

NII Today

National Institute of Informatics News

99
Jun. 2023

P2▶インタビュー 情報学が社会をドライブする
黒橋 禎夫

P6▶記事 説明可能な「安全・安心」の手法を提案
蓮尾 一郎

P10▶記事「証明の形式化」数学手法を独自に拡張
蓮尾 一郎

P12▶インタビュー 数学による「安全証明」のポテンシャル
高田 広章氏

P14▶インタビュー Engineerable AI (eAI技術)で産業界に革新を
石川 冬樹

P18▶対談「安全性」を積み上げるゼロトラスト
石川 裕 × 竹房 あつ子

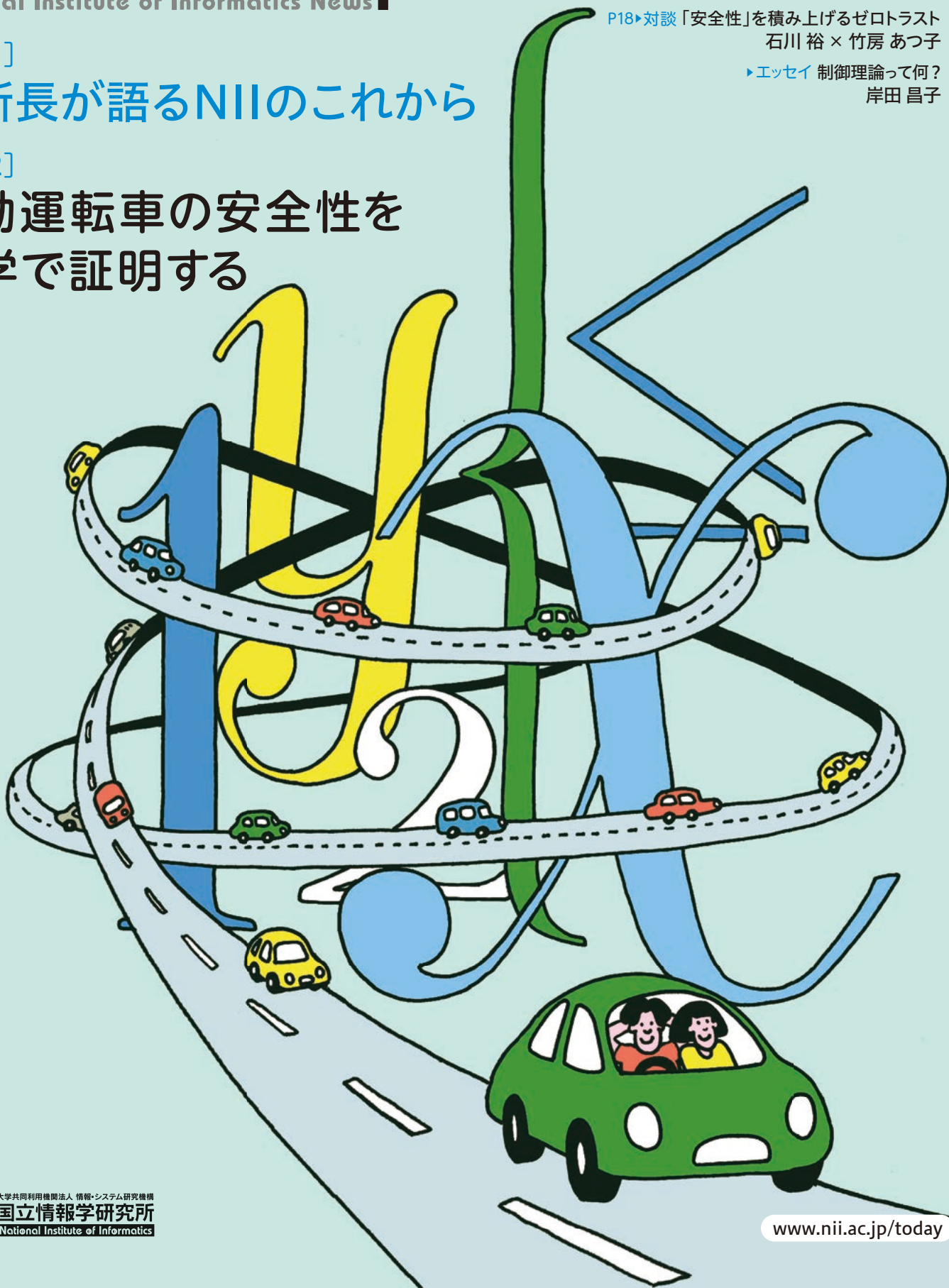
▶エッセイ 制御理論って何？
岸田 昌子

[特集1]

新所長が語るNIIのこれから

[特集2]

自動運転車の安全性を 数学で証明する



[特集1] 新所長が語るNIIのこれから

情報学が社会を ドライブする

国立情報学研究所 所長

黒橋 禎夫

KUROHASHI, Sadao

聞き手

増谷 文生 氏

MASUTANI, Fumio

朝日新聞論説委員兼編集委員

2023年4月、国立情報学研究所(NII)所長に黒橋禎夫教授が就任した。NII教授で京都大学大学院情報学研究科特定教授も務める、AI(人工知能)研究における日本の第一人者のひとり。コンピュータに「ことば」を教える研究を続けてきた。その黒橋所長が、これからNIIをどのように率いていくのか、またAIの将来をどう見ているのか、展望を聞いた。

データ基盤の構築から、 知識基盤の構築へ

——まず、簡単に自己紹介をお願いします。

私は京都で生まれ育ち、自動翻訳で世界的な業績をあげた京都大学の長尾真先生に京大で指導を受け、2001年から東京大学の助教授、2006年から京都大学の教授を務めています。

専門は自然言語処理で、人間が日常的に使っている「自然言語」を、コンピュータに教えこむ方法を研究してきました。

特に、力を入れてきたのが、コンピュータに日本語を理解させることです。

このところ、ニューラルネットワーク、それから大規模言語モデルが急激に関心を集めていますが、それらも踏まえ、これからの新しいAIの世界について引き続き考えていきたいと

思っています。

——所長としての目標を教えてください。

NIIにおいては、「データ基盤から知識基盤へ」というのが私の目標です。喜連川優前所長は、データベースの専門家で、早くからデータの重要性に着目され、NIIにおいても研究データ基盤の整備を進められました。私はその上に「知識」の基盤を構築したいと考えています。

21世紀の学術および社会の大きな潮流として、データの重要性が明確に認識されました。様々な観測や計測からデータを作成し、デジタル化し、オープンにして議論・利活用することで学術的に大きな進展が起っています。このような状況下で、日本ではNIIを中心にSINET6に至るネットワーク整備と、研究データ基盤の整備が継続的に進められてきました。

しかし、今、社会で起こっている問題は、一つの学問分野だけでは解決できない複合的な課題になってきています。様々な学術研究の協働を進める上で問題となるのは、特定分野の専門家も他分野については素人であり、多様な分野を見通してデータを直に活用することは容易ではないという点です。

これからの学術研究が総合知として深化し、複合的な社会課題を解決していくためには、データの解釈、知識の関係付け・体系化を自動化し、分野を横断する新たな知の創造を支援する知識基盤の構築が必要です。

研究データ基盤が整いつつある今こそ、大規模言語モデルに基づき、データを解釈し、さまざまな分野の知識を関係付け、体系化した知識基盤を構築し、これによって新たな知の創造や社会課題解決を支援していきたいと考えています。

データが社会に もたらす恩恵

——データは情報社会の「血液」とも言われます。

日本では慎重な国民性もあって、まだオープンにされていないデータがたくさんあります。

専門家の協働を ファシリテートする 仕組みが必要



データをより多く流通させることで、より暮らしやすい世の中に変えていくことができます。

このデータの流通強化に、AIの活用が期待できます。例えば、医療分野です。問題になるのが匿名化ですが、AIを使うとかなりの部分を処理できます。

NIIが提供する学術基盤や、これからの知識基盤の必要性は10年以上前から指摘されてきました。ここへきてようやくデータ基盤が整い、データをオープンにすることの価値が認識され

始め、機械翻訳研究に端を発する大規模言語モデルにより論文やマルチメディアデータを高度に解釈することが可能となりつつあることから、ついに知識基盤の構築を本格的に目指すべき時代となったと感じています。

しかし一方で、大規模言語モデルの構築には大規模な計算資源を必要とし、一部の海外企業による寡占化が進んでいることが大きな問題です。日本全体の連携のもとに、大規模言語モデルの研究・開発・運用の体制を

整備し、知識基盤の構築に取り組むことも必要です。

——データのオープン化、知識基盤の確立によって世の中にどんな良い影響がありますか。

匿名化された大量の医療データを分析していけば、一人ひとりに最適な医療を提供できるようになります。

今は、患者さんの症状を典型的なケースにあてはめ「この薬を飲みなさい」となりますね。医学の世界も日進月歩ですから、場合によっては少し古い知識に基づいて判断してしまうケースもあるでしょう。

しかし大量のデータを使った研究が進めば、患者さんのより詳細な特徴に基づいて、この治療法が有効である確率が高い、ということがわかるようになります。どんどん更新されていく治療法や薬などの情報もふまえ、一人ひとりの病気が治る確率を高めることができるのです。

かつてないほど増している
NIIの存在意義

——2020年から続く「教育機関DXシンポジウム」について、大学関係者から「シンポにずいぶん助けられた」という声をよく聞きます。今後も続けていくお考えですか。

コロナ禍が始まった当初は、多くの大学関係者はゼロからオンライン授業に挑戦していました。シンポには毎回、文科省の方が登場して、著作権の特例措置など最新の情報を提供していただきました。その後は、時代



急速な変革の時代、 社会の要請に 応えていく

の変化に合わせてメタバースや、話題の ChatGPT などの情報も紹介し、非常に大きな成果を挙げてきたと考えています。

ただ、今後は、NII の設置者である情報・システム研究機構と共同で開く方向で検討しています。シンポには、今回機構長に就かれた喜連川前所長の MC が欠かせない、との声が強いという理由が一つ。また、NII のみなさんには、きっちり取り組もうと頑張りすぎる傾向があるようで、負担軽減を図る目的もあります。

—NII の今後のあり方については、どのようにお考えですか

情報学を上手に活用すれば、もっと社会をうまくドライブすることができます。このため NII の存在意義は、かつてないほど増していると思います。

大学には、競争する部分と共有でいい部分があります。研究ではデータ基盤は共有できていて、私たちがサポートしています。他にも教務やオンライン授業、病院などのシステムには、もっと共有できる部分があると

思います。

大学共同利用という視点から少し広い IT システムを提供できないか考えています。いま、クラウドサービスを導入する時には、どんなサービスがあり、それぞれ一長一短がありますよ、といった情報を整理して、全国の大学に提供しています。こうした大学が共有できる場所で、もっと支援することはあるのかな、と。

ただ、期待が高まっている分、NII のみなさんは非常に忙しいようです。限られた人員と予算でできる限り期待に応えつつ、より働きやすい環境づくりにも取り組んでいきたいですね。

予想を超える生成AIの誕生

—ChatGPT が世界を席巻するさなかの就任です。このタイミングは偶然ですか。

ChatGPT が登場したのは昨年、2022年11月です。私の就任が決まったのは2022年6月ですから、偶然です。

2023年3月には、さらに

GPT-4^{*2}が公開されました。ここまでのものが登場するとは、予想できませんでした。AI が社会の注目を集める中の就任となったことを「追い風だね」と言ってくれる人もいます。しかし、私にしてみると「暴風」という感じですね。

政府も動くほどの事態になっていますが、まだ着任したばかりで、どのように振る舞ったらよいのか模索中です。1年くらいたって、NII に慣れた頃に盛り上がってくれたらよかったです。

ChatGPTは「知的なパートナー」

—世界的関心が高まっている ChatGPT についても詳しく教えてください。まず、グーグルなどの検索エンジンとどこが違うのですか。

検索エンジンは、単語の頻度などをベースにして、クエリとウェブ文書をマッチさせています。関連する資料を示すだけで、後は人間が解釈してくださいというものです。

ChatGPT 以前の AI の対話システムは、与えられた限定的な知識で動いている感じでしたね。すべてを知っているような存在ではありませんでした。

しかし、ChatGPT は違います。その本質は言語モデルなので、次の単語を予測するというのが根本ですが、それを色々な方法で、さらに賢くしています。

長い文章で使われてきた単語をふまえることができれば、その先に出てくる単語を高い確率

で予測できます。最新の GPT-4 は、小説 1 冊分くらいの文章をふまえて回答できると聞いています。

—使ってみた感想はいかがですか。

本当に賢いです。「要約して」「関西弁にして」「中学生風にして」などと指示すれば、そのとおりに変換してくれます。

たとえば、外国人留学生の日本での奨学金申請や学費免除の作文にアドバイスをしますが、やはり不自然な言葉づかいがあります。以前は、かなりの時間を使って直していました。でも ChatGPT に「自然な日本語にしてください」とお願いすれば、あっという間に直してくれました。

また、知的な作業のパートナーとして、ディスカッションができる相手にもなります。すごいことを言ってくれなくても、頭の中が整理され、新しい発想が生まれることもあります。

こうしたことは、これまでの機械学習では到達できない領域です。どうしてこんなことができるのか、専門家である私でも細かい仕組みはわかりません。

AIの世界を開かれたものに

—専門家でもわからないのですか。

このレベルで研究や実験ができるのは、(ChatGPT を開発した) 米国の OpenAI やグーグル、中国の百度 (バイドゥ) など、一部の企業に限られているのです。

このままでは、人類にとって非常に良くないことが、「密室」で起きる可能性があります。何かあった時のインパクトが大きいに、閉じられた世界にするべきではないと思います。

—ChatGPT を含めた生成 AI は、まだまだ進化していくのでしょうか。まだ限界は見えないのでしょうか。

ChatGPT は、直線的に進化していくものではありません。ずっと学習していくと、あるところでドカンとジャンプするのです。今後さらに、想像がつかないような何かが起こるかもしれない、と思っています。

—ChatGPT など生成 AI を使う人は、どんな点に注意すればいいですか。

これからも、すごいスピードで進歩していくでしょう。だから、方針をきちっと決めるよりも、柔軟に対応していく態度が大事だと思います。

また、なめらかな文章で説明されるため、ともすると、正しい回答として受け入れてしまう恐れがあります。このため利用する時には、批判的思考を持って臨むことが、より重要になってくるでしょう。

NII としても、このような急速な社会変革の時代に、大学共同利用機関、さらには日本の情報学の中核機関として、研究と事業の両面で社会の要請に応えていかなければなりません。今後も、基礎論から最先端までの総合的な情報学研究、そして、学術ネットワーク基盤、研究データ基盤等に関する事業をさ

らに推し進めるとともに、学術研究の協働の土壌となる知識基盤の構築に一歩一歩取り組んでいきたいです。

※1 教育機関 DX シンポ：2020 年 3 月末より週 1 回から隔週のペースで、大学等における遠隔授業や教育 DX 等に関する情報を共有することを目的に開催。

※2 GPT-4：Generative Pre-trained Transformer 4 の略で 2023 年 3 月に発表された。ChatGPT に使われている「GPT-3.5」より扱える単語が約 8 倍に増えた。

聞き手からのひとこと

ChatGPT が世界中で大騒ぎになっているさなかに、その専門家が NII の所長に就任する。偶然だったようだが、なんとも出来すぎた人事だ。当人は「追い風ではなく暴風」と笑う。だが、NII や大学関係者、そして政府にとっては、心強い存在となるだろう。今後しばらくの間、活用するにしても制限するにしても、ChatGPT は教育・研究分野で大きな話題であり続けるはずだ。

コロナ禍と交代するかのよう、また社会を大きく変えるトピックが現れた。数年後にどんな進化を見せているのか、新所長でも予想ができないという。その時、社会はどんな姿を見せているのだろうか。



増谷 文生

朝日新聞論説委員兼編集委員

宇都宮市出身。大阪市立大学を卒業後、1994 年に朝日新聞社に入社し、東京、大阪、名古屋、仙台、京都などに勤務。2005 年以降、断続的に約 8 年間、高等教育を取材。2020 年 4 月から高等教育担当の編集委員、同 10 月から教育全般を担当する論説委員も兼務する。

自動運転の安全性を厳密に証明する——。国立情報学研究所(NII)アーキテクチャ科学研究系の蓮尾一郎教授らの研究チームは、科学技術振興機構(JST)の戦略的創造戦略推進事業ERATO蓮尾メタ数理システムデザインプロジェクト(ERATO MMSD)^{※1}のもと、自動運転システムの安全性を数学の手法で保証する新たな手法を開発した。世界で開発が進む自動運転の安全確保の方法論を大きく変える可能性を秘めている。

[特集2]

自動運転車の 安全性を 数学で 証明する

説明可能な「安全・安心」の 手法を提案

国立情報学研究所
アーキテクチャ科学研究系 教授

蓮尾 一郎

HASUO, Ichiro

吉川 和輝氏

YOSHIKAWA, Kazuki

日本経済新聞編集委員

$$\max\left(0, v_r \rho + \frac{1}{2} a_{\min} \rho^2 + \frac{v_r}{\rho}\right)$$

現実のドライブシーンに 合ったシナリオ

自動運転システム^{※2}の開発は現在2つの流れで進んでいる。1つは決まったルートを実行する「次世代交通サービス (MaaS) 型」の自動運転。ドライバーのいない車両を遠隔監視で運行する方式が多い。2023年に国内で初めて「レベル4」自動運転の認可を受けた福井県永平寺町の7人乗り車両による移動サービスなどが代表例だ。

もう1つは公道を走る乗用車などの自動運転。先進運転支援システム (ADAS) と呼ばれる機能を強化・充実させる方向で開発が進んでおり、2020年にホンダの高級車レジェンドが公道走行では世界初となる「レベル3」の認証を得た。ここでは高速道路で渋滞に遭遇して速度が30km/hを下回ったときシステム側に運転を任せられるという条件が付いていた。

こうした自動運転の走行ルートや速度制限などの条件は「運行設計領域 (ODD) ^{※3}」と呼ばれる。

MaaS型、自家用車型のいずれもODDを今後段階的に緩和して最終的にはいかなる状況でもシステム側に運転を完全に任せる「レベル5」自動運転を目指している。

自動運転が普及すると、ヒューマンファクター (人的要因) を無くせるため交通事故が減るという期待がある。だが人工知能 (AI) が運転を担っても、各車が自律的に走行するという枠組みの下では、事故をゼロにはできない。ODDの条件が緩和されて自動運転の領域が広がるにつれて安全確保



$$\left(\frac{+ a_{\max} \rho}{2b_{\min}} \right)^2 + \frac{v_f^2}{2b_{\max}}$$

自動運転に好都合な 枠組みを数学が提供

の難易度も上がる。

また、自動運転車は安全性の確保と快適な走行のバランスをとるのが難しいという課題がある。走行時に依拠する運転シナリオが安全を重視するあまり「石橋を叩いて渡る」式のものになってしまうとクルマの動きは鈍くなり、快適なドライブとはほど遠いものになる。

もし安全性が証明された運転シナリオを、様々な走行の局面に対応する形で用意することができれば、こうした課題は解決されるだろう。蓮尾教授らの今回の研究成果はこの要請にこたえるものだ。数学や論理学の手法を駆使することで、安全性が厳密に証明され、かつ現実のドライブシーンに合った運転シナリオを開発する手法を編み出した。

安全条件を切り分けた RSSという発想

蓮尾教授らが実際に作成した運転シナリオは例えば次のようなものだ。片道2車線の高速道路の追い越し車線を走行中の自分のクルマ（自車）が、周囲のクルマ（他車）と安全な距離を保ちながら車線変更をして走行車線に入った後、左端の路側帯（路肩）に安全に停止する――。

これは、走行中何らかの事情で道路脇の非常電話の場所にクルマを止めるとか、運転主体をシステムから人間に切り換える際に人間の側の準備ができていない場

合いったん停車するといった状況に対応する、自動運転の運転シナリオの中でも重要なものの1つだ。

このケースでよくある走行パターンは、左車線を走る他車の後方に入るために速度を調節して車線変更のタイミングをうかがうというものだ。他車と接近するリスクを警戒してうまく車線変更ができず、停車のタイミングを逃してしまうことも起こる。

これに対して、開発した運転シナリオではよりスムーズな走行が実現できる。他車の速度や位置関係から判断してタイミングよく車線を変えたり、場合によっては速度を落とすことなく逆に加速して、左の車の前方に回り込むよう

な形で車線を変えたりする。こんな大胆にも見える走行ができるのは、他車と危険な状況に陥らないことが証明済みの運転シナリオになっているからだ。

この安全証明のために採用したのが「責任感知型安全論 (Responsibility-Sensitive Safety, RSS)」という方法論だ。各車が加速や減速、車線変更など状況に対応した適切な走行をすることを責任ルールとして決めておき、このルールが守られるという仮定の下、数学の定理を証明するように「衝突が起きない」ことを厳密な形で保証するというものだ。

RSSはこうした条件付きの安全証明であり、それで事故が完全に防げるということにはならない。他車の無謀な運転などによって事故に巻き込まれることはありうる。そうした自車の側の責任では避けようがない条件を切り分けた上で、



その範囲で安全性を厳格に証明できるようにしようというのが RSS の思想だ。

RSSを数学・形式論理学で拡張

こうした前提条件付きの安全保証には大きな利点がある。用意された運転シナリオでもし事故が起きた場合、その原因は関与する車のどれかがルールを守っていなかったためだと推定でき、責任の所在が明確になる。蓮尾教授は「RSS は法規制や損害保険の仕組み、業界標準など自動運転の普及に向けた制度設計を進める上でも好都合な枠組みを提供できる」と強調する。

RSS は 2017 年に米インテル傘下のイスラエル企業モービルアイ (Mobileye) の研究者が提案したのが最初だが、蓮尾教授によると「数学や論理学の視点からの発展の余地が大きいものだった」という。同社が示した RSS ルールの例も、同一方向に走行するクルマの追突を回避するという単純なケースだけにとどまっていた。

RSS の理論的な根拠を検討して一般化し、複雑な運転シナリオにも自在に応用できるようにしたのが蓮尾教授らの成果だ。RSS を数学の一分野である形式論理学によって拡張することを試みた。RSS の証明を形式化するという作業を行ったが、これを簡単に言うと、従来人が紙に書いて行っていた数学の証明をコンピュータでできるようにすることだ。

ソフトウェア研究の分野で知られる「ホーア論理 (Hoare, Logic)」を拡張した「微分フロイド・ホーア論理 (Differential Floyd-Hoare

Logic, dFHL) と名付けた形式論理の体系を提案。これで自動運転車の複雑な行動計画を分割して逐次的に解析できるようになり、RSS の適用範囲を大きく広げることが成功した。新たに開発した手法は「GA-RSS (Goal-Aware RSS)」と名付けている。

研究チームはマツダと協力して、自動運転車を制御するコントローラに RSS を実装する研究も行った。「通常系」と「安全系」の 2 タイプのコントローラを状況に応じて切り替える方式。通常系コントローラで車の性能を生かした快適な走行を実現する一方、安全を重視すべき局面では安全系コントローラに切り換える。この切り換えにも RSS ルールが適用される。

事態打開の可能性を秘める新しい枠組み

現実の実際の自動運転ではこうした運転シナリオはどれほどの数が必要なのだろうか。蓮尾教授は「固定ルートでも高速道路の場合でも、運転シナリオ数は数百で収まるだろう」という見通しを立てている。プロジェクトでは新規の運転シナリオ作りを検討するとともに、シナリオ作成の自動化を目指した研究も併せて進めているという。

自動運転システムの開発ではデータの量がモノをいうといわれる。自動運転の開発企業は実験車両を様々な条件で走らせたり、仮想現実 (VR) 空間で走行シミュレーションを実施したりして、膨大な AI の学習データを収集している。こうした取り組みで日本は海外のトップランナーに大きな差を付けられている。

だが衝突回避など人命にかか

わる安全性確保の分野は、走行テストやシミュレーション、あるいは過去の事故統計を参照するといった方法では、安全性をユーザや社会に説明可能な形で示すのが難しく、これが自動運転の本格普及の足かせにもなりかねない。こうした状況を打開する可能性を秘めた全く新しい安全・安心の枠組みが日本発で生まれようとしている。

※1 蓮尾メタ数理システムデザインプロジェクト：科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業 ERATO に採択されている研究プロジェクトで、Society 5.0 の柱である物理情報システム (CPS) の品質保証手法などを研究している。自動運転システムはその重点応用分野に位置づけられている。

※2 自動運転システム：自動車を運転する 3 要素である認知、判断、操作を自動で行うシステム。車載センサなどで周囲の状況を把握しながら運転操作をする。政府は米自動車技術者協会 (SAE) の基準をもとに、運転支援に当たるレベル 1 から完全な自動運転であるレベル 5 まで分類している。

※3 運行設計領域 (ODD)：自動運転システムが正常に作動する前提となる設計上の条件のこと。高速道路か一般道か、車線の有無といった道路条件、都市部か山間部かなどの地理条件、天候や日照など環境条件のほか、保安要員の乗車の有無や速度制限——など内容は多岐にわたる。



吉川 和輝

日本経済新聞編集委員

九州大学卒業後、日本経済新聞社に入社。産業部、ソウル支局、科学技術部長、日経サイエンス社長などを経て 2015 年から編集委員として科学技術分野を取材。1997～98 年、米マサチューセッツ工科大学・科学ジャーナリズムフェロー。

「証明の形式化」 数学手法を独自に拡張

「衝突は起きない」という定理

国立情報学研究所
アーキテクチャ科学研究系 教授

蓮尾 一郎

HASUO, Ichiro

取材・執筆

吉川 和輝氏

YOSHIKAWA, Kazuki

日本経済新聞編集委員

「証明の形式化」 数学手法を独自に拡張

自動運転システムの安全性は厳密に証明できるという蓮尾一郎教授らによる今回の研究成果。証明の各ステップで数学に基づく手法を巧みに応用することが成果につながった。まず大きな枠組みとして取り入れているのが「責任感知型安全論 (Responsibility-Sensitive Safety, RSS)」という手法。これはシステムの複雑さゆえに証明が困難とされていたものから、一定の前提条件を切り分けた上で「条件付きの安全証明」を試みたものだ。

数学で定理などを証明する場合、補助的な命題が置かれることがあり、これを「補題 (補助定理)」と呼んでいる。RSSの場合は例えば「衝突は起きない」という定理を証明するのに、これを「クルマそれぞれがRSSルールを守る」という仮定と、「各車がRSSルールを守れば衝突は起きない」という補題に切り分ける。そしてこの補題を証明す

ることによって「衝突は起きない」という定理が導かれるという手順だ。

証明の「使い回し」に有利

ここで出てくる「RSSルール」という規則は、数式ないしはソフトウェアのプログラムで記述される。それも単純な数式ではなく、微分方程式などからなる複雑な制御プログラムも含まれる。こうした記号だけで記述された内容の証明をコンピュータによって確実に行う手法を開発したのが今回の特筆すべき成果だ。

通常、数学の証明というと、中学や高校の数学の授業で習うような「紙を使った証明」を思い浮かべる。数式や「Aが成り立つのでBが成り立つ」といった言葉 (自然言語) を1行ずつ書きながら証明を進める。こうした「紙の証明」は間違いも起きやすいし、証明の正誤チェックを機械で行うのも難しい。自動運転システムの安全性保証といったビジネス用途に向かないのは明らかだ。

そこで使われるのが「証明の形式化」という手法だ。証明のプロセスをすべて記号化・数式化して、コンピュータ上で進められるようにする。コンピュータ上で書いた証明は、正当性チェックアルゴリズムでその正しさを示すことができるため、証明の品質を保証し、開発したシステムの品質を保証できる。また一度書いた証明を類似の運転シナリオに応用するなど証明を「使い回し」できるのも利点だ。

形式理論体系 「ホーア論理」とは?

蓮尾教授らは今回の研究で、自動運転の安全のためのRSSルールを導き出すため「微分フロイド・ホーア論理 (Differential Floyd-Hoare Logic, dFHL)」と名付けた形式論理の体系を提案している。これはソフトウェアの正当性を厳密に推論するための形式論理の体系として知られる「ホーア論理 (Hoare Logic)」を今回独自に拡張したものだ。

ホーア論理の基本は、 $\{A\}c\{B\}$ という3つの要素からなる式だ。中央のcはプログラム、Aはプログラムの実行前に成り立つ性質 (事前条件)、Bはプロ

グラム実行後に成り立つ性質(事後条件)をそれぞれ表す。実際の証明の導出過程では、この「ホーア3つ組 (Hoare Triple)」と呼ばれる式を多数組み合わせ、ステップごとに推論を進めていく。ここでは「紙の証明」で人間が頭で考えていた内容がすべて記号化され、機械的な操作で証明が進められていく。

蓮尾教授らが今回提案した新たな形式論理体系「dFHL」は、ホーア論理を2種類の機能によって拡張したものだ。1つは、プログラムで微分方程式を扱えるようにしたこと。これによって運転シナリオに自動車の運転コントローラなどの物理的なダイナミクスを取り入れることが

できるようになった。

もう1つは、ホーア論理の体系にある、事前条件 (A) と事後条件 (B) に加えて、プログラムの実行中に常に保証されるべき「安全性条件」(S) を3つ目の条件として追加したことだ。これを式で表すと $\{A\}c\{B\};S$ という形になる。元のホーア論理にあった「ホーア3つ組」が「ホーア4つ組」に拡張されることで、自動車の走行中の安全性を保証するような証明ができるようになった。

複雑な運転シナリオの安全性を的確に証明

6ページからの記事で示したように、今回の研究では代表的

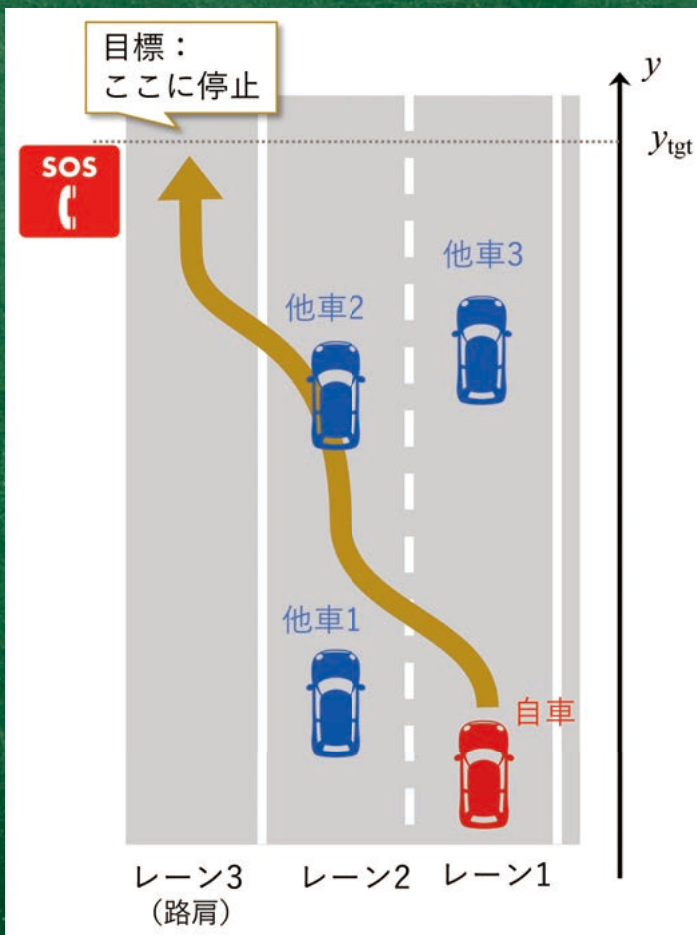
な運転シナリオとして、片側2車線の高速道路の追い越し車線を走行中のクルマが車線変更をして走行車線に入った後、左端の路側帯(路肩)に安全に停止する——という運転の流れを取り上げている。

このシナリオにdFHLの「ホーア4つ組」を表す基本式である $\{A\}c\{B\};S$ がどう対応しているのかをみると、事前条件Aが「RSS条件」、プログラムcが「車両の適切な反応」、安全性条件Sが「衝突回避の要請」に相当する。そして事後条件Bを「路肩の指定位置に停止していること」とすれば、シナリオの目標である路肩停止が保証されることになる。

ホーア論理を拡張した利点はもう1つある。ホーア論理にはもともと「分割統治型による証明ができる」(蓮尾教授)という特徴を持つ。プログラムを構成する個々の「部品」について、それぞれ証明を行った後、それらの結果を組み合わせることで全体の正しさを証明できるというやり方だ。

今回の運転シナリオとの関連では、運転シナリオ全体を「レーン変更の準備」「レーン変更」「路肩に移動」「路肩で停止」の4つのサブシナリオに分割し、サブシナリオそれぞれについて証明を行った後、その結果を組み合わせるという手続きを行っている。こうした「逐次導出」と呼ばれるプロセスを利用することで、複雑な運転シナリオでもその安全性の証明を的確に行えるようになった。

【非常路肩停止シナリオ】



数学による 「安全証明」の ポテンシャル



高田 広章

東京大学大学院理学系研究科情報科学専攻修士課程修了。豊橋技術科学大学情報工学系助教授などを経て名古屋大学大学院情報科学研究科教授、2014年より現職。オープンソースのリアルタイム OS 等を開発する TOPPERS プロジェクトを主宰。

名古屋大学 教授
未来社会創造機構 モビリティ社会研究所 所長
大学院情報科学研究科附属組み込みシステム研究センター センター長

高田 広章 氏

TAKADA, Hiroaki

「数学が自動運転時代の『道路交通法』になるかもしれない」。蓮尾プロジェクトの可能性についてこう評価するのが、組み込みソフトウェア研究の第一人者の一人で、自動運転技術の開発にも携わっている、名古屋大学・高田広章教授だ。自動運転車の「安全の定義」の難しさと数学による安全証明の可能性について聞いた。

—— 高田先生のご専門について教えてください。

最も専門の分野は組み込みシステム向けの OS (オペレーティングシステム) の設計と研究で、自動車の車載組み込みシステムの技術開発も多く手掛けてきました。OS から始めて、ネットワークや、システムに関する機能安全の研究、セキュリティ、自動運転車に関することにも取り組んでいます。車に関する研究が多いのですが、宇宙関係プロジェクトもあり、我々の研究室で開発した TOPPERS/HRP カーネル：宇宙機向けの高信頼 RTOS (リアルタイム OS) がロケットの制御に実装され打ち上げられた事例もあります。

—— 車載組み込みシステムの

OS の難しさはどのあたりにあるのでしょうか。

車のシステムの安全性確保は、機能安全分析という活動の中で行われます。例えば FMEA (故障モード影響度解析) では、自動車を構成している膨大な数の部品の中で、どの部品が壊れたら、どこが誤動作して、その結果どういう事故が起こるのかを分析し、重大な事故につながらない、許容不可能なリスクが存在しない状態に設計します。ソフトウェアに関しても、例えばモジュールが誤動作したら何が起こるかを分析したうえで対策しなくてはなりません。なおかつ、ソフトウェアのバグはゼロにはならないので、個々のモジュールが不具合を起こしても、

別サイドでカバーできるようにする、という非常に地道な調整をしています。

—— 自動車の走行中の衝突を避ける安全性はどう確保するのでしょうか。

人が乗車して運転する自動車の場合には、基本的に運転者が安全の確保と責任を担います。ただ、車のシステムもかなり電子化されているので、そうしたシステムに仮に故障や不具合が起きても、十分安全が保てるよう対策をすることが技術の中心になります。

これが自動運転車になると、人が行っていた運転をコンピュータに置き換えることになり、「安全」の定義が難しくなります。人工知能の機械学習ベースでは、大量の学習データを集めて安全運転を学習させる必要があります。ルールベースでは、様々なモデルケースにおけるルールをすべて書いておかねばなりません。それは機械学習と比べれば「どういう時に、何が起こるか」がわかりやすいのですが、ルールがあまりに複雑になり、ルールの正確性や、漏れを確かめることが非常

に難しくなります。

車の歴史的には、「衝突安全（パッシブセーフティ）」、つまり「ぶつかっても人命は守る安全なボディを作る」という方向から開発が進んできました。「予防安全（アクティブセーフティ）」と呼ばれる、自動ブレーキのような「ぶつかる前にブレーキを掛ける」という電子システムは新しい技術です。

—— そうした流れの中で、蓮尾プロジェクトの安全性の数学的証明は自動運転車にどのように生かされるのでしょうか。

蓮尾先生の研究では、「数学的に証明可能なRSS（責任感知型安全論）ルールを守れば衝突は起きない」、そして「各車がそのルールを守る」ことで安全性の定理を証明したと理解しています。事故が起きた際には、「どちらかがルールから外れた」ということであり、責任の所在が明確になる、ということですよ。この研究について最初に話を聞いた時には、「法律、道路交通法が数学で書かれているようだ」と思いました。

機能安全の話に戻りますが、RSSルールを守って走らせる

ように制御してもシステムが壊れたらどうするか、ということがあります。例えば、高速道路を自動運転してる車が急に壊れた時、急停止すると追突される可能性があり危険です。そこで、システムから運転を引き継ぐために、リスク最小の動きで、安全に減速しながら路肩に寄せて止まる制御（MRM：ミニマム・リスク・マヌーバー）をしますが、何が安全な減速であるかの定義は法律にはありません。蓮尾先生の研究成果RSSの拡張GA-RSSで安全な速度で路肩に止まることが証明された定義があると、システムを作る側としてすごくクリアになると思います。

ただ、現時点では、公道は自動運転車だけではなく、自転車も歩行者もいるので、すぐ世の中に展開できるかという、まだまだ多くのハードルがあると思います。

—— 蓮尾教授は、RSSルール整備済み安全証明シナリオの蓄積完了目標を2035年としています。

自動運転車の場合、あらゆるシチュエーションやケースを想定してテストを行うことは現実

的ではありません。コンピュータシミュレーションによるテストであっても、すべてを網羅できるわけではない。蓮尾プロジェクトの石川冬樹先生のサーチベースド・テストング※1では、危険なパターンを見つけるために、車間距離が短くなるようなテストパターンを機械的に探索していくという手法を研究されており、今ある技術をうまく実用に当てはめ効率的に調べていると思いました。計算機自体の性能がどんどん上がっている、ソフトウェアのテストでも自動的にテストパターンを生成する手法が有益なのは間違いなく、我々の研究室でも取り組んでいる学生がいます。

蓮尾プロジェクトでは、数学が力を発揮するところにうまく適用されてるという印象です。一つの道具が万能だとは思わないので、いろいろな技術が増えるにつれ、適用しやすい場所、しにくい場所も明確になっていくわけですが、ここでは安全性の証明を行う数学的テクニックが非常に有効だった。RSSの活用、GA-RSSの成果は数学で書かれた道交法というような意味でも、すごくインパクトがある研究成果だと思います。

※1 サーチベースド・テストング：目的に沿った最適なテスト（スイート）を見つける手法で、生き物が淘汰や交配を繰り返して進化する過程を計算機内で模倣することにより、欠陥検出能力や多様性が高いテスト（スイート）を反復的に育てていく。関連リリース：2020/03/23 自動運転の経路計画プログラムから危険動作を自動検出する手法を開発 2021/11/15 自動運転における重大な問題をシミュレーションで検出する技術を開発 2021/04/12 テストが難しいシミュレーション設定を自動で見つける技術を開発 参照・https://www.nii.ac.jp/news/release/

【自動運転レベルの概要】

自動運転レベル	名称	条件等	安全運転にかかる監視・対応主体
0	運転自動化なし	運転者が全ての動的運転タスクを実行。	運転者
1	運転支援	システムがサブタスクを限定領域で実行。	運転者
2	部分運転自動化	ハンズオフ、アイズオン：手放し運転可。遠隔運転可。限定領域。	運転者
3	条件付き運転自動化	ハンズオフ、アイズオフ：脇見許容。眠ってはいけない。遠隔運転可。一人が複数台運転可。限定領域。	システム（作動継続が困難な場合は運転者）
4	高度運転自動化	ハンズオフ、アイズオフ、ブレインオフ：居眠り許容。遠隔にいる人は運転者でなくてもよい。監視者必要。限定領域。	システム
5	完全運転自動化	システムが全ての動的運転タスクを実行。限定領域なし。	システム

高田広章教授資料、J3016およびASV推進検討会資料より内閣官房情報通信技術(IT)総合戦略室作成、官民ITS構想・ロードマップ https://cio.go.jp/sites/default/files/uploads/documents/its_roadmap_20210615.pdf を元に編集制作

[インタビュー]

Engineerable AI (eAI技術)で 産業界に革新を

国立情報学研究所
アーキテクチャ科学研究系 准教授

石川 冬樹

ISHIKAWA, Fuyuki

細やかなニーズに応えられるAIへ

社会のさまざまな場面でAIの活用が進んでいる。しかし、産業界で技術開発にAIを活用することは、特に品質面において課題が多い。そこで具体的な工学活動に繋がる技術の開発と、自動運転の安全性向上に資するアプローチを目指して進められている Engineerable AI プロジェクトについて聞いた。

「説明できるAI」をこえた 「細やかなニーズに応えるAI」へ

— Engineerable AI (eAI) プロジェクトとはどのようなものでしょうか。

eAI プロジェクトは、AI を産業界に適用する際に生じる課題を解決するために立ち上げられたプロジェクトです。2018 年頃から、企業が業務への AI 導入を本格的に検討するようになりました。一方で実際に導入するとなると、学習のためのデータ不足や、狙い通りの結果を得るために必要な膨大な時間が課題になることが多いのです。そこを Engineerable AI (eAI) 技術で解決できないか、と考えました。

— 問題をどのように解決するのでしょうか。

AI を導入した際に難しくなるのは「説明」の部分です。「それな

りに動く AI」を作ることは難しくなりましたが、中身がブラックボックスになっているため、「なぜそうなるのか」という過程を説明することができないためです。つまり、従来大事にしてきた「品質」を確保できていることが証明できない点が大きな課題になりました。この課題を解決するために開発されたのが、Explainable AI (XAI) です。XAI は、これまでブラックボックスだった「AI が回答を導き出す過程」を説明できるように可視化するものです。

しかし、業務で活用する際には、過程を説明できるだけでは足りず、また狙った結果を得るために AI を修正・調整できることが重要です。実際に、200 名以上の実務者の方に対する調査を行い、議論した際にも、「AI を活用した際に、狙い通りの結果が得られない

場合、何をどこから修正すればいいのかわからない」「AI の学習に必要な膨大なデータを集めることが難しい」という声を多く聞きました。

AI のユーザが持つ細やかなニーズに応じて、AI を仕立て上げる技術を Engineerable AI (eAI 技術) と名付けました。

現在、eAI プロジェクトには 8 つの研究機関・大学が参加し、多数の企業や病院との連携を行っています。

医療や自動運転の分野で 力を発揮

— eAI プロジェクトでは具体的にどのようなテーマを扱っているのでしょうか？

eAI プロジェクトでは、二つの大きなテーマを扱っています。

一つ目は、限られたデータ量でも信頼できる結果を得る AI の構築技術と、医療分野での実証です。東京工業大学の鈴木賢治教授を中心に、「見落とされやすい症例を AI に検出させる」ことを目的とした研究開発を行っています。

従来は AI に特定の症例を判別させるためには、10 万ものデータが必要でした。しかし、レアな症例に対しては 3 桁の症例を集める

eAIはユーザが持つ 細やかなニーズに応じ、 AIを仕立て上げる技術



だけでも年単位の期間が必要です。解決手段として人の知識を埋め込むことにより、ごく少数のデータで既存のAIよりも高性能なAIを構築する技術開発を行っています。

二つ目は、防ぐべき誤りが多数あるような状況において、他の結果には影響を与えずに狙った部分だけの出力を修正する技術開発と、交通分野での実証です。国立情報学研究所（NII）と九州大学、富士通が中心となり、「数百万という膨大な数のパラメータの中から、誤りの要因となるパラメータ群を絞り込むことで、AIの安全性を保証する」ことを目的とした研究開発を行っています。車両や歩行者が映った画像において、安全に関するリスクが大きい部分の認識精度を向上させられるように、AI

を自動修正するような技術開発に取り組んでいます。

「狙った部分を改善」が可能になるeAI技術

——医療や交通は失敗が許されない分野です。

そこが重要です。例えば、最終的に利益を上げることが目的とした株価の予測にAIを用いる場合を考えると、AIのパラメータを調整したことで調整前より精度が向上するケースと低下するケースが混在したとしても、AIの修正によって、最終的に儲けが大きくなっていけば成功です。

一方で、交通や医療のように安全性や信頼性が最重要視される分野では、AIの精度を向上させるためのパラメータ調整で、全体

の精度が向上していたとしても、過去に正解していた優先度の高い問題を間違えることは許されません。

このように、全体の正答率ではなく、その中でも間違いが許されない問題が複数あるものや、間違いを許容できる度合いに優先順位をつけないといけないものに、eAI技術は効果的です。

AIの数理モデルの一つであるニューラルネットワークは、複数の重みパラメータを調整することで出力を変化させ、学習を進めるモデルです。

ニューラルネットワークでは一般的に、与えられたデータによってすべての重みパラメータを更新し、学習を行います。その結果、全体傾向としては改善する場合でも、狙った部分を改善できなかった

たり、部分的に学習前よりも劣化してしまったりするという課題がありました。

特に、複数の特定条件を満たしながら全体を改善するようなシーンには適用できません。

一方、eAI プロジェクトでは、ニューラルネットワークの入出力や内部挙動を分析することで、狙った部分に影響を与えるパラメータ群を特定し、選択的に変更を行うAI 修正技術の開発に取り組んでおり、ここが eAI 技術のひとつの大きな特徴です。

効率的なAIの修正技術

— 選択的に変更できる eAI 技術を実現するために、どのような工夫をしているのでしょうか？

例えば、AI によるさまざまな誤りを改善する場合、eAI 技術では

まず、誤りをできるだけ細かく分類し、各誤りに対して要因となる重みパラメータ群を絞り込みます。次に、各誤りを修正するために適切な重みパラメータの探索を行い、それぞれの誤りに対して修正可能なパラメータ群が明確にできれば、全体のバランス取りを行います。各誤りが発生する確率とリスクの大きさに基づいて全体のバランスを取ることで、最終的な重みパラメータを決定します。だから正確性や信頼性が重視される分野や産業での実用が期待されるのです。

eAI プロジェクトにおいて扱う「細やかなニーズ」には様々なパターンがあります。ここまで述べたAI 修正技術は、「近くにいる歩行者」などデータの属性ごとの重要度に応じて予測性能の改善を行うためのものです。図の上部に示すように、他にも異なるニーズのパ

ターンがあります。例えば、物理世界のルールに反するようなあり得ない予測はしないようにする、運用時に収集されたノイズ傾向に対応するようにする、といったニーズです。

これらに対し、eAI プロジェクトでは、図の下部にあるように、AI を構築するための技術と修正するための技術に取り組んでいます。プロジェクト全体としては、個々のシステムのニーズを、標準やガイドラインを踏まえて分析し、適切に技術を活用する一貫通貫のフレームワークを提供していきます。

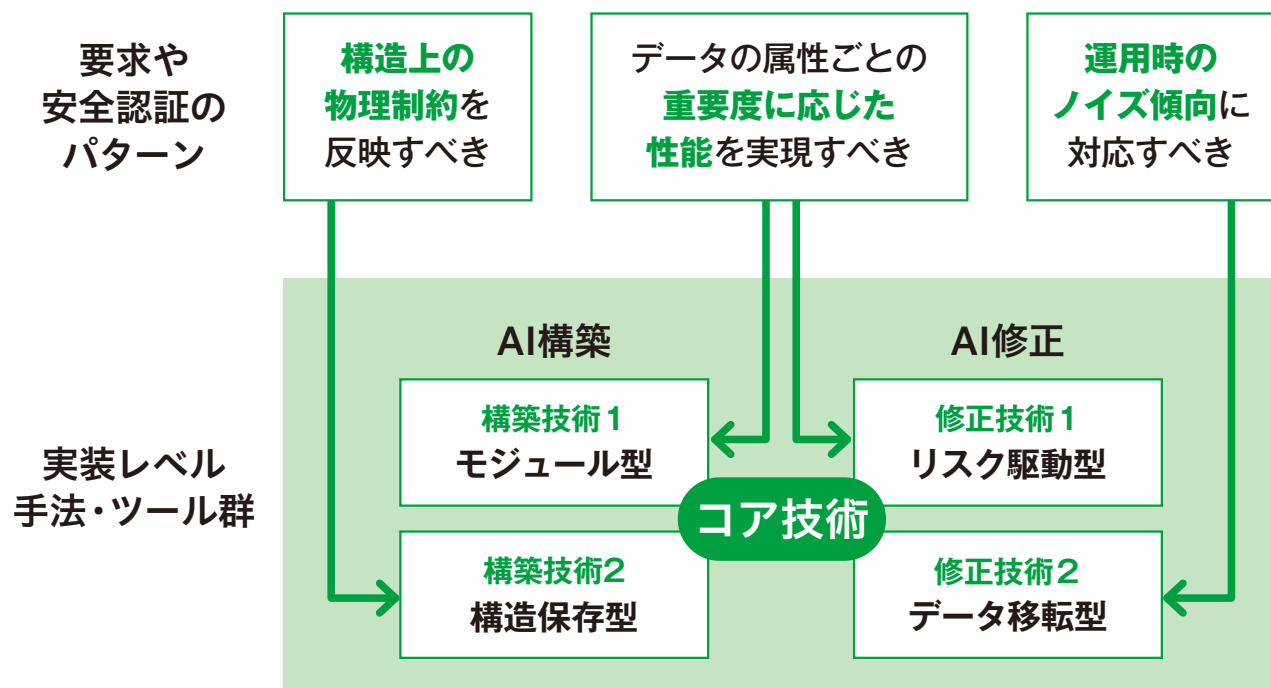
「数学的安全証明」との補完関係

— 蓮尾一郎先生が取り組んでいる「自動運転車の安全性の数学的証明」に関するプロジェクトと eAI プロジェクトの関係を

【eAIプロジェクトのフレームワーク】

個々のシステムへのニーズ

標準・ガイドラインの要請



教えてください。

蓮尾先生のプロジェクトでは、「運転計画機能の安全性」に関する研究を行っています。この研究では前提として、外部環境の認識情報が与えられており、どのような認識情報が与えられるかが重要です。

eAI プロジェクトでは、「認識機能の安全性」に関する研究に取り組んでいます。一例として、これらの研究を自動運転へ適用する場合を考えると、「外部の状況を認識してリスクの低い運転計画を構築する」ことに繋がります。

また、現実世界で生じるすべての状況の安全性を、数学的に証明できるわけではありません。数学的に証明ができないような複雑な環境は、シミュレーションを用いて安全性の確認を行っています。このシミュレーション部分を私が取り組むことで、蓮尾先生のプロジェクトとeAI プロジェクトは補完的な関係になっています。

企業と連携し

「開かれた」プロジェクトへ

— 2021年に開始されたeAIプロジェクトでは、実使用を想定したテーマへの適用という大きな成果を残しています。また、プロジェクトの節目となる2025年3月までは、残り約2年。プロジェクト全体における現時点の進捗と、印象に残ったことを教えてください。

eAI プロジェクトは、当初よりAIを継続的に改善していく技術の開発と、交通分野への適用という大きな目的を持ってスタートしました。AIを継続的に改善していく技術は開発できており、自

認知機能の安全性を高める eAIプロジェクトと、 数学的証明は補完関係

動車メーカーと一緒に定めたテーマへの適用も確認できました。これで、eAI技術の活用範囲を広げていくための技術基盤が整いました。

従来のアカデミックに閉じた研究では、開発した技術をシンプルな課題から徐々に適用していくのが一般的でした。しかしeAIプロジェクトでは、最初から企業で運用できることを想定しているのので、最初から実用的な課題に取り組んでいます。今までと進め方が異なることによる悩ましさはありましたが、特徴的な取り組みで、とてもいい経験になっています。

産業界での活用に期待

— 今後どのようなことに取り組まれるのでしょうか。

2025年3月までの2年間で



は、大きく二つの取り組みを考えています。

一つ目は、これまで複数の基礎研究として構築してきたものをうまく統合して、ツールの形でリリースすることです。プロジェクトに関わってきた我々以外にも扱えるようにすることで、産業界で活用してもらえるよう進めていきたい。

二つ目は、それぞれの企業が持つ幅広い課題へ開発した技術を適用することです。これまでの開発で適用対象としてきたテーマは、多くの実務者と会話の最大公約数を取った共通の課題です。実際には、それぞれ異なる前提や目的に適用できる必要があります。産業界で広く Engineerable AI (eAI 技術) を活用してもらえるように、研究や技術開発を進めていきます。

[対談]

「安全性」を 積み上げる ゼロトラスト

国立情報学研究所
アーキテクチャ科学研究系 教授

石川 裕

ISHIKAWA, Yutaka

国立情報学研究所
アーキテクチャ科学研究系 教授

竹房 あつ子

TAKEFUSA, Atsuko

システムの 「振る舞い」を定義する 形式検証のインパクト

スマートフォンやタブレットのみならず、多くの家電、
車までもがインターネットにつながるIoT時代。
リスクも高まる中で、どのようにシステムの
信頼性を保つのか。

科学技術研究機構(JST) CREST「形式検証と
システムソフトウェアの協働による
ゼロトラストIoT」(研究代表者:竹房あつ子)が実現する
「安全性」のあり方について聞いた。

形式検証理論の
力を借りて
安全性を保障

ゼロトラストを支える 形式検証理論

—自動運転への期待と同時に、
安全性や信頼性への懸念も高
まっています。先生のご研究は
どのようなものですか。

竹房 安全なIoTシステムを作
るためのソフトウェアシステム技
術を作り上げることであり、その
ために形式検証理論の力を活用
することです。

—お二人はここまで、どのよう
に歩んでこられたのでしょうか。

竹房 大学では情報科学を専攻
しました。数学に近い理論から
工学に近いプログラミングまで、
幅広く学べて選べる環境でした。
ちょうどインターネットが普及し
てきた時期だったのでネットワー
クコンピューティングに関心を持
ち、卒業研究でもテーマにしまし



た。その時の大学の研究室が、産業界や実社会での応用に関する研究を行っている研究機関や大学と共同研究をしており、刺激と影響を受けながらグリッドコンピューティングや超分散処理の研究を行うようになりました。

当時のその世界には、「センサーグリッド」という概念がありました。モノや実験装置を全部ネットワーク化してデータを集めることです。現在のクラウドコンピューティングやIoTに近い研究は、その時から始めていたと言えます。

石川 私はシステムソフトウェアやOSに関心がありました。最初はUNIXを使っていましたが、1980年代後半にパソコンで動くUNIXが現れはじめ、1990年代にはLinuxが世界の一大ブームになりました。1997年頃には、

パソコンと高速ネットワークを組み合わせ、システムソフトウェアを工夫することによりスーパーコンピュータ並みの性能が出せる状況になりました。米国の学会で我々が研究開発したシステムソフトウェアとPCクラスタのデモを行ったところ大変注目を受けました。

その当時、いろいろなところで我々のソフトウェアが使われていました。自然の流れでスーパーコンピュータの開発に携わり続け、「富岳」の開発でもプロジェクトリーダーを務めました。1980年代後半頃は検証技術に興味を持っていましたが、当時はシステムソフトウェアの開発に使える技術として成熟していなかったためその後距離をおいていました。

—— 社会のシステムの複雑さ、制御できなかった場合の影響の大きさは、文字通りの「桁違い」ではないかと思えます。

竹房 これまでも、目の届きにくいIoTデバイスや人が手元で管理していない計算機が、外部から侵入されて大きな被害を発生させたりしています。自動運転車の実用化が視野に入ると、さらに大きなリスクが発生するでしょう。対策が困難だからこそ、安

全にしておくはなりません。安全にするためには、どういう管理をすればよいのか？ ということです。まず、ネットワーク上に何があってどう守らなくてはならないのかを明らかにし、その状態が保たれていることを確認し続けます。同時にシステムを把握し続け、システムへのアクセスが信頼できることを保証し続けます。これが、私たちが安全を保証するための考え方です。

—— 未知の危険に完全に対策することは可能なのでしょうか？

石川 対応できる危険であるかどうかは、システムの脆弱性や存在しうる危険性によります。そこに脆弱性がなくても、外部からの何らかの攻撃によって、ネットワークサービスの一部が影響を受けてパフォーマンスが低下する可能性もあります。その時、どう判断してどう対応すればよいのか。あらかじめ、検討して決めておきます。

例えば自動運転車の場合、走行に関係しないサービスなら「そのサービスをオフにして運転し続ける」。自動運転「レベル3」で走行している場合、走行に悪影響を与える危険性を検知すれば「自動運転を解除し、運転者に運転を代行してもらおう」といった対応が考えられます。実際には、システムの設計段階で分析を行い、分析結果に基づいて対策を講じてお

システムの
信頼性を保ち続ける
ことが重要



く必要があります^{*1}。このために必要な形式検証理論を、蓮尾先生たちと共に追求しています。

——安全性のためにネットワーク上のあらゆるものを完全には信用しない「ゼロトラスト」が必要なのは当然ですが、性能が犠牲になることはないのでしょうか？

竹房 もちろん、性能と安全性のトレードオフはあります。システムを作る側が最初に、何をどこまで安全にするのかを考えるわけですが、システムの運用が開始されれば、さまざまな変化が起こったり持ち込まれたりします。その変化が、現在の研究対象の一つです。

まず、システムをモデル化し、モデルが安全であることを保証してから、システム実装に反映します。システムが変化するということは、モデルも変化するということです。変化したモデルの安全性を検証してからシステムに反映す



れば、システムの安全性は維持され続けるはずです。

基礎研究によって 実際の開発を支援

——最初の設計段階での品質保証は、運用開始後の変化に対応して安全性を確保し続けるためにも重要そうですね。

石川 私たちは製品やサービスを作っているわけではありませんが、確かな手法や頼れる解析ツールを作り上げるための基礎研究を行うことによって、実際の開発を支援することがミッションです。自動運転車の場合、自動車がインターネットに接続され、ネットワーク経由で多様なサービスを提供する側だけではなく、自動車の方でも多様なソフトウェアが動いています。サイバーセキュリティ的な脆弱性があるアタックされた時、そもそも脆弱性があるのかないのか。それを形式検証の手法を使って解析し、今後、開発したツールを公開していきます。さらにプラットフォーム側で、竹房先生たちと連携しています。

竹房 すべての変化に対して求められる対応が可能であるとは限りませんが、それでも、変化を検出することは重要です。

例えば災害対策には、大きく分けて「災害を事前に完全に防止する」という考え方と、「災害の発生は避けられないので、発

生した場合に被害を食い止めて復旧を容易にする」という考え方の2種類があります。私たちは後者、すなわちレジリエンスが実現されるIoTシステムを目指しています。リスクを予測して備えることは重要ですが、受け止めきれないリスクや予測できないリスクが発生した時にも安全に確実に、かつ全体で緩やかに対応することが大切でしょう。それは、システムソフトで可能になると考えています。

——そこで重要な役割を担うのが形式検証であり、数学のパワーだと理解しています。

石川 システムのモデルを設定してモデルを検証すること、そのモデルが発生させるすべての可能性を検証することを、数学的に行うのが形式検証です。考え方自体は昔から存在し、限られた分野で使われてきましたが、徐々に応用範囲が広がってきたと思っています。

すべての可能性を数え上げて検証するわけですから、現実的な、ある程度のサイズと複雑さのあるモデルでは、「組み合わせ爆発」が起こります。ふんだんにメモリを搭載した高性能コンピュータが使えるようになったので、ある程度は、組み合わせ爆発が起きても検証が続けられるようになりました。組み合わせ爆発を抑えながら、現実を反映した大きく複雑なモデルをどこまで検証できるのか。まだまだ、これからです。

竹房 モデルを設定して検証することと、プログラムを作成して実行することの間には、大きなギャップがあります。そこを、どう折り合わせて修正していけるの

今、ここで、大丈夫かどうか、
を積み上げていく

か。言い換えれば、「形式検証の研究者が作ったモデル化手法をシステムソフトウェア研究者が活用できるようにするには、どうすればよいのか？」という課題でもあります。

研究成果がNII提供のサービス向上につながる

—— 過去になかった応用の可能性、近未来に実現されそうな夢には、どのようなものがあるでしょうか？

竹房 NIIは学術機関に対してサービスを提供しています。その中で、IoTシステムのためのミドルウェアも提供しています^{※2}。私たちの今の研究成果は、そこに統合されて使っていただくことになるでしょう。まずは学術機関の皆さんが、IoTシステムを安全に作ることを支援したいです。

IoTの応用範囲は、非常に広いです。例えば各家庭にスマートメーターを備え付け、その情報を都市の電力削減に応用することも可能です。まずは、Society 5.0のための基盤技術として使っていただけるようにすることが課題です。

それが実現すると、「各家庭の情報を隠して電力供給を全体最適化する」ということも可能です。例えば、「地域の自治体単位で自動的に、かつ快適に節電を行う」といった応用も可能かもしれません。社会に根付く道筋としては、学術機関でのIoTシステム開発だけではなく、企業との共同研究を進めて使っていただくことも考えられます。

いずれにしても、外的な要因による変化もありえますから、先行

き予測は難しいです。地道に研究を行い、地道に普及活動をしていくことが重要だと考えています。

—— 期待が高まる一方で、社会から見た懸念はどうしても残りそうです。

竹房 だからこそ、「ゼロトラスト」なのです。すべてに対して「これで大丈夫だろう」と落とし込むのではなく、「今、ここで、大丈夫かどうか」を積み上げていく考え方です。IoTデバイスを対象とした研究で開発した技術は、サーバをはじめ、多様な範囲に適用できます。たとえば小型、かつ人が手元で管理できない場合の多いIoTデバイスに対するソフトの開発と「ゼロトラスト」の実現は、幅広い範囲に応用できるでしょう。

システムの「振る舞い」を数学がモデル化

石川 さらに、私たちの研究では数学の威力が発揮されます。システムの振る舞いを数学的にモデル化し、抽象的に表現することによって、システムの振る舞いが明瞭となりサイバー攻撃の可能性を洗い出すことが可能となります。サイバー攻撃の可能性が見つかれば事前に防御方法を検討しシステムを修正します。修正したシステムの振る舞いを同様に検証することにより「問題がないことを証明した」という説明が可能になります。漏れや取りこぼしなく説明責任を果たせるようにな

る意義は大きいと考えています。

そのためには、開発者がシステムの振る舞いを適切に抽象化し、証明を可能にする必要があります。ここが難しいところですが、開発者は、守るべき資産（例えばIoT機器が扱っているデータ）がどのように扱われているかを我々が開発するツールで記述してもらいます。今までは安全性を検証する人が開発者にインタビューしてシステムの挙動を理解してモデル化して安全性を証明していました。ソフトウェアを開発する側で「問題ありません」という証明ができるようになることには、大きな社会的インパクトがあります。

—— 安全なシステムと未来の自動運転車に、ますます期待が高まります。

※1 自動車の場合は、設計と評価に関する国際規格に基づいて分析を行う。

※2 <https://sinetstream.net>を参照



数学による証明の意義は大きい

NII NEWS TOPICS

期間 2023/2/1(水)～
2023/4/30(日)

各ニュースの詳細は
オンラインでご覧になれます。

www.nii.ac.jp/news/2023



Facebook

<https://www.facebook.com/jouhouken/>

Twitter

<https://twitter.com/jouhouken>

YouTube

(音が鳴ります)

<https://www.youtube.com/user/jyouhougaku>

情報犬ビットくん

Twitter

https://twitter.com/NII_Bit

ニュースリリース

NEWS RELEASE 2023

- 4/7 分野を超えてデータの発見と利用ができる仕組み「CADDE(ジャッデ)」のフィールド実証の実施、および外部仕様書などの公開について
- 3/30 大学図書館等の目録所在情報サービス(NACISIS-CAT/ILL)新システムでメタデータの国際流通へ新たな一歩をふみだす
- 3/29 理研、NII及びNTTがIOWNIによる大規模研究データの利活用促進に向けて連携
- 3/17 画像識別AIの誤識別リスクを効果的・効率的に低減する技術を開発
～自動運転システムにおける安全性ベンチマークにて効果を検証～

受賞

AWARD 2023

- 3/22 越前 功 教授(情報社会相関研究系)、山岸 順一 教授(コンテンツ科学研究系)、Trung-Nghia Le 元特任助教、Canasai Kruengkrai 特任助教(コンテンツ科学研究系)、Huy Hong Nguyen 特任助教(情報社会相関研究系)らの学会誌特集記事が第38回電気通信普及財団賞(テレコム学際研究賞)特例表彰を受賞
- 3/1 小林 泰介助教(情報学プリンシプル研究系)が2022年度日本機械学会奨励賞(研究)を受賞

イベント

EVENT 2023 ▶ www.nii.ac.jp/event/2023

- 6/19~23 ジャパン・オープンサイエンス・サミット(JOSS2023)
(オンライン開催)
- 6/2~3 国立情報学研究所オープンハウス2023(研究成果一般公開)
(一部オンライン中継)
- 5/29 国立情報学研究所 学術情報基盤オープンフォーラム 2023
(ハイブリッド開催)
- 5/12 【第65回】「教育機関DXシンポ」(オンライン開催)
- 4/21 【第64回】「教育機関DXシンポ」(オンライン開催)
- 3/29 【第63回】「教育機関DXシンポ」(オンライン開催)
- 3/25 第10回 国立情報学研究所 湘南会議 記念講演会(ハイブリッド開催)
「人とロボットの経験を拡張するデジタルツイン」
- 3/22・24 2022年度 NII退職記念講演会(一部オンライン中継)
喜連川所長・米田副所長・大山所長補佐・阿部教授

- 3/3 【第62回】「教育機関DXシンポ」(オンライン開催)
- 2/17 研究データ管理(RDM)説明会2022 in 金沢(2023年2月開催)
- 2/17 SPARC Japan セミナー2022「電子ジャーナルの転換契約とAPC問題で変わるオープンアクセスの現状と課題」
- 2/3 【第61回】「教育機関DXシンポ」(オンライン開催)

ご意見募集中

NII Today本誌に対する皆様のご意見を下記よりお寄せください。忌憚ないご意見をお待ちしています。

www.nii.ac.jp/today/iken



情報犬ビットくん
(NIIキャラクター)

NII 情報

INFORMATION 2023

- 4/12 国立情報学研究所オープンハウス2023(研究成果一般公開)の参加受付を開始
- 4/11 2022年度 国立情報学研究所 市民講座 第4回「スーパーコンピューターを創るには? -ソフトウェアがなければただの箱- 石川 裕」を公開
- 4/10 2023年度 国立情報学研究所 公募型共同研究 第2回(追加)の募集を開始
- 4/7 分野を超えてデータの発見と利用ができる仕組み「CADDE(ジャッデ)」のフィールド実証の実施、および外部仕様書などの公開について
- 4/3 1st call of 2023 "NII International Internship Program"
- 4/1 国立情報学研究所 2023年度 概要(日本語版)を刊行
- 3/31 2021年度 国立情報学研究所年報を刊行
- 3/30 大学図書館等の目録所在情報サービス(NACISIS-CAT/ILL)新システムでメタデータの国際流通へ新たな一歩をふみだす
- 3/29 理研、NII及びNTTがIOWNによる大規模研究データの利活用促進に向けて連携
- 3/25 2022年度 国立情報学研究所 市民講座 第6回「膨大なデータを集めて社会問題を解決?! -IoT(Internet of Things)データの収集と活用- 竹房 あつ子」を公開
- 3/20 コート・ダジュール大学3IA研究所の視察団がNIIを訪問
- 3/17 画像識別AIの誤識別リスクを効果的・効率的に低減する技術を開発～自動運転システムにおける安全性ベンチマークにて効果を検証～
- 3/15 広報誌 NII Today 第98号「情報学が導く世界～挑戦と進化の10年」を刊行
- 3/6 2022年度 国立情報学研究所 市民講座 第5回「適切なデータ管理で研究の透明性を高めて効率化! -研究者が使う「GakuNin RDM」とは? - 込山 悠介」を公開
- 2/14 「神戸大 日中対照調音動態MRI動画コーパス(KUJC-MRI)」提供開始

メルマガ購読無料!

NII Today最新刊の発行他、NIIに関する情報を随時お届けするメルマガジンのお申し込みはこちらから。購読は無料です。

<https://www.nii.ac.jp/mail/>



参加無料(要登録、先着順)
会場:東京都千代田区一橋
(一部オンライン中継)

登録方法その他詳細はこちら↓
<https://www.nii.ac.jp/event/openhouse/2023/>

[Essay]

制御理論って何？

国立情報学研究所
情報学プリンシプル研究系
准教授

岸田 昌子

KISHIDA, Masako

情報系の人にとって、聞いたことがある気がするけれども、その中身は謎な「制御理論」。論文や研究課題のタイトルに「制御」とついているからと言って、その研究が「制御理論」に関係があるとは限りません。タイトルが「○○制御理論」となっている場合でも、実は「○○制御のための理論」であって、「制御理論」に全く関係ない場合すらあります。こういった場合は、たとえ専門家であっても概要を読んだり、キーワードや文献リストを確認するしかありません。

制御理論は、主に微分方程式（または差分方程式）を用いて動的システムやプロセスを記述し、その微分方程式を用いて動的システムの特性を解析し、動的システムから望ましい出力を得るために動的システムにどのような入力を与えるべきかを数学的・理論的に提案する学問です。このため制御理論は、線形代数、グラフ理論、実解析、複素解析、関数解析、数値最適化などの多様な数学

を駆使し、理論や提案を定理と証明の形で記述します。

制御という言葉がつく学問には制御工学もあります。制御工学は、自動車、航空宇宙、ロボット、電力システムなど、実際のシステムを思い通りに動かすために、制御理論を用いてシステムの設計・構築・運用する学問です。

このように、制御理論と制御工学は異なる研究分野ではありますが、密接な関係があり、グラデーションでつながっています。そのため、制御理論専門の研究者、制御工学専門の研究者、そして両方に携わる研究者がいます。

制御理論は人工知能とも密接な関係があります。例えば、制御理論におけるフィードバックや最適制御の考え方は、ニューラルネットワークや強化学習アルゴリズムの基礎となる考え方と言えますし、制御理論で知られている理論を用いて、学習アルゴリズムの収束性や安定性を保証するための条件を導出できる場合も

あります。このため、機械学習や人工知能のアルゴリズム開発においても制御理論の研究者が活躍しています。

このような制御理論の魅力は、まず第一に紙とペンを使って研究を進められることです。パソコンは情報収集と論文原稿作成のために使用する程度なので、普通のパソコンで十分です。特別な設備を必要としないため、時間や場所（そしてお金！）に縛られることがありません。また、制御理論に取り組む中で身につける多様な数理的スキルは、幅広い研究分野で展開できるため、他分野の研究と自分の強みを融合させることができるのも魅力的な点です。さらに、制御理論は、曖昧さがなく簡潔、かつ実体をイメージしやすい数学で理論が展開される点も見逃せません。

まとめると、タイトルの「制御理論って何？」に対する答えは、「陰の立役者で重要で魅力的な数学の理論研究分野の一つ」です。

情報から知を紡ぎます。



国立情報学研究所ニュース：NII Today 第99号 令和5(2023)年6月
発行：大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立情報学研究所
〒101-8430 東京都千代田区一ツ橋2丁目1番2号 学術総合センター

本誌についてのお問い合わせ：総務部企画課 広報チーム
EMAIL: kouhou@nii.ac.jp

発行人：黒橋 禎夫

編集委員長：越前 功

編集委員：池畑 諭、金子 めぐみ、込山 悠介、竹房 あつ子、水野 貴之(五十音順)

外部編集員：テックベンチャー総研、梶原 麻衣子

デザイン：FROG KING STUDIO

表紙イラスト：市村 譲

