.1 ベクシオンが重心動揺により評価可能であるか

重心動揺の外周面積と軌跡長が、ベクシオンの有無を二値的に評価することが可能であるかを検討する。縮小方向オプティカルフローを提示した第二実験では、外周面積において速度 40(m/s) (Fig.3) 以外のすべての速度で有意差を確認される。したがって、縮小方向オプティカルフロー観測時において外周面積を用いることで、ベクシオンの有無を二値的に評価することが可能であると示唆される。

また、軌跡長においては速度 80(m/s), 100(m/s) (Fig.4) で有意差が確認される。これは、映像刺激が強くなることでベクシオンが強く感じられるため、軌跡長が大きくなったことを示唆している (Seno & Palmisano 2018)。したがって、映像刺激が強い場合には、縮小方向オプティカルフロー観測時の軌跡長でも有意差が確認でき、ベクシオンの有無を二値的に評価できる可能性が考えられる。

加速・減速する映像刺激によるオプティカルフローを提示した第三実験は、映像後半である減速映像において外周面積、軌跡長共にすべての速度で有意差が確認される。この結果は、減速する映像刺激によるオプティカルフロー観測時において外周面積および軌跡長を用いることでベクシオンの有無を二値的に評価することは可能であると示唆している。

4.2 映像刺激が影響を与えたと評価するために必要な時間

拡大方向オプティカルフローを提示した実験を行った神 (2022) は、15~30 秒間および 30~45 秒間で有意差を確認した。神は、0~15 秒ほどは映像刺激による影響は個人差に依存するところが大きく、15~30 秒、30~45 秒の 30 秒間は映像刺激に順応しつつある状態となり、45~60 秒では順応が完了しつつあるために、平常時の軌跡長と比較しても有意差が確認されなかったと述べている。本研究の 15 秒間に分けて検定をした結果では、すべての 30~45 秒間において有意差が確認され、45~60 秒間においても第二実験の軌跡長以外ではすべての項目で有意差が確認された (Table.2)。

第二実験の 15~30 秒間で有意差が確認されなかった理由として、縮小方向オプティカルフローは拡大方向よりも重心動揺への影響が小さく、そのため映像に順応しつつあり個人差は小さくなるまでの時間が長くなったと考えられる。また、第三実験の 15~30 秒間で外周面積と軌跡長で有意な差が確認できない理由として、第三実験開始時点で被験者が 7 分以上直立状態であり疲労が蓄積しており個人差が大きくなったことが考えられる。さらに、第三実験は実験開始時の速度が 0(m/s) から加速しているため、映像刺激が徐々に強まる段階では有意差が検出されにくくなった可能性がある。

したがって、縮小方向オプティカルフローにおいて映像刺激が外周面積に影響を与えたと評価するためには、順応に約 30 秒要するため、約 45~60 秒間が適切な計測時間であると示唆される。減速する映像刺激によるオプティカルフローでは、約 45~60 秒間の計測時間があれば有意な外周面積および軌跡長での差を確認できると示唆される。今後、減速する映像刺激によるオプティカルフローの 30 秒計測が可能であるか、加速する映像刺激によるオプティカルフローの適切な計測時間には、追加の実験が必要である。

5. 結論

本研究は映像刺激によるベクシオンが重心動揺に与える影響のさらなる研究として、縮小方向オプティカルフロー及び加速・減速する映像刺激によるオプティカルフローを提示した際の外

周面積と軌跡長について研究を行った。その結果、縮小方向オプティカルフローでは外周面積において、減速する映像刺激によるオプティカルフローでは外周面積と軌跡長において、ベクシオンの有無を二値的に評価することが可能であると示唆される。また、映像刺激を強くすることで縮小方向オプティカルフローの軌跡長でも評価することが可能であると推測される。さらに、縮小方向オプティカルフローでは映像刺激へ順応するのに約 30 秒要することから、30 秒計測ではなく 60 秒計測が適切であると示唆される。

6. 謝辞

本研究を行なうにあたり、被験者として協力していただいた皆様に感謝申し上げます。

引用文献

- Keshavarz, B., Riecke, B. E., Hettinger, L. J., & Campos, J. L. (2015). Vection and visually induced motion sickness: How are they related?, *Frontiers in Psychology*, 6: 472.
- Tanahashi, S., Ujike, H., Kozawa, R., & Ukai, K. (2007). Effects of visually simulated roll motion on vection and postural stabilization. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 4: 39
- Seya, Y & Shinoda, H. (2018). Relationship between vection and motion perception in depth. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 80: 2008–2021.
- 関隼涼. (2020). Virtual Reality 環境下における重心動揺を指標とした視覚誘導性自己運動感覚の評価. 東海大学大学院工学部工学研究科電気電子工学専攻 修士論文
- 神遼河. (2022). 拡大方向の映像刺激によって発生する視覚誘導性自己運動感覚が重心動揺に与える影響, 東海大学大学院 工学研究科電気電子工学専攻 修士論文
- 鈴木淳一. (1995). 重心動揺検査の Q&A, 手引き, 日本平衡神経科学会運営委員会, *Equilibrium Research*, 55: 64-77
- 兵頭勇己. 各種パラメータの計算方法について https://researchmap.jp/blogs/blog_entries/view/112495/73ce14692d136ab25274892f9e15a618?frame_id=513522, (参照 2024-09-18)

視線方向が日本語の文法的誤り判別に及ぼす影響についての研究

久保田周弥*¹, 小林優恭*¹, 高雄元晴*²

Examining the Influence of Gaze Direction on the Detection of Grammatical Errors in Japanese

Shuya Kubota, Yuki Kobayashi

Motoharu Takao

(received Oct 31, 2024 & accepted Nov. 14, 2024)

Abstract

Recent studies have shown that upward gaze can reduce reaction time when detecting grammatical errors in French, whereas horizontal gaze does not have a significant effect. In this study, we examined whether gaze direction also affects the detection of grammatical errors in Japanese sentences. Japanese has a unique grammatical structure that differs from French, which requires articles, and these differences in linguistic features may influence visual cognition. The results of our experiment indicated that gaze direction (up, down, left, and right) did not significantly affect the accuracy or reaction time in detecting grammatical errors in Japanese sentences. This finding contrasts with previous research on French, suggesting that differences in grammatical structure and cognitive processing may lead to different effects of gaze direction across languages. Overall, this study suggests that the influence of gaze direction on detecting grammatical errors may vary depending on the language, and this variation is likely related to the unique grammatical characteristics and cognitive processes of each language.

Keywords: 1. Gaze Direction 2. Visual Stimuli 3. Language Processing 4. Japanese Grammar 5. Short-term memory

1. はじめに

近年、フランス語で文法的誤りを判別する課題において、興味深い報告がされた。Carleiらは、視線の方向が冠詞の文法的誤りの判別タスクにおいて必要とする時間に偏りをもたらしていることを発見した。フランス語において上方への視線は下方への視線と比較して判別にかかる時間が短い、左右方向は判別タスクへの影響を与えていないとされる[1]。

フランス語はインド・ヨーロッパ語族に属し、語形変化により文法的機能を示すという特徴を有する屈折語である[2][3]。一方、日本語は語幹に「～ます」や「～ない」などの接辞を付けて文法機能を表す膠着語である[3]。従って、フランス語と日本語は文法の仕組みが大きく異なっている。

また、文法の仕組みだけでなく、扱う「文字」が大きく違う。フランス語は26文字のアルファベットだけを使い単語が構成されるが、日本語は「ひらがな」、「カタカナ」、そして古代中国から伝わった「漢字」を組み合わせる。「漢字」は絵から形を変化し、漢字の数は1万字以上ある[2][4]。

次に、Kobayashiら(2024)は、視野方向の研究において、正しい文と誤った文それぞれの被験者の誤答率と反応時間の視野方向において差が確認されなかったと報告している[5]。本研究では、日本語の文において、視線方向が文法的誤りの判別に影響を与えるかを検証する。

2. 方法

2.1 被験者

本研究には、心身ともに健康である東海大学情報理工学部情報科学科の学生12名(男性10名、女性2名、平均年齢21.91歳;20~24歳)。利き手は脳の優位半球に影響を与えることが知られている。このため優位半球の影響を排除するために、被験者は全員右利きとした[7]。

2.2 実験環境

被験者は解像度1920×1080、リフレッシュレート75.0Hzの27.0インチ液晶ディスプレイ(27MP38VQ、LG Electronics Japan、日本)から57.0cmの位置に座らせた。その後、被験者の頭部はあご台を用いて顎と額で固定し、目とディスプレイの距離を一定に保つようにした。ディスプレイとの距離は、視覚に関する実験的研究および先行研究で使用された値に基づいて設定した。また、言語刺激の制御とデータの記録は、IntelのN4100 CPUプロセッサを搭載したコンピュータ上で動作する心理学用実験制御ソフトウェアSuper lab ver.6(Cedrus Corp, CA, USA)によって制御した。更に、本実験は被験者の注意力を維持するために、実験を中断し休憩をはさみ再開することを許可した。最後に、実験は机上面での照度107 lxの暗室で行った。

2.3 刺激

すべての刺激はCanvas14(ACD Systems、東京)を用いて作成した。黒(5.03 cd/m², R:G:B=0:0:0)と赤(27.42 cd/m², R:G:B=255:0:0)の文字を白い背景(133.2 cd/m², R:G:B=255:255:255)のLCDディスプレイに表示した(図1)。黒い十字をディスプレイ中央に呈示した注視点から右上・右下・左上・左下の四象限中に呈示した刺激までの視野角は21.34°であった。四象限の各十字方向への視線方向の呈示は、ランダム

*1 修士課程, 東海大学工学研究科電気電子工学専攻

*2 教授, 東海大学情報理工学部情報科学科

に黒い矢印によって行った。その後、注視点を呈示し、文を分割し、品詞ごとの文字を文頭から順に呈示した。

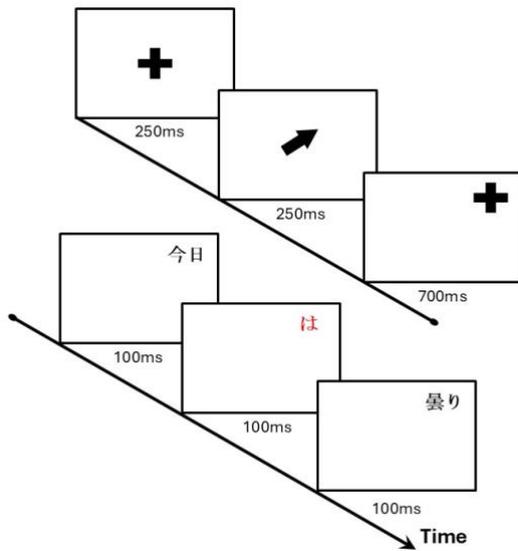


図1 実験フロー

2.4 手順

文を3つに分割し呈示させ、その文法が正しいか否か判断させる課題を被験者に行わせた。評価対象の文として、文法的に正しい40文、文法的に誤っている40文を用意した。また、文字はMS明朝のフォント、大きさ36ポイントで作成した。たとえば、「彼に冒険家」(誤った文)このような文章の場合、助詞「に」が誤りであり、正しくは、助詞に「は」が入り「彼は冒険家」となる。この助詞を赤色で呈示させ、助詞以外の品詞の文字は黒色で呈示させた。

被験者に、ディスプレイ中央に注視点を250ミリ秒間呈示した。その後、画面の四つ角のいずれかを示す矢印を250ミリ秒間呈示した。示した角に注視点を再び示し、700ミリ秒間呈示した。被験者が視点を移し、事前に上記で呈示した例文を用いて説明した上で、文を分割し、品詞ごとに文字を呈示した。Kobayashiら(2024)の先行研究では、分割せずに一文として呈示していたが、本研究では助詞の判別がしやすいよう、文章を分割して呈示した。これは、一文が長いと助詞の認識が困難になるためであり、より助詞の判別に適した形式とした。例えば、「彼に冒険家」(誤り)このような文では、主語「彼」、助詞「に」、述語「冒険家」に品詞ごとに分割した。全問題の助詞は赤字で作成した。表示時間は三つの品詞それぞれ100ミリ秒間呈示した。その後、被験者に文の正誤を回答する時間を2,000ミリ秒間設けた。回答中は画面から視線をそらさず回答させた。言語刺激はLCDパネルの4象限に表示し、回答はレスポンスパッド(RB-834, Cedrus Corp, CA, USA)を用いて回答させた。被験者には、正しい文の場合は赤いボタンを、誤った文の場合は青いボタンより回答させた。

2.5 データ解析

本研究では、正しい文と誤った文それぞれの被験者の誤答率と反応時間、それぞれ反復一元配置分散分析(ANOVA)を用いて解析した。下位検定としてBonferroni法による多重比較をした。IBM SPSSでのANOVAによる解析は、変数間に有意差があるかを判別するために使用された。この解析は、統計ソフトウェアSPSS23(IBM SPSS Statistics 23)を用いて実施した。なお

データは平均±標準誤差で示した。

3. 結果

反復一元分散分析(ANOVA)の結果、文法的正誤の評価において、誤答率に対する視線方向の効果に有意差がみられなかった(表1; $F_{(3,33)}=0.813$, ns; $F_{(3,33)}=0.910$, ns, respectively)。また、文法的正誤の評価における反応時間に対する視線方向の効果は見られなかった(表2; $F_{(3,33)}=1.327$, ns; $F_{(3,33)}=2.309$, ns, respectively)。

表1 左下(DL), 右下(DR), 左上(UL), 右上(UR)の視野方向における誤答率。

| Gaze direction | DL | DR | UL | UR |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Correct | 0.03±0.05 | 0.03±0.05 | 0.01±0.03 | 0.03±0.05 |
| Incorrect | 0.04±0.05 | 0.03±0.05 | 0.06±0.08 | 0.03±0.05 |

表2 左下(DL), 右下(DR), 左上(UL), 右上(UR)の視野方向における反応時間。

| Gaze direction | DL | DR | UL | UR |
|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Correct | 418.83±107.20 | 426.72±126.31 | 398.36±137.62 | 415.65±128.02 |
| Incorrect | 468.57±115.46 | 457.95±159.16 | 483.53±158.07 | 434.19±122.76 |

4. 考察

本研究では、日本語における文法的誤りの判別に視線方向が与える影響について実験を行った。実験結果からは、視線方向(上, 下, 右, 左)の違いによって文法誤りの判別における有意な差は確認されなかった。つまり、日本語の文法誤りの認知と判断に関して、視線の方向が影響を与えることは示唆されなかった。一方で、フランス語における文法的誤りの判別を対象とした先行研究では、上視野と下視野において判断の反応に有意な差が確認されている[1]。以上より、視線の方向が言語のもつ特徴によって異なる影響を及ぼす可能性が示唆される。

フランス語は、ラテン語から派生した言語であり、特徴として、男性名詞と女性名詞の区別があり、名詞の性別に応じて冠詞や形容詞が一致する必要がある[2]。一方、日本語には名詞の性別の概念はなく、「に」のような助詞を使って動詞と対象を結びつける。また、日本語とフランス語では文法構造や音声のリズムが異なり、フランス語は音節ごとのリズムを持つが、日本語はモーラ(mora)と呼ばれる音節より小さな単位からなるリズムを持つという特徴がある[6]。したがって、言語の特徴を理解することは、本研究において非常に重要である。特に、フランス語では上視野における視線が文法的誤りの判別を促進する効果が報告されている。しかし、本研究では日本語の文法判別タスクにおいて、このような垂直方向の有意差が確認されなかったことから、異なる言語における文法処理の違い、あるいは各言語固有の文法構造や音声のリズムが視線効果に影響を与えている可能性が考えられる。

Kobayashiら(2024)[4]の視野方向に関する研究では、正しい文と誤った文を一文のまま呈示していた。一方で、本実験では文を主語、助詞、述語に3分割して行った。これら二つの実験結果から、日本語において視野方向が文法的誤りの判別に影響を与えないことが確認された。以上の通り、視野方向が文法的誤り判別に及ぼす影響は、文法の構造や音声リズムといった言語特性に依存している可能性があることが示唆される。

5. 結語

本研究は、日本語の文法的誤りの判別が視線方向と関連しないことを明らかにした。一方、フランス語の文法的誤りの判別は視線方向が関係していることが報告されている。本実験の結果は、視線方向と認知処理の関係がそれぞれの言語が持つ特徴に依存する可能性を示唆している。

引用文献

- 1) Carlei C. & Kerzel (2020) Looking up improves performance in verbal tasks, *Laterality*, 25 (2), 198-214.
- 2) Lawless, LK. (2006). *The everything French grammar book: All the rules you need to master français*. Adams Media.
- 3) GUNJI, Takao. (2011). What kind of language is Japanese? : From a typological point of view. *Theoretical and Applied Linguistics at Kobe Shoin: TOKS*, 14, 1-14. Kobe Shoin Women's University Academic Research Society.
- 4) Akiyama, C., Akiyama, N. (2019). *Pocket Japanese Grammar*. USA: Barrons Educational Services.
- 5) Kobayashi, Y., Kubota, S., Devadas ADT., Takao M. (2024), in press, Grammatical error detection is not influenced by gaze direction in Japanese language.
- 6) Otake, T., Hatano, G., Cutler, A., Mehler, J. (1993). Mora or syllable? Speech segmentation in Japanese. *Journal of Memory and Language*, 32(2), 258-278.
- 7) Lyle, KB Logan, JM Roediger, HL. (2008). Eye movements enhance memory for individuals who are strongly right-handed and harm it for individuals who are not. *Psychonomic Bulletin Review*, 15(3), 515-520.

研究紹介：コンピュータ応用工学科 浅川研究室

浅川 毅

Introduction of Asakawa laboratory

by

Takeshi Asakawa

(received Oct 14, 2024 & accepted Nov 5, 2024)

Abstract

The Asakawa Laboratory started in 2004. This paper introduces the Asakawa Laboratory, focusing on one of its research themes, which is information technology education that utilizes computer technology.

Keywords: Computer, Education, Engineering

1. はじめに

コンピュータ応用工学科第6研究室（浅川研究室）は、2004年にスタートした。「LSIのアーキテクチャやテストに関する研究」、「コンピュータ技術を生かした情報技術教育に関する研究」、「IoTを活用した高齢者支援に関する研究」の3つの分野を主として取り組んできた。本稿では、「コンピュータ技術を生かした情報技術教育に関する研究」を取り上げ、これまでの研究内容について紹介する。

2. 情報技術教育への展開

コンピュータ技術を情報技術教育へ展開するにあたって、主に以下3つの研究形態をとった。(1) 外部機関を意識して研究を進め、対象者を社会人や他教育機関にした。(2) 所属学科学生への教育改善を目標として研究を行った。(3) こどもや児童を対象とする体験教室の開発および実践を行った。ここでは、「外部機関を意識した研究」への取り組みについて述べる。

3. 外部機関を意識した研究

3.1 システム思考を深める教育における統合型実習の活用(1)

本研究では、東京都立蔵前工業高校電気科においてシステム思考の教育を実践し、その効果を確認した。ルーパー・モーション機構 (looper motion mechanics) を使用した教材 (図1) を開発し、迷路状のボールを Start から Finish まで移動させる実習課題を2年生10名に与え、完成までの試行におけるプログラミング課程を分析し、システム思考の深まりを評価した。評価の結果、試行を重ねるごとに全体 (プラットフォーム) の動きと要素 (6個の各モータ制御量) を関連付けて、システムとしての見方や考え方が理解していくことがうかがえた。アンケート調査からも課題に対して意欲的に取り組み、学習の喜びを体得したことがうかがえた。

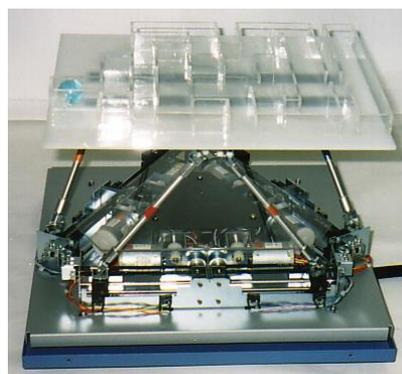


図1 ルーパー・モーション機構

3.2 LSI設計業務におけるインターンシップ事前学習支援WBTシステムの開発と利用効果(2)

企業における学生インターンシップは職業選択ミスマッチの改善策や学生募集の場として広く実施されている。しかし、インターンシップ時の実習等担当社員の負担も多い。本研究ではこの課題を抱える国内半導体関連メーカを対象として、インターンシップの学習成果向上と実習担当社員の負担軽減を目的に、WBT(Web Based Terminal)型の遠隔事前学習システムを開発し、試行評価を行った。インターンシップには電気電子情報系の学生をはじめ物理、化学、数学など理系の学生が参加するため、LSIの基礎を十分に学習していない学生も多い。そこで事前学習では、LSI製造における企画・仕様・機能・レイアウト設計・フォトマスク設計・チップ製造を学習内容とした。図2に開発した事前学習WBTシステムPSS-WBT(Prior Study Support WBT System)のモジュール構成を示す。機能単位のモジュールは、ユーザ管理モジュール、学習管理モジュール、教材提示モジュール、キャリア教育モジュール、インターンシップ(IS)管理モジュールで構成される。事前学習は10日間のインターンシップの1か月前から開始される。PSS-WBTの利用効果について、導入前の学生20名と導入後の7名の学生を対象に比較評価を行った。その結果、講義時間が3時間から1時間へ、実習時間の遅れは

*1 情報理工学部コンピュータ応用工学科

25 時間から 5 時間へ改善された。また、事前学習、知識の整理、設計実習、実習期間に関する満足度を調べたアンケート調査では、5 点満点で平均 1.6 から 5.0 へ大幅に向上した。

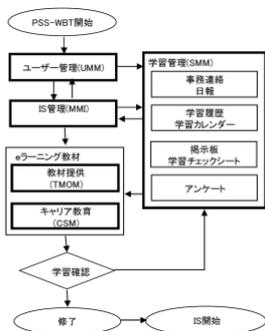


図 2 PSS-WBT システムのモジュール構成

3.3 シミュレータ開発を題材にしたエンジニアリングデザイン教育(3)

エンジニアリングデザインは、ITC の大きな柱として重要性が認知されているが、「創造性を発揮しながら複数の知識を応用して取り組む」という要求内容を満たす教科の設置が困難となっている。本研究では、明石工業高等専門学校専攻科 1 年生 8 名を対象とし、専門必修科目の「創発ゼミナール」(150 分×15 回)において、「アナログ変調回路の導入時に用いる教育用シミュレータの開発」をテーマとしてエンジニアリングデザイン教育に取り組み、学生の問題解決能力やチームワーク力などの育成を目指した。開発に使用するソフトウェアによって、学生 8 人を Pspice チーム、LabVIEW チーム、JavaScript チームに分け、チームごとに開発を行った。Pspice チームでは、電子デバイスによる回路を設計してシミュレーションを行う。そのため、多種多様な回路より適切な選択をして、部品定数を決める設計作業が中心となる。LabVIEW チームは、数式として捉えた変調と復調の処理を LabVIEW の関数機能などを配置して結線するグラフィカルプログラムで実現する。JavaScript チームは、LabVIEW チームと同様に数式として捉えた処理をプログラミングする。図 3 に実行の一例として LabVIEW を用いたシミュレータの表示画面を示す。授業終了後にアンケート調査を行った。授業への取り組みに関しては、達成目標の設定、体験学習、問題解決能力、創造性の発揮、チーム連携、自主性について各 5 点満点で質問した。その結果、平均 4.0 と高い結果を得た。授業内容については、複数のアイデア、複数知識の応用、チームワーク力、創造性、制約条件、自然や社会について各 5 点満点で質問した。その結果、平均で 3.9 と高い結果を得た。

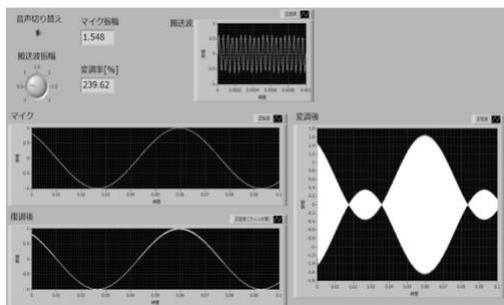


図 3 LabVIEW を用いたシミュレータ

3.4 リカレント教育促進のための ICT オンライン講座の開発(4)

ICT 人材の不足が深刻化している現在、ICT 未経験社会人が学び直しを行い、ICT 産業に参加することが期待されている。そこで本研究では、ICT の基本となる情報工学の基礎から学ぶことのできるコンテンツおよび学習環境となるリカレント教育のための会員制 Web ネットワークサービス「E.E.R.C. (Engineering Education Recurrent Center)」の開発に着手した。会員は講義の視聴に加えて、Zoom を利用したオンライン質問会が受けられる。E.E.R.C.は、受講者とのインターフェースとなる Web ページ教材コンテンツ、Web ページから送られた情報を管理するデータベースサーバ、Web ページをインターネット上に公開するための Web サーバで構成されている。図 4 に E.E.R.C.のトップ画面を示す。受講者には、利用する際にメールアドレスとパスワードを登録してもらい、この情報をもとにユーザの識別をする。今回の試行では、評価対象者は社会人 1 名、学生 47 名であったが、ある程度の教育効力が認められた。今後の展望として、E.E.R.C.のシステムに関しては、受講者が講師となりうる仕組みを取り入れて、循環教育の一端を担えるサービスにしたい。さらに、教育効果を高めるために、受講者同士の学び合いを促進する交流フォーラムを立ち上げ、より強固なりカレント教育の実現を図る。コンテンツについては現在の見やすさを維持しながら中級者、上級者向けの内容を開発していく。



図 4 E.E.R.C.のトップ画面

4. おわりに

本稿では、これまで取り組みのなかで、外部機関を対象としたコンピュータ利用の情報教育に関する研究を紹介した。今後も実用化を意識して研究を続けていく。

参考文献

- 1) 粉川昌巳, 堀桂太郎, 浅川毅, “システム思考を深める教育における統合型実習の活用”, コンピュータ&エディケーション, V Vol.17, 2004, PP.105-110(2004)
- 2) 田中良一, Nishantha, Giguruwa, G.D., 浅川毅, 林田行雄, “LSI 設計業務におけるインターシッピング事前学習支援 WBT システムの開発と利用効果, CIEC 研究会論文誌, Vol.3, PP.28-35(2012)
- 3) 堀桂太郎, 浅川毅, “シミュレータ開発を題材にしたエンジニアリングデザイン教育”, CIEC 研究会論文誌, Vol.4, PP.33-40(2013)
- 4) 古性隼都, 桑原健人, 長田龍臣, 浅川毅, “リカレント教育促進のための ICT オンライン講座の開発”, CIEC 春季カンファレンス論文集, Vol.14, PP.51-56(2023)

研究室紹介：稲葉研究室における近年の研究紹介

稲葉 毅*¹

Introductory Article: Recent Research in Inaba Laboratory

by

Takeshi Inaba

(received & accepted)

Abstract

This report introduces some of the recent research results of the Inaba Laboratory. First, research on improving operability of human-operated robots through stability compensation is presented. Next, research on motion systems, including CMG-based drone attitude control, is presented. Finally, other topics and future prospects will be discussed.

Keywords: collaborative robot, hand guiding, motion control

1. はじめに

東海大学情報理工学部コンピュータ応用工学科稲葉研究室では、制御工学を理論的なベースとして、人協働ロボットの操作性を高める制御手法、ドローンといったモーションシステムへの制御理論応用などを研究している。本稿では、人間とロボットの物理的相互作用（Physical Human Robot Interaction (pHRI)）が存在する人協働ロボットに関する検討を中心に、本研究室での近年の研究成果を紹介する。

2. 人協働ロボットに関する研究

2.1 人とロボットの物理的相互作用を含むシステムとその課題

少子高齢化により生産年齢人口が減少する中、次世代ロボットの一つとして人協働ロボットが有望視されている。これは人間と協調して作業する形態のロボットである。このような人協働ロボットにおいて、人間とロボットが直接触れて作業を行うハンドガイドと呼ばれる形態がある（図1）。これはロボットに取り付けられた力覚センサで操作者の操作力を測定し、それに応じてロボットを制御するものであり、この図のような重量物の運搬・組み付け作業の補助（パワーアシスト）や、ロボットに位置や経路を教示するダイレクトティーチングにも応用される。



図1 ハンドガイドによるロボット操作の例

このように人間とロボットが物理的に一体となって働くシステムは、制御されたロボットの機械力学的な特性と人間の手先インピーダンスの両方を含んだ閉ループ系となり、ロボットが適切に制御されていないと操作性が悪いだけでなく、安定性も損なわれて危険である。本研究室ではこれまで人間機械系の観点から作業中の人の動特性を解析し、その適応的性質を明らかにしてパワーアシストシステムの自動調整に利用することなどを検討してきた。その検討の過程で、図2のようにロボットの構造に剛性不足があるとシステムが不安定になりやすく、慣性や粘性パラメータを大きく設定せざるを得ず、操作性向上に限界があることがわかった。特に、人協働ロボットでは安全性を確保するため柔構造である場合が多く、安定性への影響は大きいため重要課題である。

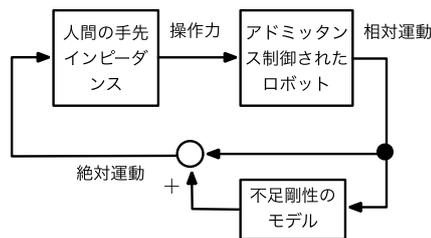


図2 剛性不足を含む人間機械系

2.2 加速度フィードバックによる安定性補償

剛性不足による安定性の問題は、ロボットの運動制御が関節角エンコーダによる相対運動に基づくものであるのに対し、人間との物理的相互作用は不足剛性の影響を受けたロボットアーム先端の絶対運動に基づくことに起因する。このような問題に対し本研究室では図3のような、簡便に絶対運動を計測できる加速度センサを利用したフィードバック補償とロボットのアドミッタンス制御を組み合わせた新たな制御手法を提案している[1]。図4は人の手先インピーダンスの弾性パラメータ K_h の大きさに対し、システムの安定性を保ったまま、ロボットのアドミッタ

*1 情報理工学部 コンピュータ応用工学科

ンス特性の慣性パラメータ M をどこまで小さくできるかの境界を示している。補償なし(赤色)の場合に比べ、センサなしのフィードフォワード補償(黄色)、加速度フィードバック補償(青色)の順に安定領域が拡大している。その結果、粘性パラメータの可変範囲も大きくとれ、操作性を大きく向上できることを確認した[2]。

2.3 ダイレクトティーチングの操作性向上

人協働ロボットのハンドガイドのもう一つの応用例であるダイレクトティーチングは、ロボットの軌道をプログラミングなしで直接教示できるため、専門知識を持たない作業者が現場で利用しやすい。しかし、ロボットの動特性が適切に制御されていないと、思い通りに教示できない場合がある。本研究室ではロボットを適切にアドミッタンス制御した上で、取得したロボット軌道をその特徴を保ったままオフラインで平滑化する手法を検討している[3]

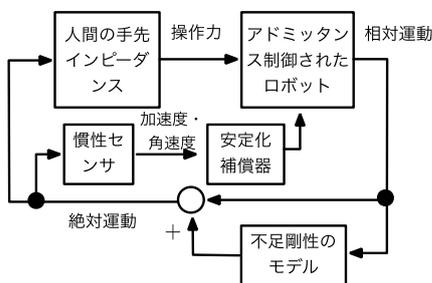


図3 慣性センサフィードバックによる安定性補償

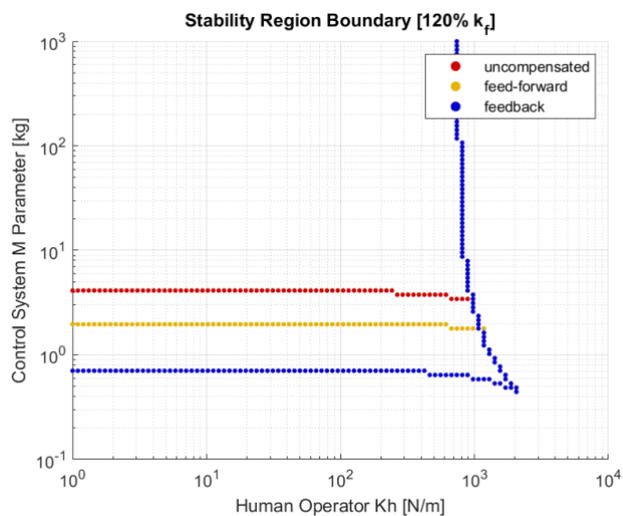


図4 フィードバック補償による安定領域の拡大[1]

3. モーションシステムへの制御理論応用

これまで主に人工衛星の姿勢制御に用いられてきたCMG(コントロールモーメントジャイロ)をドローンの姿勢制御に応用する検討を行っている[4, 5]。商用レベルの実機にツインCMGを搭載した実験を行い、風速換算22m/sに相当する瞬時外乱に対し、CMGを搭載しない場合のピッチ角変動は20度、ロール角変動は25度であったが、CMGを搭載した場合はそれぞれ12度、16度に抑制され、ツインCMGによる外乱抑制の効果を確認している。

これら以外にも、最近では回転型倒立振子を対象とした非線形

制御理論の応用研究を始めている。非線形システムを非線形フィードバックにより厳密に線形化し、線形制御理論をあてはめる手法があるが、回転型倒立振子は運動自由度に対して入力数が少ない劣駆動システムのため、完全には線形化できない。そこで非線形フィードバックによる線形化と線形近似を組み合わせた二段階線形化の手法を提案している。比較的簡単な手法であるが単純な線形近似と比較して動作範囲を大きく拡大できることが確認できている[6]。

4. おわりに

本稿では最近の稲葉研究室での研究内容を紹介した。人協働ロボットやモーションシステムに関する研究を主軸にしているが、その他にもMR(複合現実)における最適インタフェース配置の検討など、人と関係するシステム全般を扱っている。研究室のwebサイト(<https://www.inaba-lab.org>)でも紹介しているので参照して欲しい。

参考文献

- [1] N. SONGTHUMJITTI, T. INABA: Stability compensation of an admittance-controlled cartesian robot considering physical interaction with a human operator, *Intelligence ¥& Robotics*, 3(3):306-36 (2023)
- [2] N. SONGTHUMJITTI, T. INABA: Maneuverability Improvement by Feedback Compensation of a Physically Human - Interacting Robot with Variable Damping Control, *IEEE AMC2024, AMC24 - 000027* (2024)
- [3] 石, 稲葉: 人協働ロボットのダイレクトティーチングにおける経路平滑化 - 曲率と速度に基づく特徴点の抽出と経路曲線の算出-, *SI2023, 1A1-12* (2023)
- [4] 大内, 小谷ほか: 並進系を考慮したシングルCMGによるドローンの姿勢制御, *日本機械学会論文集*, vol. 87, no. 895, pp.1-22 (2021)
- [5] 大内, 稲葉ほか: ツインCMGによるドローンの姿勢制御, *日本機械学会論文集*, 88巻 913号 p.22-00067 (2022)
- [6] 劉, 稲葉: 二段階線形化に基づく回転型倒立振子の非線形制御による初期値応答の改善, 第67回自動制御連合講演会(発表予定) (2024)

抽象情報に基づく自律移動体ナビゲーションの研究について

村松 聡[†]

Mobile robot navigation based on abstract information

by

Satoshi Muramatsu

(received Oct 31, 2024 & accepted Nov 5, 2024)

Abstract

This research aims to realize navigation for autonomous vehicles, including autonomous driving, based only on highly abstract information such as human directions.

In this research, we have investigated and realized a method to generate sequences from abstract information such as human directions, and symbol-ground this in the real environment using a method for modeling the environment and an environment recognition method.

Keywords: Mobile robot, Navigation

1 はじめに

本研究は自動運転をはじめ自律移動体のナビゲーションを人間の案内言葉のような抽象度の高い情報のみに基づいて実現することを目的とする。

近年、人手不足の影響はあらゆる分野に及んでおり、例えばバスをはじめとする公共交通機関における運転手の不足による減便や、輸送業界における 2024 年問題など枚挙に暇がなく、社会基盤に大きな悪影響が出ていることは疑いようのない事実である。

このことから自動車メーカー各社をはじめとして自動運転など移動体の自律化に多くの組織が取り組んでおり、一部では実証実験が進められていることも確認できる。

自動車をはじめとする自律移動体の制御は今後の物流や人の輸送になど重要なテーマとなるが、現在研究開発が進められてる手法はすべて詳細な幾何学的情報に基づいてなされるものとなっている。

幾何学的情報に基づく移動体の制御はロボットの制御則と相性がよく、プログラミングも制御工学や数論的理論に基づいて構築できるなどのメリットがあるが、自律移動を実現するための前提情報となる“環境のモデル＝地図データ”の生成に膨大なコストがかかるため、広大な範囲をカバーすることは非常に困難である。

一方で我々人間は普段どこかに行ったり、他者に道案内する際は上記のような詳細な幾何学的情報を用いることなく、“ひとつ目の信号を右”、“この先の交

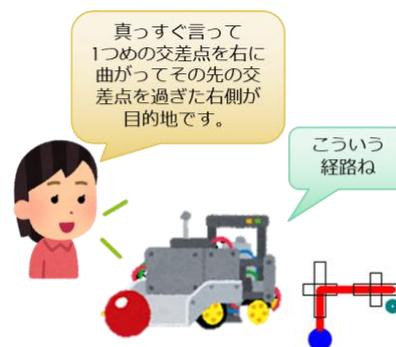


図1 案内言葉によるナビゲーション

差点を左”などといった大まかなランドマークとその場所での行動則といった抽象的な情報によってナビゲーションを実現していることが分かる。

このような抽象的な情報を活用することで従来の自律移動体の制御のような幾何学的情報を用いた詳細な環境モデルを事前に作成することなく、即座にその場で任意の場所にナビゲートすることが可能になると考える。

よって本研究では図1に示すように人の道案内の言葉を解釈してロボットの行動則を生成する手法と、その言葉＝ロボットの行動則を実環境に記号接地する手法を検討し、これを評価する。

2 抽象情報に基づくナビゲーション

本研究では先に述べたように「この信号を左、次の交差点をまっすぐ」のような案内言葉による経路情報

[†] 情報理工学部コンピュータ応用工学科



図7 学内地図と実証実験のコース

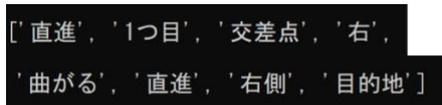


図8 案内言葉より生成した経路シーケンス

本システムによって経路生成してナビゲーションを行った結果を図9および10に示す。

図9はロボットが環境認識によって現在どの経路シーケンスを実行すべきかを判定している様子であり、図10は経路シーケンスを記号接地して走行経路を生成している結果である。

スタートからゴールの地点まで正しく走行経路を生成することができていることが確認され、本システムによって従来の自律移動体のナビゲーションシステムのように事前に環境の詳細な幾何情報の測量に基づく地図情報を作成することなく、その場で案内言葉を与えるだけで目的地まで誘導できることが実証できた。

4 おわりに

本研究では人の道案内の言葉のような抽象的な情報からシーケンスを生成し、環境をモデル化する手法と環境認識手法により、これを実環境に記号接地する手法を実した。

本研究で提案したシステムによってこれまでのように事前に詳細な測量に基づいた環境の地図情報生成することなく、その場で案内誘導するための言葉を与えるだけで目的地まで自律移動体を誘導するより簡便なナビゲーションシステムを実現することができたと評価できる。

今後は国土地理院や衛星画像データから任意の2点間を結ぶ案内言葉を自動生成するなど本年度の成果を拡張することで、より簡便に環境をモデル化して広範囲をカバーできる自律移動体の制御手法の確立を目指す。



図9 経路シーケンス処理中の様子

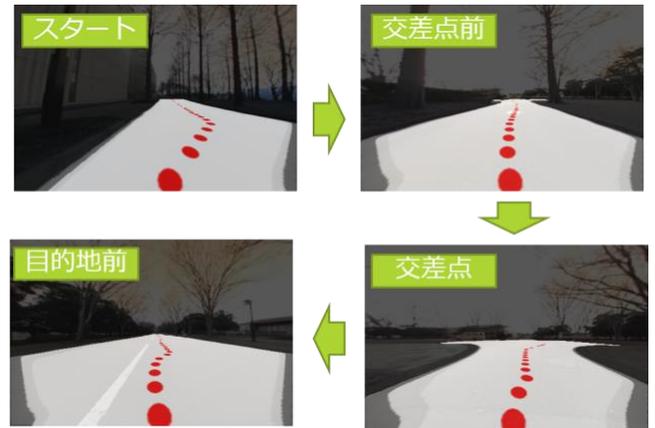


図10 記号接地による経路生成の様子

参考文献

- [1] 谷本慎至, 村松聡, “道路領域のセグメンテーションと経路評価に基づく移動ロボットのナビゲーション”, 電気学会 産業応用部門次世代産業システム研究会, 2022, 03
- [2] 谷本慎至, 村松聡 他, “道路領域のセグメンテーションと経路評価に基づく移動ロボットのナビゲーション”, 計測自動制御学会 SI 部門講演会 2022, 12
- [3] S. Tanimoto, S. Muramatsu et al, ”Mobile robot’s navigation based on road segmentation and route evaluation,” IECON 2022 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2022, Oct.
- [4] 谷本慎至, 村松聡 他, “言葉による抽象的な環境モデル生成と道路領域評価に基づいた背う高経路生成による自律移動ロボットのナビゲーション”, 計測自動制御学会 SI 部門講演会 2023, 12
- [5] 谷本慎至, “言葉による抽象的な環境モデル生成と道路領域評価に基づいた走行経路生成による自律移動ロボットのナビゲーション”, 東海大学大学院 2023 年度修士論文

研究室紹介：東海大学湘南キャンパスにおける オペレーションズ・リサーチ

中村 太信^{†1}

Introductory Article: Operations Research at Shonan Campus of Tokai University

by

Taishin Nakamura

Abstract

Operations Research (OR) is a field of study that helps make optimal decisions using mathematical approaches to solve real problems. Our laboratory has worked on various problems at Tokai University's Shonan Campus. This paper presents three undergraduate research projects: (A) proposing optimal AED placement, (B) finding the best post-exercise nutrition, and (C) evaluating crowd control strategies. These projects were led by students who identified the issues and used OR methods to develop solutions. I will continue to support student-led research and promote OR studies to help solve problems both on campus and in society.

Keywords: Operations Research, Mathematical Optimization, Multi-Agent Simulation

1 はじめに

オペレーションズ・リサーチ (OR) とは、現実の問題に対して数理的アプローチを用いて最適な意思決定を支援する学問分野である。OR の特徴として、特定の問題に限定せず、問題解決のための「道具」そのものを研究するため、汎用性が高く、様々な分野における問題の解決に貢献できる点が挙げられる。

筆者の研究室では、学生自らが興味を持って研究活動に打ち込めるように、教員とのミーティングをもとに比較的自由に研究テーマを設定している。ここでは、本研究室で実施した卒業研究の中から、東海大学湘南キャンパスを対象として行った 3 つの研究：

- AED 配置場所の提案 (2021 年度卒業研究 [1])
 - 最適な運動後の補食 (2022 年度卒業研究 [2])
 - 規制退場方策の定量的評価 (2023 年度卒業研究 [3])
- を取り上げる。本稿は、これらの卒業研究をベースに筆者が加筆・修正を加えたものである。

2 AED 配置場所の最適化 [1]

2.1 研究背景

総務省消防庁の調査 [4] によると、令和 4 年における救急自動車の現場到着所要時間（入電から現場に到着するまでに要した時間）は全国平均で約 10.3 分であり、前年の約 9.4 分から増加している。この所要時間の遅延は、心停止患者に対して迅速な処置が求められる場面で救命率の低下を招く可能性がある。心停止からの救命率向上には、一般市民による一次救命処置が不可欠であると指摘されている [5]。

一次救命処置では、AED（自動体外式除細動器）が用いられることがある。AED とは、心室細動を起こした心臓に必要な応じて電気ショックを与えることで、正常なリズムに戻すための医療機器である。電気ショックの遅延が 1 分ごとに生存退院率を約 10% 低下させることが報告されているため [6]、AED の迅速な使用が重要である。

図 1 に示すように、2022 年 1 月時点で東海大学湘南キャンパスには 29 台の AED が設置されている。赤

^{†1} 情報理工学部 コンピュータ応用工学科



図1 東海大学湘南キャンパスにおける AED の配置 [7]

い丸が AED の配置場所を表している。しかし、図 1 からわかるように、中央のグラウンド付近から金目門、および高間原グラウンド付近には AED が設置されておらず、これらの地点で AED の使用が必要となった場合、生存退院率の低下が懸念される。

本研究では、湘南キャンパスを対象に、AED を必要とする人と AED との距離の総和を最小化する配置計画を提案する。これにより、迅速な AED の使用を促進し、救命率の向上に貢献することを目指す。

2.2 最適化問題の定式化

本研究で取り組む AED 配置問題は、 k -メディアン問題として定式化できる。 k -メディアン問題とは、与えられた需要点の集合に対して、あらかじめ定められた数 k の施設を最適に配置する問題である [8]。

以下の記号を定義する。

- I 心停止が発生しうる地点の集合
- J AED を設置可能な地点の集合
- i 心停止が発生しうる地点を表す添え字 ($i \in I$)
- j AED を設置可能な地点を表す添え字 ($j \in J$)
- k 設置する AED の数
- c_{ij} 地点 i から AED 設置地点 j までのユークリッド距離
- w_i 地点 i の需要度係数 (心停止発生リスクを考慮した値)
- x_{ij} 地点 i の需要が AED 設置地点 j によってカ

バーされるときに 1、そうでないときに 0 となる 2 値変数

y_j 地点 j に AED を設置するとき 1、そうでないときに 0 となる 2 値変数

AED 配置問題は、次の整数計画問題として定式化できる。

最小化

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} w_i c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

制約条件

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad (\forall i \in I) \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} y_j = k \quad (3)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad (\forall i \in I, \forall j \in J) \quad (4)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad (\forall i \in I) \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (\forall i \in I, \forall j \in J) \quad (6)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad (\forall j \in J) \quad (7)$$

健康推進室の記録によれば、東海大学湘南キャンパスでこれまでに AED が使用されたのは 2 回のみであり、そのうちの 1 回が実際にショックを必要とする事例であったが、使用された AED の具体的な場所や詳細な状況に関する記録が残されていない。各地点での心停止発生リスクを定量的に評価するための十分なデータが存在しないため、本モデルでは需要度係数 w_i は全ての地点を等しいとする。すなわち、単純に距離の最小化を目指すモデルとなっている。

2.3 最適化により得られた結果

本研究では、上記の定式化をベースとして、以下の 4 つのシナリオを想定した AED 配置問題を Gurobi Optimizer を用いて解いた。

- シナリオ 1: 現在の配置から 1 台の AED を追加
- シナリオ 2: 現在の配置から 1 台の AED を移動
- シナリオ 3: 耐久年数を迎えた AED (15 台) を取り替え
- シナリオ 4: すべての AED を再配置

ここでは、シナリオ 2 の結果について述べる。シナリオ 2 の最適解を図 2 に示す。ばつ印で示された場所から赤い丸の位置に AED が移動されたことがわかる。AED を 1 台移動するだけで、目的関数値を 13.82% 減少できることが示された。これにより、AED までの平均移動距離が短縮され、迅速な AED の使用が可能と

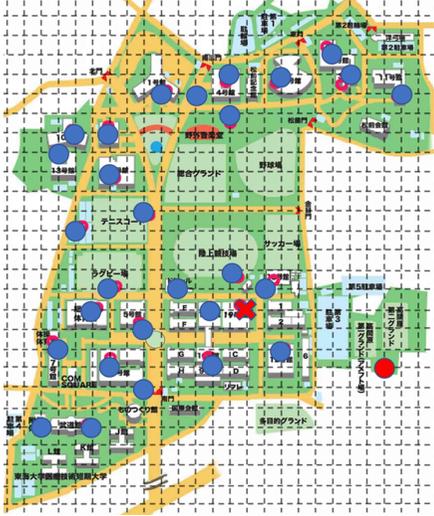


図2 シナリオ2における最適なAED配置図

なり、生存退院率の向上に寄与することが期待される。

本研究では、人がAEDまで直線的に移動できると仮定し、ユークリッド距離を用いて距離を計算した。しかし、実際には建物や地形、道路状況などにより移動経路が制限される。今後の課題として、より現実的な移動距離を考慮したモデルへの拡張が求められる。

3 最適な運動後の補食 [2]

3.1 研究背景

アスリートにとって、補食は疲労回復やパフォーマンス向上に重要な役割を果たす [9]。運動後は筋グリコーゲンが減少するため、運動直後に糖質を補給して血糖値を高めることが望ましい [10]。しかし、栄養素が豊富な商品を継続的に購入することは、学生にとって経済的負担となり得る。そこで本研究では、湘南キャンパス内のコンビニエンスストアを対象とし、必要な栄養素を考慮した経済的な補食を提案する。

3.2 最適化問題の定式化

古典的な栄養問題 [8] を用いて、運動後に摂取すべき補食の最適化を行う。

以下の記号を定義する。

- N 栄養素の集合
- F 商品の集合
- i 栄養素を表す添え字 ($i \in N$)
- j 商品を表す添え字 ($j \in F$)
- a_i 栄養素 i の摂取量の下限値
- b_i 栄養素 i の摂取量の上限値
- c_j 商品 j の価格
- n_{ij} 商品 j に含まれる栄養素 i の含有量

x_j 商品 j を購入するときに 1、そうでないときに 0 となる 2 値変数

d_i 栄養素 i の不足量を表す変数

s_i 栄養素 i の超過量を表す変数

M ペナルティの重み

補食の最適化問題は、次の整数計画問題として定式化できる。

最小化

$$\sum_{j \in F} c_j x_j + M \sum_{i \in N} (d_i + s_i) \quad (8)$$

制約条件

$$a_i - d_i \leq \sum_{j \in F} n_{ij} x_j \leq b_i + s_i \quad (i \in N) \quad (9)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad (j \in F) \quad (10)$$

本研究では、実用的な結果を得るために、湘南キャンパス内の以下の 3 つのコンビニエンスストア：

- セブンイレブン東海大学湘南キャンパス店 (8 時 00 分～18 時 00 分)
- セブンイレブン東海大学湘南中央通り店 (8 時 00 分～18 時 00 分)
- ローソン東海大学湘南リフレ店 (9 時 00 分～15 時 00 分)

を対象とした。本研究では、2022 年 11 月 29 日 (火) の 9 時、13 時、18 時に調査した結果を用いる。また、商品の栄養成分は、実店舗での確認およびセブンイレブンとローソンのウェブサイトを参照した。

3.3 最適化により得られた結果

運動後に必要な栄養素を考慮し、経済的な補食を見つけるために、金額の最小化を目的として上記で定式化した最適化問題を Gurobi Optimizer を用いて解いた。ここでは、18 時台の結果を述べる。18 時台の分析においては、ローソン東海大学湘南リフレ店は閉店しており、セブンイレブン東海大学湘南キャンパス店およびセブンイレブン東海大学湘南中央通り店の 2 店舗を対象とした。表 1 に、体重に応じた運動後の補食として最適な商品群を示す。例えば、体重 60 kg の人の場合、摂取すべき炭水化物は 60 g から 72 g、たんぱく質は 15.00 g から 21.00 g という制約条件を満たす必要がある。これに基づき、金額を最小化する最適化問題を解いた結果、「ブリトー ハム&チーズ」および「7 プレミアム小倉羊羹」が選ばれており、その合計金額は 343 円であった。全体としては、授業後の夜の時間帯ということもあり、対象とする商品の種類は非常に限られており、金額も朝や昼の時間帯に比べて高く、

表1 体重に応じた運動後の補食として最適な商品群（18 時台）

| 体重 [kg] | 炭水化物 [g] (下限 ~ 上限) | たんぱく質 [g] (下限 ~ 上限) | 金額 [円] | 選ばれた商品 |
|---------|--------------------|---------------------|--------|-------------------------------------|
| 50 | 50 ~ 60 | 12.50 ~ 17.50 | 381 | 1 本満足バー, シリアルチョコ, ブリトー ハム&チーズ |
| 60 | 60 ~ 72 | 15.00 ~ 21.00 | 343 | ブリトー ハム&チーズ, 7 プレミアム小倉羊羹 |
| 65 | 65 ~ 78 | 16.25 ~ 22.75 | 343 | ブリトー ハム&チーズ, 7 プレミアム小倉羊羹 |
| 70 | 70 ~ 84 | 17.50 ~ 24.50 | 397 | ブリトー モッツァレラ&ゴーダのマルゲリータ, 7 プレミアム小倉羊羹 |
| 75 | 75 ~ 90 | 18.75 ~ 26.25 | 408 | ブリトー ハム&チーズ, 7 プレミアムどら焼き |

提供される商品も類似したものが多かった。得られた結果に対して、管理栄養士から以下の評価を受けた。

- 金額的には高くても 400 円程ということで妥当である。
- 全体を見て、夜の脂質が高いと感じた。
- 補食摂取による体組成の変化やパフォーマンスの変化を見れるとよい。

本研究の成果により、数理最適化を用いることで、運動後に必要な栄養素を確保しながら、コストを抑えた補食の選択が可能となった。今後の課題として、運動前・運動中の補食の提案や、脂質の調整を含めた最適化、さらに補食摂取による体組成やパフォーマンスの変化を検討し、より効果的な補食の提案などが挙げられる。

4 規制退場方策の定量的評価 [3]

4.1 研究背景

スポーツ観戦やライブなどの大規模イベントでは、開始前および終了後に一斉に人が移動するため、施設内だけでなく、施設周辺の公共交通機関へとつながる歩行者通路でも群集の集中が発生する。このような群集の集中は、重大な事故を引き起こすリスクを伴うため、そのリスクを適切に評価し、効果的な群集制御によって低減する方策が求められている [11]。

本研究では、東海大学湘南キャンパス 2 号館でのイベントを想定し、規制退場に着目する。規制退場とは、大規模イベント終了時に会場の座席を階やブロックごとに分けて順番に退場を行う方式である。退場のタイミングと方法の選定は、規制退場の効果を最大化し、安全かつ効率的な退場を実現する上で重要な要素である。

本研究の目的は、2 号館内およびキャンパス内における退場シミュレーションを通じて、最適な退場方策を決定することである。これにより、混雑の緩和と群集事故のリスク低減を図ることが期待される。

4.2 シミュレーション設定

群集制御における安全性と効率性の評価に有効な手法として、マルチエージェントシミュレーション（以下、MAS）[12] が注目されている。本研究では、MAS



図3 湘南キャンパスにおける退場ルート

を用いて退場シミュレーションを実施する。

2 号館の各座席を出発点とし、湘南キャンパス内の 5 つの門（東門、掲示門、松前門、北門、南門）を目的地として設定する。図 3 に湘南キャンパスにおける退場ルートを示す。黄色の丸が 2 号館を表し、退場者は赤色のルートに従って各門へ向かう。シミュレーションでは、2 号館の実際の収容人数を考慮し、1 階に 451 人、2 階に 733 人、3 階に 684 人の計 1,868 人を設定する。出口は 1 階に 4 か所、2 階に 8 か所、3 階に 8 か所の計 20 か所に設置されている。退場者は掲示門 40%、南門 30%、東門 20%、北門 5%、松前門 5% の割合で各門へ向かうものとする。全退場者の 95% が目的地に到達した時点で、シミュレーションを終了する。

効率的かつ安全な退場を実現するため、以下の 3 種類の規制退場方法を検討する。

- **階ごと方策（両側）**：1 階、2 階、3 階の順で退場させ、各階では両端から中央に向かって退場する（図 4）。
- **階ごと方策（片側）**：1 階、2 階、3 階の順で退場させ、各階では左側から右側へ順番に退場する（図 5）。
- **列ごと方策**：全フロアで縦列ごとに左から順番に退場させる（図 6）。

シミュレーションでは、退場完了までのステップ数を効率の指標とし、退場者同士の合計接触回数を安全性の指標として評価する。

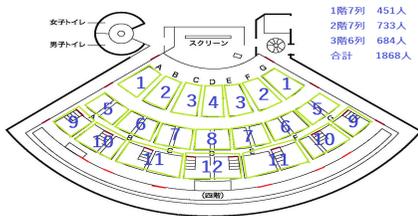


図4 階ごと方策（両側）の退場順番

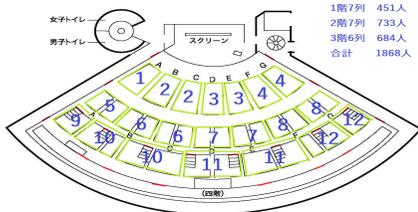


図5 階ごと方策（片側）の退場順番

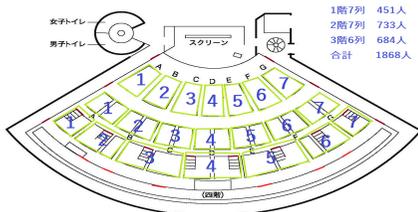


図6 列ごと方策の退場順番

4.3 シミュレーションにより得られた結果

各方策に対して、10回のシミュレーションにおける退場完了ステップ数と合計接触回数の箱ひげ図を図7と図8に示す。図7に示すように、列ごと方策が最も退場完了ステップ数が少なく、効率的であることが示された。これは、列ごと方策では全フロアで同時に退場が開始されるためであると考えられる。一方、階ごと方策（両側）が最も接触回数が少なく、安全性が高いことが確認された。これは、退場者の分散が図られ、混雑を避けることで接触回数を低減できるためである。これらの結果から、安全性と効率性間のトレードオフが確認できた。

本研究で実施したシミュレーションにより最適な退場方策を決定することで、群集事故のリスク低減に寄与する。今後の課題として、実環境での人流データを計測し、そのデータを用いてMASのパラメータを調整することが挙げられる。さらに、調整したMASを用いて人流を定量的に分析し、現実的な状況に即した最適な退場方策の構築を目指す。

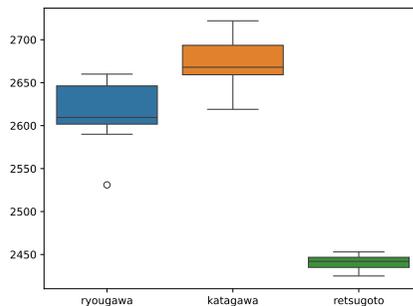


図7 退場完了ステップ数の比較

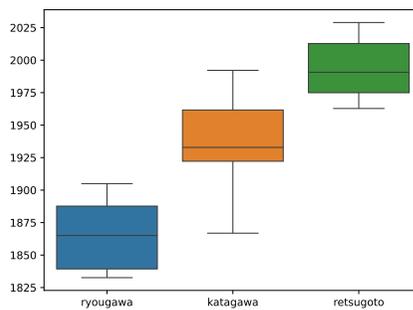


図8 合計接触回数の比較

5 おわりに

本稿では、中村研究室において、東海大学湘南キャンパスを対象として、オペレーションズ・リサーチ (OR) の手法を用いて行われた3つの卒業研究を紹介した。これらの研究は、学生が日々の生活や部活動などで疑問に感じた事柄に対し、ORの手法を駆使して解決策を見出そうとしたものである。このような経験を通じて、勘や経験だけでなく、科学的な手法を用いて意思決定の支援を行うことの重要性を学生が実感できたと思えば幸いである。

今後も、中村研究室では学生の主体的な研究活動を支援し、ORの理論と応用に関する研究を推進することで、東海大学から社会全体に至る様々な問題の解決に貢献していきたいと考えている。

謝辞

AED配置場所の提案 [1] を進めるにあたり、健康推進室のご担当者様より東海大学湘南キャンパスでのAED使用状況に関する貴重な記録をご提供いただきました。また、最適な運動後の補食 [2] で得られた結果

に対して管理栄養士から評価をいただき、有益な示唆を得ることができました。卒業研究に取り組むにあたり、情報提供および専門的な助言をいただいた皆様にご心より感謝申し上げます。最後に、卒業研究に取り組んでくれた、鈴木君、久保田君、岩崎君、竹内君、朝雄君に感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] 鈴木太一, “数理最適化による AED 配置場所の提案—東海大学湘南キャンパスの場合—”, 2022, 東海大学 情報理工学部 コンピュータ応用工学科 2021 年度卒業研究.
- [2] 久保田竜成, “東海大学湘南キャンパスにおける最適な運動後の補食”, 2023, 東海大学 情報理工学部 コンピュータ応用工学科 2021 年度卒業研究.
- [3] 岩崎亮介, 竹内仁ヤ, 朝雄優太, “効率性と安全性を考慮した規制退場方策の定量的評価—東海大学湘南キャンパスを例として—”, 2024, 東海大学 情報理工学部 コンピュータ応用工学科 2021 年度卒業研究.
- [4] 総務省消防庁, “令和 5 年版:救急救助の現況”, 2024. [Online]. Available: https://www.soumu.go.jp/main_content/000924645.pdf
- [5] 一宮彰悟, 原嶋勝美, “大型商業施設における AED の効果的な設置位置”, 第 86 回全国大会講演論文集, vol. 2024, no. 1, pp. 853–854, 2024.
- [6] 旭化成ゾールメディカル, “AED (自動体外式除細動器) についての基礎知識”, Accessed on 2022 年 1 月 8 日. [Online]. Available: <https://www.ak-zoll.com/aed/aboutaed/>
- [7] 東海大学湘南健康推進室, “AED 設置場所”, 2024, Accessed on 2022 年 1 月 11 日. [Online]. Available: <http://www.tsc.u-tokai.ac.jp/pubhome/hokenc/info/aed-place.html>
- [8] 久保幹雄, Python による実務で役立つ最適化問題 100+ (1) —グラフ理論と組合せ最適化への招待— 朝倉書店, 2022.
- [9] 松本恵, “「スポーツと栄養」—コンディショニングと栄養摂取”, 日大医学雑誌, vol. 80, no. 2, pp. 75–80, 2021.
- [10] 東郷将成, “高強度運動後の早期回復を目指した栄養補給に関する研究”, 酪農学園大学, 2018.
- [11] 高橋彰, 安福健祐, “大規模イベント終了後の群集制御に関するマルチエージェントシミュレーションの適用性”, 日本建築学会計画系論文集, vol. 89, no. 819, pp. 808–817, 2024.
- [12] “Mas とは?—mas コミュニティ—”, 構造計画研究所, 2000, Accessed on 2024 年 1 月 9 日. [Online]. Available: <https://mas.kke.co.jp/about/>

スマートグリッドとセキュリティ：最新技術，課題と今後の方向

慎 祥 撰^{†1}

Smart Grid and Cyber Security: State of the Art, Challenges and Future Directions

by

Sanggyu Shin

Abstract

This paper comprehensively reviews smart grid security and introduces system architecture, attack methodology, defense strategies, and subsequent smart grid-related security issues. A detailed analysis of various attack measures focused on new attack methods for each component of the smart grid was performed. In particular, I introduce extensive data on attacks that integrate multiple attack strategies and exploit vulnerabilities in various smart grid components to increase negative impact. In addition, by examining the role of artificial intelligence technology in smart grid security and subsequent research tasks, we present future research directions on innovative detection and risk mitigation strategies, including machine learning.

Keywords: smart grid, cyber security, ICT, guideline

1 はじめに

既存の電力システムは数十年間、電気分配に欠かせない要素であり、エネルギー伝送において核心インフラの役割を果たした [1]。しかし、増加する電気需要と再生可能エネルギー資源との統合は、より進歩的で強化された電力網システムの構築を促した。その結果、電力網に先端の情報通信技術（ICT）を統合したスマートグリッド（smart grid）が、電気分配の効率性、持続可能性及び信頼性を強化するために導入された [2]。

ICTを組み合わせたスマートグリッドは、電力と情報の双方向の流れが可能になり、エネルギーインフラの現代的な中枢として位置づけられる [3]。ICTを活用したスマートグリッドは、動的な価格設定、効果的な負荷管理、効率的な運用を可能にし、停電を軽減し、システムの安定性を向上させることができる [4][5]。また、高度配電管理システム（ADMS）のような知能型デバイスは、需要側の電力管理を可能にし、高いエラー

感知および自動化技術を採用することで、運営および管理コストを削減することができる [6][7]。スマートグリッドはまた、さまざまなエネルギー資源の統合を容易にする。特に、分散型エネルギーリソース（DER）を通じた分散型電力生産は送電損失を減らし、エネルギー効率を改善する [8]。このようにスマートグリッドは数多くの利点を提供するが、スマートグリッドの連結性と複雑性が増加するにつれて多様なセキュリティ脅威に露出される。スマートグリッドは、様々な攻撃の潜在的な対象となり、これらの攻撃は ICT インフラの脆弱性を悪用して電力供給を停止したり、敏感なデータを損傷したり、グリッド構成要素に物理的な損傷を与えることで行われる。このようなリスクに備えるために、スマートグリッドでセキュリティを改善するための様々な戦略が提案された。具体的に、スマートグリッドは高いモニタリングおよび探知技術を統合し、潜在的攻撃に対するリアルタイム警告および対応を提供している [9]。

暗号化、認証、不正侵入検知システム（IDS）のような従来のセキュリティ戦略は、スマートグリッドのセキュリティを維持するために必須であるが、持続的

^{†1} 東海大学 情報理工学部 コンピュータ応用工学科
Dept. of Applied Computer Engineering, School of Information Science and Technology, Tokai University

に進化し、ますます精巧になるサイバー攻撃に対抗するには十分ではない可能性がある。スマートグリッドの複雑な構造と多様な構成要素は、高いサイバー攻撃に対抗するのに相当な困難をもたらすため、革新的で効率的なソリューションが必要だ。

最近、進化する攻撃の脅威に対応するために、マシンラーニング、ブロックチェーンのような新しい技術が広範囲に研究されており、スマートグリッドセキュリティの脅威を理解し、緩和するのに可能性があることが立証されている。最近、大規模言語モデル (LLM) もサイバーセキュリティと攻撃探知に大きな潜在力を見せている [10]。このような動きの備えて、Zibaeiradらはスマートグリッドを標的とする様々なネットワーク攻撃を調査し、高い脅威をよりよく予防し、探知する潜在力を示す新しい戦略を調査するために、包括的な文献検討を行った [11]。

この論文では、様々な攻撃手法、探知及び対応戦略、敵対的マシンラーニング攻撃及び LLM の新たな脅威に対する詳細な検討を行い、スマートグリッド内の潜在的なセキュリティ課題とソリューションに対する全体的な概要を論じる。

2 スマートグリッド

スマートグリッドとは日本では「次世代電力網」を指す新たな電力供給システムのことであり [12]。従来の電力供給システムに情報通信技術を組み合わせて、電力の流れを供給側と需要側の両方から制御できる双方向の電力網を構成する。このシステムは、あらゆる電源から電力供給側と需要側の相互連携を行い、監視・制御し使用する電力量をリアルタイムで最適化を行うことで、エネルギー効率の向上、コスト削減、そして再生可能エネルギーの統合を実現する。スマートグリッドの実現には、通信技術と自動化技術の統合が核心である。例えば、スマートメーターの導入によって消費者の電力使用状況を正確に把握し、電力会社にリアルタイムのデータを提供できる。集めたデータを分析し、電力会社は需要に応じた電力供給を行い、消費電力の少ない時間帯には供給量を減らしたり、エネルギーロスを削減できる。

2.1 スマートグリッドの課題

電力インフラにおける電子デバイスと通信ネットワークの広範な相互接続性の前提としているため、サイバー攻撃に特に脆弱であり、サイバーセキュリティはスマートグリッドの重要な問題である。その上、AI・IoT等のデジタル技術の活用が著しい中、電力分野においてもその活用が進みつつある。デジタル技術は、発電・

送電・配電・小売等のそれぞれの産業の効率化に資するだけでなく、分散化電源の活用の推進にも活用される。さらに、スマートメーターから得られる電力データを、防災対策や社会課題の解決に使う動きも生まれつつある。そのため、サイバーセキュリティ対策の強化の必要性はますます高まっている [13]。

再エネの導入拡大やデジタル化の進展、広域運用の拡大は、不可逆的な流れであり、いずれもサイバーセキュリティリスクを高める方向に働いており、関連法律制定が進んでいる。他、スマートグリッドのセキュリティ対策は、単にデータの保護に留まらず、電力網の物理的な安全性を確保することも含まれる。電力システムに対するサイバー脅威に対して、諸外国はセキュリティ対策向上に向けた取組を強化している。特に、EUは、NIS2 指令、Network Code、サイバーレジリエンス法案等、強制力の高い取組を推進している。国内においても、電気事業法に基づいて技術基準やガイドラインが整備されており、電力分野に求められるセキュリティ対策事項は整理されつつある [14]。

2.2 スマートグリッドの構造

図 1 はスマートグリッド上の全体的な電力制御システムの流れを表している。このように、電力制御システムの複雑な構造と多様なコンポーネントにより、スマートグリッドでのセキュリティは多くの脆弱性を抱えている [15]。図 1 のような相互作用を基に、スマートグリッドは、管理、分配、通信、セキュリティ、および拡張性を含む特定の運用集中度を考慮して、様々なアーキテクチャに構築できる。たとえば、マイクログリッドおよびピアツーピアアーキテクチャは、電力の生産と分配に重点を置き、地域のエネルギー生産と参加者間の直接エネルギーの取引を容易にする。一方、階層のおよびクラウドベースのアーキテクチャは、拡張可能で中央集中化されたエネルギー管理に重点を置き、スマートグリッドサイバーインフラ全般で制御およびデータ分析機能を向上させる。他に、ゼロトラストおよびエンドツーエンド通信アーキテクチャは、セキュリティを維持し、安全で効率的なデータ交換を保証することを目的としている。各アーキテクチャモデルは特定の側面に重点を置いていますが、スマートグリッドの設計および機能には、凝集力のある階層化されたフレームワークが不可欠である [11]。

Santacana らは電力変換/転送/保存/消費階層、センサー/アクチュエータ階層、通信階層、意思決定インテリジェンス階層で構成された 4 階層モデルを提案した [16]。Stoustrup らは物理的階層、制御階層、データ通信階層、ネットワーク階層、監督階層、管理階層

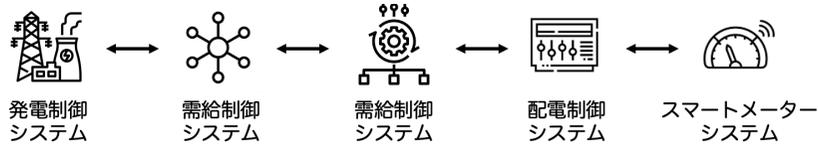


図1 電力制御システムにおける脅威 [15]

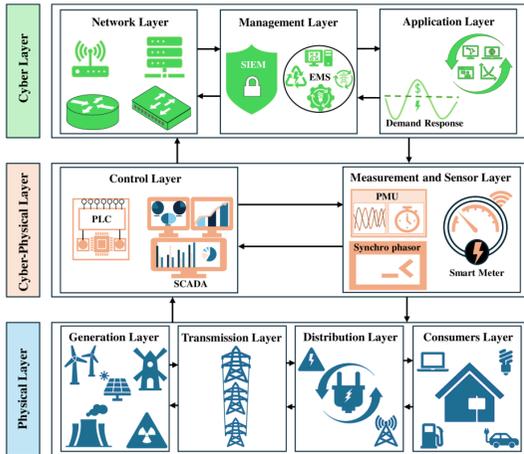


図2 スマートグリッドのレイヤ [11]

の6つの階層フレームワークを提示した [17].

Zibaeirad らは、それぞれ固有の下位階層を持つ3つの基本階層を持つ、より一般化されたフレームワークを提案した。図2は、彼らが提案したフレームワークの3つの基本階層を示す [11].

図1と図2の各システムとレイヤーで生じるセキュリティ問題とそれを解決するために行われた研究について今から述べる。

3 スマートグリッドにおける主要な脆弱性

スマートグリッドのセキュリティ問題は、単にデータの保護に留まらず、電力網の物理的な安全性を確保することも含まれる。特に多くの再生可能エネルギー発電のシステムは、遠隔地域に設置されており、物理的なセキュリティが脆弱な場合がある。これには、まず通信ネットワークのセキュリティ強化やシステムの脆弱性の特定と修正技術の用意、そして継続的な監視と対応のようなマネジメント対策などが必要です。そのため、サイバーセキュリティ対策は、スマートグリッドの全体的な設計と運用に組み込むべきである。

主要な脆弱性としては、デバイスに対するセキュリティ脆弱性、通信ネットワークの脆弱性、システム運用の複雑さによる脆弱性が挙げられる。デバイスに対

するセキュリティ問題には、スマートメーターや他のスマートグリッド機器が、不正アクセスやデータ漏洩のリスクにさらされている。

4 マネジメント的なリスク対策

技術的なセキュリティ対策に関する研究を論議する前に、日本国内と国際的に行われている法律・規制とシステム管理のリスクを軽減するためのガイドラインのようなマネジメント的なリスク対策に関して述べる(表1)。

4.1 技術基準やガイドライン

EU加盟国は、欧州委員会とEUサイバーセキュリティ機関ENISAの支援を受けて、欧州の通信・電力分野のサイバーセキュリティとレジリエンスに関する初の報告書を2024年7月発表した [18]。この報告書では、サプライチェーンの安全性に対するリスク、サイバー専門家不足、サイバー犯罪者や国家に支援された脅威行為者による悪質な活動もたらすリスクなど、多くのリスクに対する懸念が指摘されている。また、リスク評価では、技術的リスクと非技術的リスクをより詳細に特定した。電気通信と電力の両セクターにおいて、サプライチェーンのリスクは、特に5Gの展開と再生可能エネルギーのインフラに関して、依然として主な懸念事項である。ランサムウェア、データワイパー、ゼロデイ脆弱性の悪用も、特に運用技術に関わる両分野において、継続的ではあるが喫緊の懸念事項として認識された。

日本国内においても、電気事業法に基づいて技術基準やガイドラインが整備されており、電力分野に求められるセキュリティ対策事項は整理されつつある。海外では、罰則規定のある法規制において、電力会社におけるサプライチェーン・リスク管理を求めている(表1)。ドイツでは、一部の電力会社に対して、導入する重要部品に関する政府への事前通知・審査を求めている。また、英国では、一部の電力会社に対して、サプライヤー契約に関する政府への通知を求めている。日本国内では、電力システムの各プレイヤーは、ガイドライン等に基づいた一定の対策が求められている [19].

表2は、日本国内での電力制御システムに対する取

表 1 海外電力分野におけるサプライチェーン・リスクに関する規制状況 [14]

| 国・地域 | アメリカ | ドイツ | イギリス | 仮名ユーロ |
|--------------------------|---|---|---|--|
| 法規制 | ・ 連邦電力法 | ・ IT セキュリティ法 2.0 ・ エネルギー産業法 ・ BSI 法 | ・ NIS 規則 ・ 国家安全保障・投資法 (NS&I Act) | ・ NIS 指令/NIS2 指令 ・ EU Regulation No. 2019/943 |
| 要件文書 | ・ NERC CIP-013: Cyber Security - Supply Chain Risk Management | ・ IT セキュリティカタログ (IT Sicherheitskatalog) | ・ NIS Guidance ・ Cyber Assessment Framework (CAF) | ・ EU 各国の国内法により 規程 ・ Network Code on Cybersecurity |
| 所管組織 | ・ FERC (連邦エネルギー 規制委員会) ・ NERC (北米電力信頼 度協議会) | ・ BSI (連邦情報セキュリ ティ庁) ・ BMI (連邦内務省) ・ BNetzA (連邦ネット ワーク庁) | ・ NCSC (国家サイバー セキュリティセンター) ・ Ofgem (ガス・電力市 場局) ・ BEIS (ビジネス・エネ ルギー・産業戦略省) | ・ EU 各国の所管省庁 ・ ENTSO-E |
| 電力会社に求められるサプライチェーン・リスク対策 | ・ サプライチェーン・リス ク管理の実施 ・ サプライチェーン・リス ク管理計画の定期的な 見直し ・ サプライチェーン・リス ク管理状況の NERC への報告 | ・ サプライチェーン・リス ク管理の実施 ・ 導入する重要部品に関 する政府への事前通知・ 審査 ・ インシデント情報等に関 する政府への報告 | ・ サプライチェーン・リス ク管理の実施 ・ 対策状況に関する政府へ の定期的な報告 ・ サプライヤー契約に関 する政府への通知 ・ 政府による調査・介入へ の協力 | ・ サプライチェーン・リス ク管理の実施 ・ 人的サプライチェーンへ の対策 (産業スパイへ の対策, 企業秘密の保 護など) ・ 委託先や導入部品のサイ バーセキュリティ対策 の検証 |
| 罰則等 | ・ 違反度合いに応じた罰則 規程あり | ・ 最大 2,000 万ユーロ 又は企業の全世界売上 高の 4%のいずれか高 い方の金 | ・ 最大 1,700 万ポンドの 罰金 | ・ NIS2 指令では, 最大 1,000 万ユーロ又は企 業の全世界売上高の 2% のいずれか高い方の罰金 |

組を整理している。

5 スマートグリッドのサイバーセキュリティ

スマートグリッドの主なサイバーセキュリティ目標は、信頼、整合性、および機密性である [20]。このようなサイバーセキュリティ目標は、認証、セキュリティ通信プロトコル、疑わしい活動に対するネットワークモニタリングおよび暗号化を実装することで達成できる [21]。

Gunduz らの論文では、IoT ベースのスマートグリッドの脅威と潜在的なソリューションを分析している。彼らの論文ではサイバー攻撃の類型に焦点を合わせ、スマートグリッドのサイバーセキュリティ状態に対する深層的な情報を提供している。特に、ネットワークの脆弱性、攻撃対応措置、およびセキュリティ要求事項についての議論と検討を行っている [22]。

水野 修は論文で電力系新サービスの基本的なコンセプトを紹介及びサービスの実現に対し必要となる、セキュリティ要件について、内外の文書を紹介している。電力の需要家（ユーザ）が太陽光発電など小規模な発電設備を所有することが一般化（分散電源）しつつある。電力会社、需要家及び電力需給調整サービスを提

供するサービスプロバイダなどから構成されるプレイヤーの関係が複雑になることから、特にデータセキュリティの重要性が増すと主張している。そのため、ネットワークを“セキュリティ的に信頼できないもの”という前提に立った「ゼロトラストアーキテクチャ」や、公的機関がデータを管理、提供する「データベースレジストリ」などの適用について議論している [23]。

他に、宮下 充史らは、電力ネットワークを支える高信頼通信について将来にわたり概説するとともに、高信頼通信に対する期待を述べている。彼らは再生可能エネルギーによる発電機器が大量に導入された環境下においても安定運用を実現する必要がある将来の電力ネットワークに対し、通信の観点から必要となると考えられる技術の方向性を整理した [24]。

5.1 産業制御システムでのサイバーセキュリティ

風力発電や太陽光発電の制御システム（発電制御システム）は、産業制御システム（ICS）に依存している。これらのシステムは攻撃者による悪用の可能性が存在する [25]。特に産業制御システムの IT 化が進むにつれてもっと攻撃されやすくなってきた。産業制御システムのオープン化が進み、制御システム間の通信

表2 電力制御システムに対する取組（ガイドライン等）[14]

| 名称 | 主な対象 | 発行主体 | 概要 |
|--|---------------------------|---------------|--|
| 電力制御システムセキュリティガイドライン | 電気事業の用に供する電気工作物 | 日本電気協会 | 電気事業法、電気設備に関する技術基準を定める省令及びその解釈に基づき、電気事業の用に供する電気工作物に対しては、本ガイドラインに基づく対策が求められる。 |
| スマートメーターシステムセキュリティガイドライン | スマートメーターシステム | 日本電気協会 | 電気事業法、電気設備に関する技術基準を定める省令及びその解釈に基づき、スマートメーターシステムに対しては、本ガイドラインに基づく対策が求められる。 |
| 系統連系技術要件 | 系統連系する発電設備 | 各一般送配電事業者 | 系統連系する発電設備にすべからく求められる対策。具体的には、ネットワーク接続点の保護、マルウェア対策、系統運用者に対するセキュリティ管理責任者の通知の3点が求められる。 |
| 出力制御機能付PCSの技術仕様 | 出力制御機能付PCS | JPEA・JEMA・電事連 | 出力制御機能付PCSにおいて満たすべきサイバーセキュリティ対策の要件を示した技術仕様。 |
| 自家用電気工作物に係るサイバーセキュリティの確保に関するガイドライン（内規） | 自家用電気工作物（発電設備と需要設備の両方を含む） | 経済産業省 | 自家用電気工作物（発電設備と需要設備の両方を含む）に求められるサイバーセキュリティ対策事項を記載したガイドライン。 |
| 小売電気事業者のためのサイバーセキュリティ対策ガイドライン | 小売電気事業者 | 資源エネルギー庁 | 小売電気事業者が主体的に取り組むことが求められるサイバーセキュリティ対策に関して記載したガイドライン。 |
| ERABに関するサイバーセキュリティガイドライン Ver2.0 | ERABに関する事業者 | 経済産業省・IPA | ERABのサービスレベルを維持するためにERABに参画する各事業者が実施すべき最低限のセキュリティ対策の要求事項を示したガイドライン。 |
| 特定卸供給に係るサイバーセキュリティ確保の指針 | 特定卸供給事業に関するシステム | 資源エネルギー庁 | 特定卸供給事業を実施する上で確保すべきサイバーセキュリティとその対策の内容を示すことを目的とした指針で、特定卸供給事業の届出の際に、本指針に基づく対策実施状況を記載する必要がある。 |

インタフェースのイーサネット化や制御システムの汎用OS化（Windows Embedded, Linuxなどの利用）と共に、産業制御システムを狙った攻撃も進化している。例えば、風力タービンの制御システムに不正アクセスし、出力の変更やシステムの不安定化を引き起こされることが可能である。太陽光発電システムも同様に、制御システムの脆弱性を悪用することで、エネルギー供給の不均衡やシステムの損傷につながる恐れがある。2010年にはStuxnetの登場により、イランの核施設が攻撃された。クローズ環境だったがUSBメモリ経由での感染であった。他にも2016年のウクライナキエフでのサイバー攻撃により停電（時限式、モジュール化）や2022年10月10日にはウクライナの電力会社の送電線網がサイバー攻撃を受け停電が発生した[26]。このサイバー攻撃はウクライナ全土の重要インフラを標的としたミサイル攻撃の開始[27]と同時に引き起こされていた[28]。そのため、制御システムセキュリティ標準の制定（国際：IEC 62443 / 業界：NERC CIP, NIST IR 7628）や国家レベルの取り組み（米国：NIST Cybersecurity Framework / EU：NIS Directive）が行われるなど、世界中で規制・ガイドライン強化の動きが進行中である[29]。しかし、サ

イバー攻撃の対象や手法が多様化しており、クラウドサービスへの攻撃が顕著に増加している（2020年：6%、2023年：25%）。また、組織のウェブサイトへの攻撃（2020年：6%、2023年：17%）やWi-Fiネットワークの侵害も（2020年：3%、2023年：17%）に増加している[30]。

5.2 配電と送電自動化の脆弱性

配電分配自動化（DA）と送電自動化（FA）は、スマートグリッドでの不可欠な要素である。これらのシステムを用いることで電力網の遠隔監視と制御を可能になり、電力供給の最適化に寄与するが、セキュリティが不十分な場合には重大なリスクを生じさせる。リスクはDAとFAシステムが安全でない産業制御プロトコルを使用する場合生じる。セキュリティ機能が不足しているプロトコルを使用すると、攻撃者による不正アクセスやデータの改ざんのリスクはますます高くなる。特に最近では、多くのDAとFAシステムは、クラウドベースのアプリケーションやリモートサービスに移動しており、これらのサービスのセキュリティ脆弱性を悪用されるリスクが挙げられる。これらの脆弱性に対処するためには、セキュリティプロトコルの強化や定期的なセキュリティ評価、および継続的な監視が

必要である。

Khan らの研究では、最先端の統合人工知能およびブロックチェーン支援スケジューリング、管理、最適化、個人情報保護およびスマートグリッドおよび電力分配自動化のセキュリティについて体系的な検討を行った。この研究でスマートグリッドの物理的階層に対するリアルタイム分析を行い、システム分析に悪意的な攻撃が含まれ、リアルタイムで効果的な一般化された防御階層を維持する統合され抽象化された状態空間のフレームワークを設計した。また、データ基盤、対象防御、計算、保存などを含め、このドメインの既存の最新技術を提供する情報管理アプローチと共に、新しい電力分配自動化関連制限事項リストを代案した [31]。

Hasan らの論文では、スマートグリッドのサイバーフィジカルとサイバーセキュリティシステム、標準プロトコル及び課題を総合的に検討している。スマートグリッドモデル、コア要素、高度配電管理システム (ADMS)、監視制御システム及びデータ収集 (SCADA)、先進的なメータリングインフラ (AMI) について議論しており、スマートグリッドのサイバーフィジカルシステム通信標準およびプロトコルについても議論している。スマートグリッドのサイバーフィジカルシステム通信技術、標準及びプロトコル、応用プログラム間の相関関係を提示し、サイバーセキュリティ原則、標準及びプロトコルについて議論しており、スマートグリッドのサイバーフィジカルシステム、サイバー攻撃及びサイバーセキュリティシステムに関するいくつかの課題を議論し、将来の研究のためのいくつかのソリューションを提案している [32]。

5.3 創出によるリスク軽減

スマートグリッドで様々なネットワーク攻撃を発生した際には、できるだけ早く攻撃を探知し、発生可能なリスクを軽減するための体系的な対策を行う必要がある。最近、ゲーム理論、グラフ理論、ブロックチェーンやマシンラーニング技術を適用した探知技術が発表されており、その効果性と普及性が立証されている。ゲーム理論は敵対的力学をモデリングし、グラフベースの技術はグリッドのネットワーク特性を活用し、ブロックチェーンは変更不可能な監査追跡を提供し、マシンラーニングは予測可能な防御を可能にする [11]。

ゲーム理論は、参加者が他の人の行動によって結果が変わる戦略的状况で決定を下す方式を研究する。これを使用して供給者、顧客、潜在的攻撃者のような多様な個体間の複雑な相互作用をモデリングし、関連した多様な脅威と脆弱性を分析してスマートグリッドで

強力なセキュリティ措置を開発することができる [33]。

Alpcan と Basar は悪意のある攻撃者と IDS 間の相互作用をモデリングするために、2 人用ゼロサム確率的セキュリティゲームを提案した [34]。

ゲーム理論はまた、動的スマートグリッド脅威 (例:APT) に対する適応型防御アプローチを提供します。典型的な例としては、防御の詐欺があります。これは、攻撃者の認識と信頼を操作し、システムとデータを保護することによって、攻撃者を誤導する [35]。

スマートグリッドのネットワークの脅威を防御するために、複数のグラフベースの方法が開発されました。[36]。最近の研究は、従来のグラフ理論を超えて、グラフニューラルネットワークを統合して、攻撃検出と緩和戦略を強化します。このような技術はグラフ理論の原理を活用してデータ内の隠された構造と不規則性を明らかにし、ネットワークセキュリティ、電力システム、詐欺防止のような多様なドメインで効率的な攻撃探知を容易にする [37]。

5.4 制御システムセキュリティ国際標準

制御システムセキュリティ国際標準である“IEC 62351-3 Ed. 2.0:2023 (b)”では、“電源系統マネジメント及び関連情報交換—データ及び通信セキュリティ—第 3 部：通信ネットワーク及びシステムセキュリティ—TCP/IP を含むプロファイル”のタイトルで、TCP/IP をメッセージ伝送階層として使用し、サイバーセキュリティが必要な場合、伝送階層セキュリティを活用するプロトコルに対して機密性、整合性保護およびメッセージレベル認証を提供する方法を明示している。他、伝送階層セキュリティ (TLS) のメッセージ、手順、およびアルゴリズム仕様に対する制約を通じて TCP/IP ベースプロトコルを保護する方法を明示している [38]。

IEC 62443 [39] は多くの制御システムに関する標準を体系化して統合した汎用的な制御システムセキュリティ標準である。サイバーセキュリティ対策ガイドラインの多くは、一般的な企業における組織面、運用面で言及されることが多く、工場などの制御システムにあてはめた場合うまく適合しない場合がある。例えば、セキュリティ標準である ISO/IEC 27001 でもカバーできることもあるが、ISO/IEC 27001 では、制御システムの設計領域までは言及されていないため、これらの標準に従った仕組みを構築していたとしても、製造現場のセキュリティ対策が不十分な場合もある。一方、IEC 62443 は、制御システム設計や、これらのセキュリティを製品に実装する領域まで取り上げており、工場などを含む制御システムセキュリティを網羅的にカバーしていることが特徴である [40]。

6 ま と め

本論文では、スマートグリッド構築におけるサイバーセキュリティ問題について考察した。また、将来発生しうる新しいサイバーセキュリティ課題と解決可能性について詳しく調べた。その上、多様な攻撃タイプとスマートグリッドセキュリティに対する意味を総合的に分析した。スマートグリッドは、エネルギー効率の向上とコスト削減を目標とする重要な技術であることには異論がないが、また多くのサイバーセキュリティ問題を内包している。スマートグリッドの脆弱性と再生可能エネルギー発電に伴う新たなセキュリティ問題、配電自動化および送電自動化システムの脆弱性、先進的なメータリングインフラ (AMI) 管理システムだけでなく、国際標準ガイドラインと国内標準管理システムについて考察した。サイバーセキュリティはスマートグリッドの成功と持続可能性の核心だ。技術の進化に伴い発生するセキュリティ問題を解決するためには、継続的な対策を講じるとともに、対応技術の継続的な発展を図る必要がある。本論文は、現在の脅威に対する理解を向上させるだけでなく、未来研究のための核心領域を識別し、スマートグリッドに対する急速に進化する脅威に歩調を合わせるためのサイバーセキュリティ問題に対する緊急の必要性を強調した。スマートグリッドの将来は、セキュリティと効率のバランスを保ちながら、エネルギー産業の変化を推進することである。

参 考 文 献

- [1] S. M. Amin and B. F. Wollenberg, "Toward a smart grid: power delivery for the 21st century," IEEE power and energy magazine, vol. 3, no. 5, pp.34-41, 2005.
- [2] X. Fang et al., "Smart grid—the new and improved power grid: A survey," IEEE communications surveys & tutorials, vol. 14, no. 4, pp.944-980, 2011.
- [3] V. C. Gungor et al., "Smart grid technologies: Communication technologies and standards," IEEE Transactions on Industrial informatics, vol. 7, no. 4, pp.529-539, 2011.
- [4] H. Farhangi, "The path of the smart grid," IEEE power and energy magazine, vol. 8, no. 1, pp.18-28, 2009.
- [5] W. Wang, Y. Xu and M. Khanna, "A survey on the communication architectures in smart grid," Computer networks, vol. 55, no. 15, pp.3604-3629, 2011.
- [6] Y. Yan et al., "A survey on smart grid communication infrastructures: Motivations, requirements and challenges," IEEE communications surveys & tutorials, vol. 15, no. 1, pp.5-20, 2012.
- [7] G. Dileep, "A survey on smart grid technologies and applications," Renewable energy, vol. 146, pp.2589-2625, 2020.
- [8] F. Rahimi and A. Ipakchi, "Demand response as a market resource under the smart grid paradigm," IEEE Transactions on smart grid, vol. 1, no. 1, pp.82-88, 2010.
- [9] C.-W. Ten, G. Manimaran and C.-C. Liu, "Cybersecurity for critical infrastructures: Attack and defense modeling," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, vol. 40, no. 4, pp.853-865, 2010.
- [10] M. Shao et al., "An empirical evaluation of llms for solving offensive security challenges," arXiv preprint arXiv:2402.11814, 2024.
- [11] A. Zibaeirad et al., "A Comprehensive Survey on the Security of Smart Grid: Challenges, Mitigations, and Future Research Opportunities," arXiv preprint arXiv:2407.07966, 2024.
- [12] "スマートグリッドとは?仕組みやメリット、日本での取り組みも紹介", MITDUI & CO., LTD., 2024, Accessed on 2024年10月29日. [Online]. Available: <https://www.mitsui.com/solution/contents/solutions/re/174>
- [13] 資源エネルギー庁, "電力システムを取り巻く現状", 2024. [Online]. Available: https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/069_03.00.pdf
- [14] 資源エネルギー庁, "電力分野におけるサイバーセキュリティについて", 2024. [Online]. Available: https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/073_07.00.pdf
- [15] "電力制御システムにおけるサイバーセキュリティリスクへの対応支援", PwC コンサルティング合同会社, Accessed on 2024年10月29日. [Online]. Available: <https://www.pwc.com/jp/ja/services/digital-trust/cyber-security-consulting/electricity-system.html>
- [16] E. Santacana et al., "Getting smart," IEEE power and energy magazine, vol. 8, no. 2, pp.41-48, 2010.
- [17] J. Stoustrup et al., "Smart Grid Control: Overview and Research Opportunities," Power Electronics and Power Systems, Springer International Publishing, 2019.
- [18] European Commission, "Risk assessment report on cyber resilience on EU's telecommunications and electricity sectors," 2024. Accessed on 2024年10月29日. [Online]. Available:

- <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/risk-assessment-report-cyber-resilience-eus-telecommunications-and-electricity-sectors>
- [19] 資源エネルギー庁, “電力システムにおけるサイバーセキュリティリスク点検ガイド”, 2024. [Online]. Available: <https://www.meti.go.jp/press/2023/03/20240322003/20240322003-a-1.pdf>
- [20] K. Kimani, V. Oduol and K. Langat, “Cyber security challenges for IoT-based smart grid networks,” *Int. J. Crit. Infrastruct. Prot.*, vol. 25, pp.36–49, 2019.
- [21] M. Humayun et al., “Cyber Security Threats and Vulnerabilities: A Systematic Mapping Study,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 45, no. 4, pp.3171–3189, 2020.
- [22] M.Z. Gunduz, R. Das, “Cyber-security on smart grid: Threats and potential solutions,” *Comput. Netw.* vol. 169, 2020.
- [23] 水野 修, “新エネルギーサービス実現のためのセキュリティ”, 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン, vol. 16, no. 2, pp.137-145, 2022.
- [24] 宮下 充史, 加川 敏規, 土屋 弘昌, “電力ネットワークにおける高信頼通信の現状と将来”, 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, vol. 16, no. 3, pp.176-184, 2022.
- [25] “スマートグリッドとサイバーセキュリティ：新たな課題と解決策”, Reinforz Insight, 2024, Accessed on 2024 年 10 月 29 日. [Online]. Available: <https://reinforz.co.jp/bizmedia/20875/>
- [26] 独立行政法人 情報処理推進機構 (IPA), “2022 年電力網への攻撃の事例”, 2024. [Online]. Available: https://www.ipa.go.jp/security/controlsystem/ug65p900000197wa-att/incident_11_20240417.pdf
- [27] REUTER, “Blackouts after Russian strikes deepen Ukraine’s concerns before winter,” Accessed on 2024 年 10 月 29 日. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/world/europe/blackouts-after-russian-strikes-deepen-ukrainesconcerns-before-winter-2022-10-10/>
- [28] REUTER, “Russian spies behind cyber attack on Ukraine power grid in 2022 - researchers,” Accessed on 2024 年 10 月 29 日. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/technology/cybersecurity/russian-spies-behind-cyberattackukrainian-power-grid-2022-researchers-2023-11-09/>
- [29] 佐々木 弘志, “産業用制御システムを襲うサイバー攻撃の実態・最新動向”, 2018. [Online]. Available: <https://www.nic.ad.jp/ja/materials/iw/2018/proceedings/d1/d1-3-sasaki.pdf>
- [30] “制御システムサイバーセキュリティ年次報告書 2024”, KPMG AZSA LLC, 2024. [Online]. Available: <https://kpmg.com/jp/ja/home/insights/2024/10/cyber-controlsystem-report.html>
- [31] A. A. Khan et al., “Artificial intelligence and blockchain technology for secure smart grid and power distribution Automation: A State-of-the-Art Review,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 57, 2023.
- [32] M. K. Hasan et al., “Review on cyber-physical and cyber-security system in smart grid: Standards, protocols, constraints, and recommendations,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 209, 2023.
- [33] W. Saad, Z. Han, H. V. Poor, and T. Basar, “Game-theoretic methods for the smart grid: An overview of microgrid systems, demand-side management, and smart grid communications,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 29, no. 5, pp.86–105, 2012.
- [34] T. Alpcan and T. Basar, “An intrusion detection game with limited observations,” in *12th Int. Symp. on Dynamic Games and Applications*, 2006.
- [35] M. N. A. Khalid, A. A. Al-Kadhimi, and M. M. Singh, “Recent developments in game-theory approaches for the detection and defense against advanced persistent threats (apts): A systematic review,” *Mathematics*, vol. 11, issue. 6, 2023.
- [36] Z. Mingqiang, H. Hui and W. Qian, “A graph-based clustering algorithm for anomaly intrusion detection,” in *2012 7th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE)*, pp.1311–1314, 2012.
- [37] T. Pourhabibi et al., “Fraud detection: A systematic literature review of graph-based anomaly detection approaches,” *Decision Support Systems*, vol. 133, 2020.
- [38] IEC, “Power systems management and associated information exchange - Data and communications security - Part 3: Communication network and system security - Profiles including TCP/IP,” 2023. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/68410>
- [39] IEC, “Security for industrial automation and control systems - Part 2-1: Security program requirements for IACS asset owners,” 2024. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/62883>
- [40] 長澤 宣和, “IEC 62443 とは何か、工場のサイバーセキュリティ対策のカギを握る国際標準を解説”, 2022. [Online]. Available: <https://monoist.itmedia.co.jp/mn/articles/2205/31/news006.html>

研究紹介：視線計測技術の最新研究成果 (2022-2023)

竹村 憲太郎 ^{†1}

Introductory Article: Recent Advances in Eye-Tracking Technology (Academic Year 2022-2023)

by

Kentaro Takemura

Abstract

This paper presents eye-tracking studies conducted at the Takemura Laboratory during the academic years 2022 to 2023. During this period, multiple findings have contributed to various research projects, including those on polarization, event-based vision, and corneal imaging.

Keywords: Eye tracking, Polarization, Iris detection, Event-based vision, Corneal imaging

1. はじめに

竹村研究室は、2013年度より東海大学情報理工学部コンピュータ応用学科にてスタートし、ヒューマンコンピュータインタラクション分野で重要と期待される視線計測技術を中心に研究を進めてきた。ハードウェアを含めたビジョンシステムとして視線計測技術の研究を行っており、本稿では2022年度から2023年度までの成果を紹介する。

2. 偏光マーカ

視線計測では、注視点を推定する際にディスプレイやカメラ、眼の幾何的な位置関係を解く必要があるため、近赤外光を照射するLEDをディスプレイに配置する等の工夫がなされている。この制約を解決するため、液晶ディスプレイから照射される光が直線偏光していることに注目し、偏光カメラを用いた計測手法の研究開発を進めてきた。近赤外LEDの代替手法としてディスプレイの四隅を検出する方法に加えて、ディスプレイの大型化にも対応するため、透明な半波長板をスクリーン上に配置する方法を提案した [1]。図 1(a) に示すようにディスプレイ上に配置した半波長板によってディスプレイから照射される光を任意の偏光角度に調整し、偏光角度を観測することでマーカの識別を行った。しかしながら、半波長板を直接スクリーン上に貼付すると動的に再配置をすることが困難である。そこで、動的な再配置を実現するため、図 1(b) のように液晶を用いて能動的にマーカの提示箇所を変更できるシステムも提案し、眼球の姿勢に合わせてマーカを再配置する手法を提案した [2]。

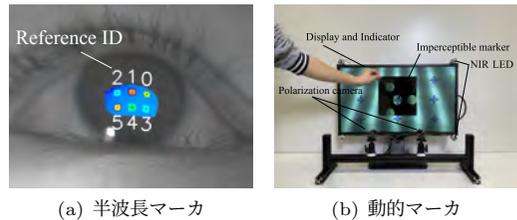


図 1 偏光を用いた不可視なマーカ提示及び検出

3. 瞳孔径を考慮した視線計測

回帰手法、モデルベース手法、Cross-Ratio 等の様々な視線計測アルゴリズムがこれまでに提案されているが、検出した瞳孔を基準に注視点の算出が行われる。しかしながら、瞳孔径が変化すると眼球に対する瞳孔中心の位置が変化するため、ユーザキャリブレーション等で算出したパラメータを継続して使用することが困難となる。この問題に対して、径の変化がない虹彩を検出することで、長時間の利用でも安定した計測を目指した。ただし、虹彩は一部が瞼に隠れるため、瞳孔と比較すると高精度な検出が困難である。そこで、セグメンテーション等が得意な深層学習手法を採用した。検出された虹彩領域 (図 2(a)) に対して楕円フィッティングを適用し (図 2(b)), 虹彩中心を用いた視線計測を実現した [3]。照明の点灯・消灯を行うことで意図的に瞳孔径を変更し、視線計測の精度評価を行ったところ、従来の瞳孔基準の視線計測と比較して、照明変化に対する安定性は増すことが確認できた。虹彩の検出精度には課題があり、瞳孔中心を用いた場合の精度には及ばなかったが、セグメンテーションの性能向上によって精度も追いつくことが期待できる。

^{†1} 情報理工学部 コンピュータ応用工学科

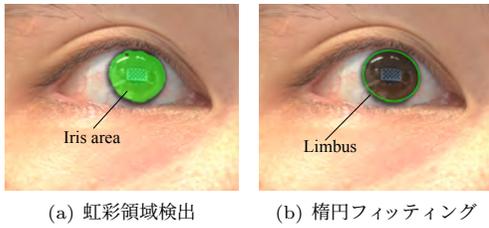


図2 虹彩検出を用いた視線計測

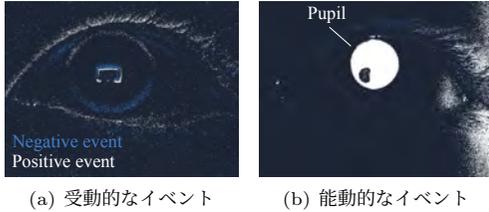


図3 イベントカメラを用いた瞳孔追跡

4. イベントカメラを用いた高速瞳孔追跡

イベントカメラの登場によって、視線計測分野では研究開発競争が激化している。イベントカメラは、輝度変化が生じたピクセルの情報をイベントとして非同期で出力するため、高速なセンシングが可能である。しかし、眼球運動に伴って発生するイベントは図3(a)に示すように疎であり、眼画像から特徴を抽出することは困難である。この問題の解決には、一般に深層学習の利用や可視画像とイベント情報を併用する手法が取られているが、我々はイベント情報のみで瞳孔追跡を行うことを目指し、能動的にイベントを発生させた。具体的には、近赤外光をカメラの光軸方向とそれ以外から交互に照射することで生じる明瞳孔と暗瞳孔を観測することで図3(b)のような密なイベントを得る。従来の明暗瞳孔法はフレーム間の差分を計算する必要があったため、イベントカメラと組み合わせたことは理にかなっている。検出されたイベントの重心を計算することで、2000 Hz以上の高速な瞳孔追跡を実現した[4]。

5. 角膜イメージング

角膜の表面に反射した環境像を歪なく取得する角膜イメージングは、代表的な研究テーマとして長く取り組んでいる。研究開始当初は、角膜に反射している物体を注視対象として認識する研究を進めてきたが、常時装着の視線計測装置を目指し、位置姿勢の推定にも取り組んだ。反射する照明パターンでの位置推定では性能が不十分であったため、Visual-Inertial SLAMに倣い、加速度センサを採用することで位置推定性能の向上を図った[5]。

また、角膜イメージングの新しい活用として、両眼を用いた三次元注視推定の誤差指標を提案した[6]。一般に、両眼から算出された視軸の交点を三次元注視点と扱うが、水平方向に誤差が発生した場合は、正しく推定できているか判断ができない。そこで、推定された三次元注視点の反射位置を基準に接平面を設置し、角

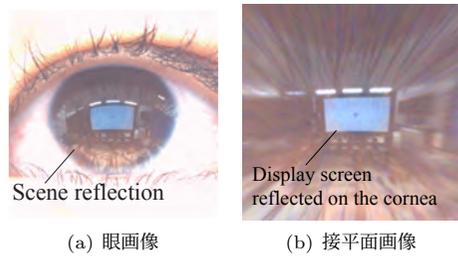


図4 角膜イメージング

膜イメージングによって環境像を抽出する。眼画像(図4(a))から接平面画像(図4(b))を生成し、両眼の画像で相関値を計算する。相関が高い場合は、三次元注視点が正しく推定できているが、誤差がある場合は著しく相関値が低下することを確認し、誤差指標として用いることが可能であることを確認した。

6. ま と め

多くの学生が大学院に進学すると共に、国際会議や論文誌での研究発表を目指して意欲的に取り組んでくれたことで、視線計測技術の発展に貢献するような成果が得られている。また、本稿では紹介できなかったが、学生と共に研究活動を行うことで、新たな研究分野としてソフトロボティクス[7]やRFTIR[8]等の研究成果も得られている。今後も、学生と共に学術的な挑戦を楽しんでいきたい。

謝辞

これらの研究の一部は、JSPS 科研費 JP21H0386, JP21K19800 の助成を受けたものである。また、共に研究に取り組んでくれた研究室の学生、卒業生に感謝する。

参 考 文 献

- [1] K. Koshikawa *et al.*, “Model-based gaze estimation with transparent markers on large screens,” in *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, vol. 6, no. ETRA, 2022.
- [2] Y. Inoue *et al.*, “Gaze estimation with imperceptible marker displayed dynamically using polarization,” in *Proc. of ETRA*, Article No. 14, 2022.
- [3] G. Tanaka *et al.*, “Eye gaze estimation using iris segmentation trained by semi-automated annotation work,” in *Proc. of SMC*, pp. 5126–5131, 2023.
- [4] T. Kagemoto *et al.*, “Event-based pupil tracking using bright and dark pupil effect,” in *Adjunct Proc. of UIST*, Article No. 24, 2023.
- [5] Y. Kanai *et al.*, “Cooperative eye tracking and localization based on corneal imaging,” in *Proc. of SII*, pp. 1–6, 2023.
- [6] N. Kawakami *et al.*, “Error metric using correlation between binocular corneal images,” in *Proc. of SMC*, pp. 5140–5145, 2023.
- [7] K. Chandrasiri *et al.*, “Transferable shape estimation of soft pneumatic actuators based on active vibroacoustic sensing,” *IEEE RA-L*, vol. 7, no. 4, pp. 9849–9856, 2022.
- [8] R. Wattanaparintorn *et al.*, “Vision-based tactile sensing using multiple contact images generated by re-propagated frustrated total internal reflections,” in *Proc. of SMC*, pp. 962–967, 2022.

研究室紹介：LSI 及び実装基板における信頼性確保

土屋 秀和*

Introductory Article: Ensuring reliability for LSI and mounting board

by

Hidekazu TSUCHIYA*

(received Oct 31, 2024 & accepted Nov 5, 2024)

Abstract

Our laboratory is researching mainly focused on increasing the speed and reliability of testing during LSI shipment and developing a tester that focuses on memory devices using boundary scan. In this article, describe the research themes.

Keywords: LSI Testing, Boundary scan, Low power

1. はじめに

2017年に日立オートモティブシステムズ株式会社（現：日立 Astemo 株式会社）在籍の会社員からコンピュータ応用工学科に着任し、現在8年目となる。私の研究室は、現在教員1名、大学院博士前期課程2名、学部生25名（3年生12名、4年生13名）の計28名で構成されている。研究内容としては、主に「LSI出荷時におけるテストの高速化および信頼性向上」及び「バウンダリスキャンによるメモリデバイスに着目したテストの開発」に関して行っている。以下に研究テーマを紹介する。

2. LSI 出荷時におけるテストの高速化および信頼性向上¹⁾

現在、LSIはあらゆる電子機器に組み込まれ、必要不可欠な電子デバイスとなっている。これまで、LSIは製造技術の進歩により、回路の大規模化による高機能化や動作速度の高速化などの発展を遂げてきた。しかし、現在の製造技術においても全てを良品として製造することが困難となっている。そのため、製造時における選別テストが必須となっており、数千万円～数億円の高性能LSIテストを使用して、テスト品質を確保する為に実動作速度で長い時間テストを行わなくてはならない。また、回路の大規模化が進むにつれて、回路が複雑となり完全テストが困難になっており、故障検出効率が低下する事象がLSIメーカーの抱える問題の一つとなっている。さらに、テスト時は回路の構造上、同時に動作する回路規模が大きくなる傾向にあり、その結果消費電力が増加することで異常な発熱やエレクトロマイグレーションと呼ばれる金属原子の移動が活発となることから、故障する可能性がある。このような背景より、回路の動作を分割して制御可能な構成とし、さらにGated Clockと呼ばれる同時に動作する回路規模を制御可能な技術を応用することで、テスト時の消費電力

を削減しつつ、実動作速度及びより短い時間で高い故障検出効率をはじめとしたテスト品質を確保しながらテスト可能な技術に関して研究を行っている。

テストを行う際には、テストパターンと呼ばれる評価対象のLSIに対する信号を印加する必要がある。印加する方法としては、LSIテストのメモリに事前に格納し直接印加する場合や、LSI内部に構成されたBIST (built in self test) と呼ばれる自己診断回路内のメモリに格納し印加する場合や、BISTのテストパターン発生器により自動生成し印加する場合等が挙げられ、テストパターン発生器（以下TPG）について研究を行っている。図1に示すような回路構成となっており、シフトレジスタSRの分割数を k 、同時に動作するSR数を g 、被テスト回路CUTの入力数を m とする。TPGはメモリMRとクロック制御部CPと k 個に分割されクロック制御が適用されたシフトレジスタSRにより構成される。MRは k ビットのバス幅を持ち、ATPG(automatic test pattern generator)と呼ばれる被テスト対象の回路構成情報に基づくコンピュータシミュレーションより生成されるテストパターンであるATPGベクトルの部分集合が格納され、格納されたデータがクロック制御に従って各SRに分配される。CPの入力であるイネーブル信号(enable_1～enable_k)の組み合わせにより、SR毎にクロック制御が行われ、CUTにおいて分割した回路毎にクロック供給のタイミングを制御することで、消費電力を削減可能である。

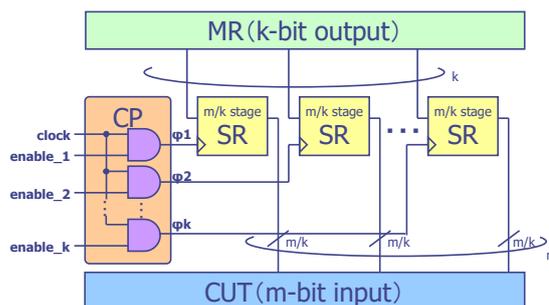


図1 テストパターン発生器の回路構成

* 東海大学情報理工学部コンピュータ応用工学科

TPGにおいて、ランダムパターンで検出困難な故障である rpr(random pattern resistant)故障の検出を疑似ランダムなテストパターンのみで試みた場合、膨大なテストパターンが必要となることや、検出できずに故障検出率の低下を招き出荷後の動作不良の発生率が高くなる可能性がある。そこで、本技術を適用した TPG ではクロック制御が適用された SR により、周期的に出現する被テスト回路の回路構成を考慮し生成した ATPG ベクトルの部分集合を用いることで、rpr 故障を検出する。また、rpr 故障以外の故障は SR のシフト動作による疑似ランダムベクトルを使用して検出する。このように、rpr 故障以外の故障検出には疑似ランダムベクトルを使用し、rpr 故障検出には ATPG ベクトルを使用することで、ATPG ベクトルの全てをメモリに格納せず、その部分集合のみをメモリに格納するため、メモリに格納する ATPG ベクトル数の削減が可能である。これにより、LSI テスタのメモリ増設が必要となる頻度を低減可能であり、コスト削減に寄与する。また、rpr 故障を ATPG ベクトルで検出することで、故障検出に冗長なテストベクトルを削減可能となり、短いテスト長で高い故障検出率の達成が可能である。

高い故障検出効率を達成するテスト長、元となるベクトル数、平均電流について評価を行った。比較対象として、ATPG 及び LFSR (Linear Feedback Shift Register) と呼ばれるシフトレジスタのビット列の一部を取り出し排他的論理和を取り、入力ビットとしてフィードバックすることで生成される疑似ランダムなテストパターンを、CUT には ISCAS'85 ベンチマーク回路を用いた。また、SR の分割数及び Gated Clock による動作率と特性との関係性を評価した。評価した範囲では、ATPG と比較して、元となるベクトル数と平均電流を削減することが可能である。また、LFSR と比較して、テスト長と平均電流を削減することが可能である。今後は、更なるテストパターン及び消費電力削減及び様々な故障モデルへの拡張対応などを行っていききたい。

3. バウンダリスキャンによるメモリデバイスに着目したテストの開発²⁾

近年、電子デバイスを搭載したシステム全体の高機能化及び高性能化が進んでいる。高機能化は、回路実装技術の向上による基板の高密度化、高性能化は電子デバイスの動作周波数の向上等によって実現されている。この為、多数の電極を配置可能で且つ部品実装面積を削減可能な BGA (Ball Grid Array) が主流となりつつある。しかしながら、はんだ接合部が目視で確認できない為、テストやデバッグを実施する際に、端子へのコンタクトが困難になる懸念がある。この問題を解決可能な手法として、各所の信号を最低 4 本の信号線のみで観測可能なバウンダリスキャンが注目されつつあり活用されている。また、この技術を活用したテストが各社より販売されており、電子回路実装基板上における実装部品間の結線テストや、SRAM や DRAM 等のメモリデバイスの結線テスト及びパターンテスト等が可能である。しかしながら、汎用的なテストパターンのみであったり、ユーザで固有のテストパターンを生成可能なものの、複雑なテストパターンの生成が難しい状況にある。また、今後自動車の自動運転技術が発展し、実装される電子回路実装基板にも更なる信頼性が求められ、

実装された状態での更なる信頼性確保も要求される可能性がある。そこで、メモリデバイスのテストパターン生成に着目し、複雑なテストパターンを生成可能なバウンダリスキャンテストの開発を行っている。

図 2 に示すようなシステム構成となっており、動作の流れとしては、先ず PC 上の COE ファイルジェネレータを使用し、テスト対象の BSDL ファイルから JTAG 信号である TCK, TMS, TDI の 3bit パターンが記述された COE ファイルを生成し、ARTY 上のパターン発生機能部に格納する。また、テストパターン発生は、タクトスイッチとスライドスイッチの入力情報により、発生開始やアルゴリズムの選択を行い、パターン発生機能部より JTAG 信号として発生する。例えば、複雑なテストパターンの「X=Y」のパターンを発生させる場合は、スライドスイッチを「0001」に設定し、タクトスイッチ BTNO を押下すると、図 3 に示すような「X=Y」のパターンが自動生成され、PC 上で表示される。

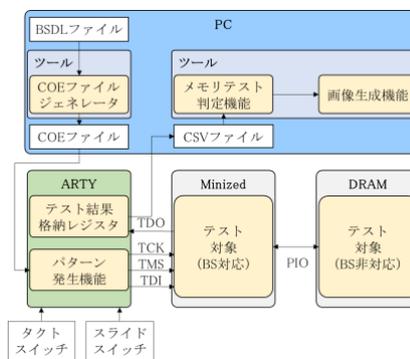


図 2 バウンダリスキャンテストのシステム構成

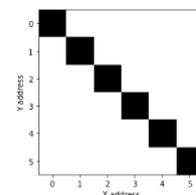


図 3 「X=Y」のパターン

4. おわりに

本稿では、我々が取り組んでいる研究の一部を紹介した。今後も LSI 及び実装基板における信頼性確保に関する研究を通じて、LSI の回路規模及び性能向上や、自動車の自動運転のレベル向上による信頼性の更なる要求等に対して応えられる様、緑の下の力持ちのような研究を遂行していきたい所存である。

参考文献

- 1) Hidekazu Tsuchiya, Testing method that adjustable for power dissipation and test data size during testing, IEEE 19th Workshop on RTL and High Level Testing, Hefei, China (2018).
- 2) 土屋秀和, 竹本健太, 浅川毅, メモリデバイスのテストパターン生成に着目したバウンダリスキャンテストの検討, 第 37 回エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集, pp.14-17 (2023).

東海大学情報理工学部紀要委員会

委員長 高 雄 元 晴

委 員 土 屋 秀 和

委 員 茂 木 龍 太

EDITORIAL COMMITTEE OF PROCEEDINGS OF
THE SCHOOL OF INFORMATION SCIENCE
AND TECHNOLOGY
TOKAI UNIVERSITY

Chair Motoharu TAKAO

Member Hidekazu TSUCHIYA

Member Ryuta MOTEGI

本紀要の論文は、情報理工学部紀要委員会
掲載可と判定された原著論文である。

東 海 大 学 紀 要 情 報 理 工 学 部

Vol. 24 2024

2025年 3月31日 発行

発行所 東海大学情報理工学部

〒259-1292 神奈川県平塚市北金目4-1-1

tel 0463-58-1211
