

# NII Today

86  
Dec. 2019

National Institute of Informatics News

ロボット研究のこれまでとこれから  
社会に役立つ革新的な研究を生み出すために  
金出武雄氏 [カーネギーメロン大学ワイタカー記念全学教授]

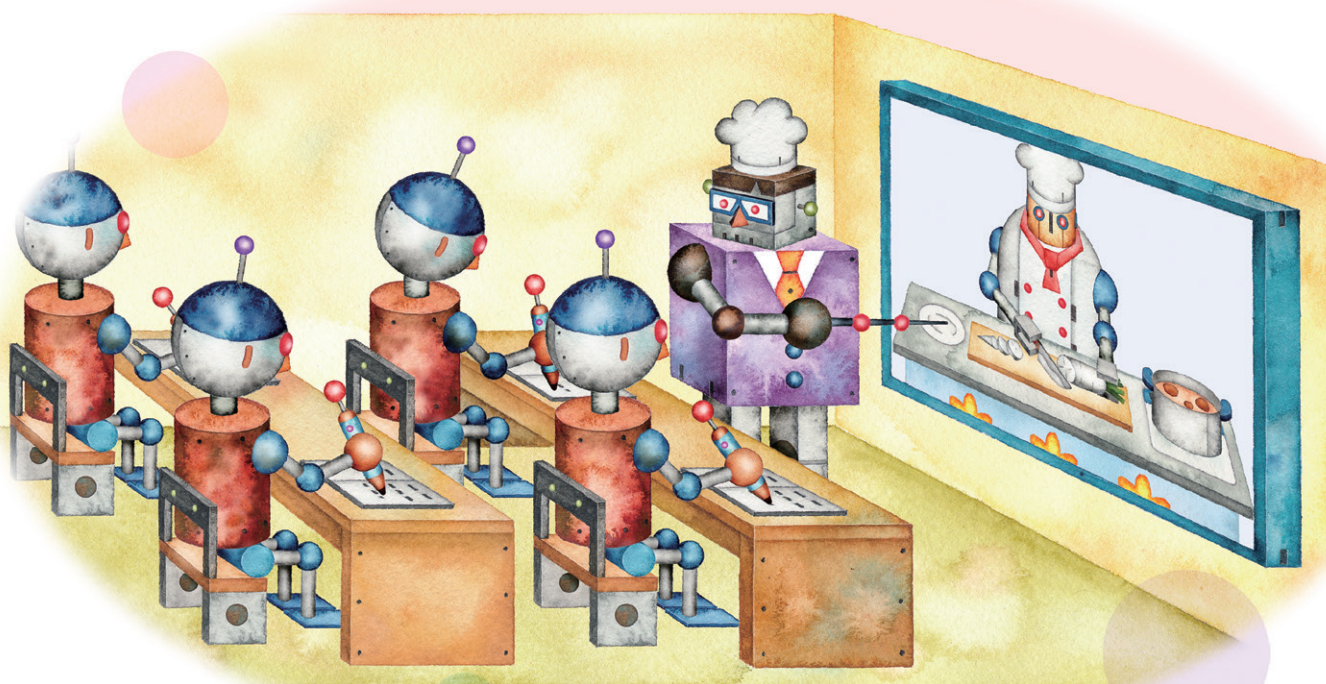
賢いロボットをつくるために、  
仮想空間でロボットと対話する  
稲邑哲也 [情報学プリンシプル研究系 准教授]

ロボットから人の知能の謎を解き明かす  
村田真悟 [情報学プリンシプル研究系 助教]

Feature

## ロボットと情報学

人間とロボットの新しい関係



# ロボット研究のこれまでとこれから

社会に役立つ革新的な研究を生み出すために

**金出武雄氏** Takeo Kanade

カーネギーメロン大学ワイタカー記念全学教授  
国立情報学研究所 客員教授  
理化学研究所革新知能統合研究センター 特別顧問

聞き手：**滝田恭子氏** Kyoko Takita 読売新聞東京本社 編集局次長

人工知能を搭載したロボットと共存する時代は、すぐそこまで来ているのだろうか。ロボット研究の権威・金出武雄カーネギーメロン大学教授の答えは、間違いなく「イエス」だ。ロボットは今後、いったいどのように人間社会と関わっていくのか。1970年代からロボットの目となるコンピュータビジョン（画像処理・画像認識）の先駆的研究を行い、1995年には自動運転車によるアメリカ大陸横断に成功した金出教授に、ロボット研究の魅力と展望について聞いた。

## 端緒は世界初となる顔画像の処理・認識

—— コンピュータビジョンや人工知能（AI）を50年以上研究していらっしゃいます。初期の研究はどのように始まったのでしょうか。

**金出** 人工知能という言葉は初めて聞いたのは、京都大学工学部の3年生の時です。音声認識のパイオニアである坂井利之先生の講義で、人工知能という概念を知りました。自分でも

アラン・チューリングやクロード・シャノンといったコンピュータ科学者の本を読み、「人工知能は絶対に人間より賢くなる」と確信しました。その信念はずっと変わりません。

人の知能というのは計算です。技術的用語としての「計算」というのは四則演算のことだけではありません。数字だけではなく、記号、条件判断や論理計算、センサー入力、そして外界への動作など情報処理のすべてを含みます。人は目・耳・肌などの感覚器官を通して外界の様子を物理信号として取り入れ、



## 金出武雄

カーネギーメロン大学ワイタカー記念全学教授。国立情報学研究所客員教授。理化学研究所革新知能統合研究センター特別顧問。1945年生まれ。1973年、京都大学工学部電子工学科博士課程修了。同大学助教授を経て、1980年にカーネギーメロン大学ロボティクス研究所および計算機科学科高等研究員。1992年から2001年まで、同大ロボティクス研究所所長を務める。2016年京都賞受賞。2019年文化功労者。著書に『独創はひらめかない—「素人発想、玄人実行」の法則』（日本経済新聞出版社）などがある。

神経細胞ネットワークという物理的装置である脳によって記憶を参照しながら処理し、結果を筋肉などに電気信号として指令し動かしているのです。摩訶不思議な仕組みと力をもってやっているわけではありません。物理的制限が人間に比べて少ない計算機が人間を超えるのは不思議ではないと思いました。

—— 京大の大学院時代につくった画像認識プログラムが、その後のコンピュータビジョン研究につながったのですね。

**金出** 坂井教授の研究室で当時助教授をされていて、後に京大総長になられた長尾真先生のアドバイスで、1970年の大阪万博で集められた来場者1000人以上のデジタル画像をもとに、鼻や目、口の位置や角度などの特徴を抽出し、分類するという一連の作業をコンピュータで自動的に行うプログラムをつくりました。この博士論文の研究は、顔画像の処理と認識における世界初の本格的な研究と認められました。

### データは量より質が大事である

—— 顔認識は今ではごく一般的な技術になりました。GAF(A (Google, Apple, Facebook, Amazon) のようにビッグデータを活用できる巨大企業や、中国のように監視カメラで国民の情報を広く集めている国では認識の精度が上がっていきそうです。

**金出** 顔の認識をするためにどのような特徴を使えば良いかというのは、2000年くらいまでは人間が考えていました。しかし今のディープラーニングは、たくさんの顔の画像からコンピュータのネットワークが学ぶ、よく言えば勝手に考えどんどん賢くなる。そういう意味では、多くの顔のデータを持っている企業や国は有利です。

しかし、データの数イコール精度というわけではありません。

—— ビッグデータがすべてというわけではないのでしょうか。

**金出** データが重要というのは嘘ではないけれど、データさえあれば何でもできるという最近の論調に私は賛成しません。大事なのはデータのクオリティ。本来解きたい問題に関係があるデータこそ重要です。

自動運転を例に挙げると、道路を何度走っても得られるデータというのは、だいたいいつも同じです。ある交差点では歩行者がいつも右から出てくる。ところが、ごく稀に左から歩行者が出てくるケースもある。この交差点のデータが右からの歩行者しか想定していないと、左からのケースに対応できず事故につながってしまいます。

では、空から車が降ってくる場合についても考える必要はあるのか。高速道路の下の道ならともかく、一般的には考えにくいですね。

あまりにも多くのケースを想定しようとすると、必要のないことにまでリソースを取られて日常の運転が危険になることもあります。だから、どこまでのデータが自動運転の実現に必要なかを見極めなければなりません。

そのような視点でデータを集め、あるいは最近では人工的に

つくり、そのデータに対して自動運転車がどのように判断するべきかという答えとともに集める。そうした質の高いデータは、質の低いデータにはない価値があります。

### 1995年、自動運転車で米大陸横断に成功

—— 今、世界中で自動運転が注目されていますが、カーネギーメロン大学(CMU)で研究を始めたのは1980年代半ばでした。

**金出** 米国防総省の国防高等研究計画局(DARPA)のALV(Autonomous Land Vehicle)というプロジェクトとして自動運転の研究を始めました。カメラとコンピュータを積んだロボット車が、自分で道を見つけて自動走行するというものです。

私の最初の研究計画では、1986年に開始して1年目で道路のレーンに沿っての走行、2年目には障害物の発見が可能になり、4年目には現在でいうところのレベル4(高速道路などの特定の条件のもとで人の補助なしに車がすべての操作を行う)が実現すると言って、そのための方策も「一応」示していました。そんなプロポーザルを信じて、よく資金をつけてくれたものです。

—— 研究を始めた時、どんな技術が自動運転に必要だと思っていましたか。

**金出** 基本的には今の自動運転車と一緒にです。画像やセンサーを使って道路の位置、人、ほかの車、障害物の存在を確認し、安全な軌跡を決めて運転していくというのが基本で、それは現在も変わっていません。未熟な部分は多くあったけれど、今の自動運転の原型はできていたと言えます。

CMUの自動運転車は1995年に東海岸のピッツバーグから西海岸のサンディエゴまで、98.2%は人間がハンドルを触ることなく4500kmの米大陸横断に成功しました(図1)。基本的に



図1 | 1995年のアメリカ大陸横断ルート(上)と、自動運転車「NavLab5」(下)

は現在、高速道路で一般的に使われているレーンキープのプログラムです。だから、工事中でレーンがないような場所は走れませんでしたが……。

### 自動運転の実現を促すコンピュータとセンサーの進歩

——なぜ、ようやく今になって自動運転の実用化が進んでいるのでしょうか。

**金出** 自動運転の要素技術の一つひとつが大きく進歩したからでしょう。

一番はセンサーです。カメラの性能が非常に良くなって、特に対応できる明るさの領域（ダイナミックレンジ）が広がりました。人間は急に明るいところに出てまぶしいと思っても、じきに目が慣れて見えるようになります。カメラにはそれが難しく夕日をバックに白い対向車が走ってくると見えない。トンネルの中から外を見ると真っ白になるし、外からトンネル内を見れば真っ黒。そういった弱点を克服する研究が進んで、完璧ではないけれど解像度やダイナミックレンジといったスペックが大きく向上しました。

また、LiDAR（Laser Imaging Detection And Ranging）という外界の様子を距離の画像として計測する3次元センサーも、我々が始めた時には世界で数台、画素数も少なく、1秒間に数フレーム、距離も30m先を計測できるかどうかというレベルでしたが、今は360度で100m先もリアルタイムで測れます。

コンピュータの性能向上はもちろん大きな要因です。研究を始めたころ使っていたサン・マイクロシステムズのワークステーションは当時としては演算能力が高いものでしたが、せいぜい数MIPS（Million Instructions Per Second、毎秒100万回の命令実行）というものでした。今は演算能力をギガ（10億）やテラ（1兆）の単位で測るのですからね。昔に比べて計算能力が5乗、6乗も違う。さらに画像処理やディープラーニングに適したGPUのような演算処理装置も普通にあります。

センサーとコンピューティングという二つの技術に加え、ディープラーニングという学習アルゴリズムによって認識プログラムの能力が飛躍的に進歩したことで、自動運転が現実的になったと言えるでしょう。

——自動運転の時代が来ると思っていましたか。

**金出** 運転をコンピュータが代行するのは当然だろうと考えていました。実用化にこれほど時間がかかるとは思いませんでしたが。

しかし正直に言うと、MaaS（Mobility as a Service）のように、情報通信技術を使って車や公共交通機関が連携して最適な交通手段を提供する仕組みができ、その中で自動運転の車がデータのフィードバックを受けて、さらに能力を上げていくというようなことになるとは想像していませんでした。単に車の運転の方法が変わるだけでなく、自動運転になれば社会の構造そのものが変わっていくという発想は当時はありませんでしたね。



### 自動運転の普及は社会の受容がカギ

——完全自動運転に向けた課題はなんのでしょうか。

**金出** 「運転技術」のほかに人の行動のモデル化でしょう。自動運転と人による運転が混在する段階では特にね。

運転というのは一種のゲームです。目的地に早く着くというメリットと、事故を起こすというデメリットをトレードオフしている。事故が起きる可能性をある程度以下の危険度に抑えつつ、なるべく早く到着するという目的を最大化する。自分だけでなくまわりの運転手も同じように考えているわけで、運転はそのせめぎ合いのゲームと言えます。

車の運転では、周囲を走っている車がどのような行動を取るか分からないと困りますね。交差点でどちらが先に行くかというのは、人同士はあうんの呼吸で決まる。自動運転の車にそれをさせようとする、すべての車が自動運転なら信号をやり取りして次の動きを調整できるからいいのですが、自動運転の車と人の運転する車が混在している状態ではなかなか難しい。

自動運転によって交通事故率が平均的に減るのは間違いないでしょう。今でもすでにそうかもしれません。しかし、自動運転の事故率が人間の事故率より平均的に何%か低くなくても、すぐには受け入れられない。人間が運転する車と同様に、自動運転車の事故も完全にゼロにはならない。そもそも車というものの存在は、悲しい事故が起きているにもかかわらず、その圧倒的な社会的メリットゆえに、事故に対しては保険という仕組みによって社会全体として受け入れているものですね。完全自動運転の事故率が人の運転よりもどれだけ低ければ社会は受け入れるのか。10分の1かそれとも1万分の1か、そこはまだ私にはわかりません。

### 「素人発想、玄人実行」で社会に役立つ研究を

——研究をずっとアメリカで行っていたらしたわけですが、日本の研究環境との違いはありますか。

**金出** アメリカの大学や研究所では、自分の研究がどう使わ

れるかを大事にします。論文を書いただけで喜んでいても仕方ない、社会的なインパクトを与えられなければ意味がないということ。

インパクトというのは、研究したことがどれだけ世の中で使われて、貢献できているかということです。そして大学としては、世の中を変えていく中心になっていく人を、どれだけ育てたかが大事です。このことは、ぜひ言っておきたいですね。

ピッツバーグは自動運転の研究開発の一大拠点で、ウーバーテクノロジーズ、アーゴAI、オーロラなどの企業が市内で試験走行を行っています。それはCMUがあるからです。大学からも多くの研究者が引き抜かれました。

アメリカでは大学の研究者がスタートアップに行ったり、そこから戻ったりと、社会とのつながりが強い。博士号を持っている人たちは大学にこもるのではなく、もっと世の中の動きに関心をもつべきです。

——日本の研究者はもっと社会を意識せよ、ということですね。

**金出** 僕が「役に立つ研究」と言うと、日本では反対する人が多い。それは応用研究の話で、基礎研究が大事であって、そもそも基礎研究というのは役に立たないものだまでいいます。

基礎研究というものも何らかの意義があるからやるのであって、なんだかわからないけれど面白そうだから研究したい、それに税金を、しかも大金を出せというのは不遜というものでしょう。

「役に立つ」という言葉が、「応用」と等しいとか、時には「便利」と同じ意味にとられて誤解されている面もあるのかな。「解く価値のある」研究というべきですかね。今までわからなかったことがわかるというのも、役に立つ研究です。それがいざ社会にどういったインパクトを与えるのか言えるようにする必要があります。それを考えて楽しくなる気持ちももてる研究でしょうか。

日本の研究計画書（プロポーザル）には、「自分はこういう研究をしたいから、研究資金をください」という内容のものが多いけれど、それはプロポーザルではない。研究でこういう目的のために、こういうことを解明したい、そのために技術的に何をすることが必要かと方法を書く。そして自分がやればできそうだというそれなりの根拠を示す。それがプロポーザルです。

「素人のように考え、玄人として実行する」ということが大事だと思っています。研究者の常識にとらわれずに自由に発想する。しかし、それを実現するにはプロフェッショナルとしての視点と技量が求められます。

### 求められるのは状況に応じて微調整できるロボット

——ロボット研究の将来像を聞かせてください。

**金出** これまでのロボットは人間の関与を減らすというのが基本的発想でした。危険な場所で仕事をさせるとか、工場での

作業を無人化する、任せるといった目的で自律型ロボットが開発されてきました。

これからは、ロボットが人とともに働く、人と一緒に生きる時代になると思います。運動能力だけでなく、知性でも人を超えるスーパーヒューマンと言えるロボットが登場します。人間の頭脳は今ある情報のすべては処理できない。一生の間の経験の量にも上限がある。人間の能力はある段階で飽和するけれど、ロボットにはそうした限界がない。

「最高のロボットというのは何をやるロボットか」という問いがあります。「自分がしてほしいことをやる」という答えが多いようですが、私の答えは少し違う。「ロボットがすべきこと」＝「自分がしてほしいこと」－「自分ができること」± $\Delta$ （デルタ）というものです。

+ $\Delta$ の場合は、ちょっと余分に助けてくれる。「おお、便利だな、親切だな」となります。－ $\Delta$ の場合は、少し助けが足りないから、人間が自力で埋めようとする。例えば、お年寄りや障害を回復中の人が自分の能力を維持しよう、回復しようとするのを助ける。マイナス方向に調整することも大事なのです。

「自分ができること」と「したいこと」のギャップを埋め、微調整してくれるのが最高のロボットという意味で、「ドクター金出の方程式」として宣伝中です。ロボットと共存する時代に向けて広がってほしい考え方です。

（写真＝佐藤祐介）

### インタビュアーからのひとこと

デジタル画像がない時代のこと、学部生だった金出先生は写真に細かく格子を刻み、1マスごとに明るさを示す1から10までの数値を書き込むことからプログラミングを始めたそう。紙テープで出てきた膨大な計算結果をテレタイプで文字に直し、締め切りぎりぎりまで卒論を完成させたという。「コンピュータビジョン事始め」から半世紀。画像認識も自動運転も、地道な取り組みと改良の積み重ねが社会を変えていくのだと納得した。

### 滝田恭子

読売新聞東京本社 編集局次長

1989年、上智大学外国語学部卒業、読売新聞社入社。2000年、カリフォルニア大学パークレー校ジャーナリズム大学院修了。2002年より科学部で科学技術政策、IT、宇宙開発、環境、災害などを担当。論説委員、科学部長を経て2018年より現職。



# 賢いロボットをつくるために、 仮想空間でロボットと対話する

クラウドとVRを活用するシミュレータの意義とは

稲邑哲也 Tetsunari Inamura

国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系 准教授 /  
総合研究大学院大学 複合科学研究科 准教授

日常生活で人とインタラクションしながら社会的・身体的経験を通じて、学び成長するロボットを実現するためには、シミュレータの活用が有効だとNIIの稲邑哲也准教授は考えている。詳細かつ大量のマルチモーダルデータを低コストで集められるからだ。クラウドとVRを活用する社会的知能発生学シミュレータ「SIGVerse」による対話経験蓄積を通じて、ロボットを知能化する取り組みについて聞いた。

## 社会的知能発生学シミュレータで学習データを蓄積

機械学習は、いまやあらゆる分野で使われている。ロボットにおいても、物体をつかむスキルや運転するスキルなどを機械学習で向上させられることが明らかになっており、今後も加速していくと考えられる。

稲邑哲也准教授は学生時代から人間とロボットのインタラクション（やりとり）を研究してきた。会話や見真似を通じて人間と関わり合いながら育てていくロボットに興味があるという。

ロボットも機械学習の一種である深層学習で賢くなると考えられるが、残念ながらボトルネックがある。学習のための教師データが取得できないのだ。物体のピックアップや自動運転は多数のロボットを並列して朝から晩まで動かしたり、ひたすらド

ライブしたりすることでデータを取得することができる。だが人間相手のやりとりで似たような方法を実行するのは難しい。例えば、介護の現場でどうやって人を抱きかかえればいいのか、店舗の現場でどのように接客すれば顧客満足度は上がるのか、それら全てに人間が付き合わなければならないからだ。

どうすればロボットが実験室内でやりとりを繰り返すようなスタイルではなく、ごく自然にインタラクションしながら学習データを蓄積することができるのか。稲邑准教授が取っている戦略がロボットシミュレータだ。

社会的知能発生学シミュレータ「SIGVerse」はクラウド型VRプラットフォームである（図1）。クラウド上にVR空間をつくって、そこにシミュレータにおいてロボットを動かし、人もそのなかでバーチャルエージェントとして行動することで、人とロボットがインタラクションする。クラウドを使うことで、従来のように研究室にまで実際に来てもらって実験に参加してもらうのではなく、インターネット越しに世界中の人にログインしてもらうことで、同時に多人数の実験ができる。「従来スタイルでは到達できないスケールでの実験ができる」と稲邑准教授は語る。「SIGVerse」上にはすでに1万時間の行動履歴が蓄積できる準備が整っている。

## 多くの人の行動から共通項を見いだして見真似学習する

ロボットのプログラミングスタイルも変わりつつある。これまではプログラミングや、コントローラーを使った遠隔操作でロボットに動作を教える方法が一般的だった。それに対して近年の研究トレンドは「Learning by Demonstration」、つまり人間がやってみせて、それを何らかの方法でロボットに伝えることでロボットが学ぶ「模倣学習」だ。稲邑准教授らは、それをVRのなかで行っている。

例えば人間が台所での皿洗いを教える。まず複数の被験者が



稲邑哲也

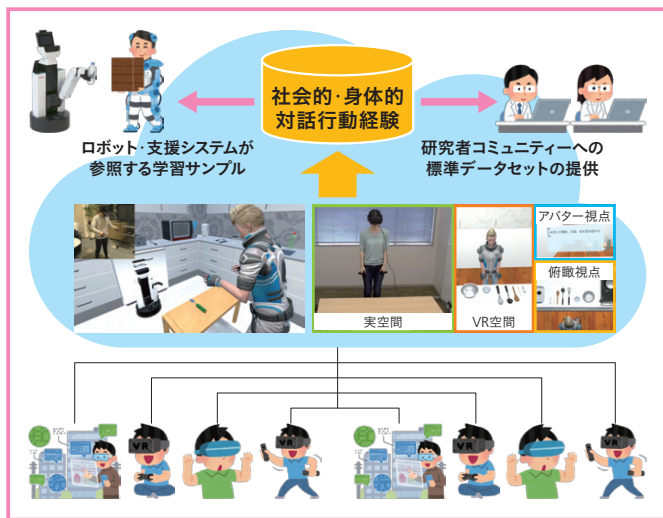


図1 | クラウド型VRプラットフォームの構成図。ユーザーは任意の場所からクラウド上の知能ロボットとの対話実験システムに参加することができる。収集された社会的・身体的な対話行動経験はオープンなデータベースとして蓄積され、知能ロボットのリアルタイムな学習に用いることが可能。

VRのなかで皿洗いの動作をやってみせる。その挙動はVR中のカメラで観察されており状態遷移図として表現される。どちらの手でスポンジを持ち、どのタイミングで水につけるのかといった「各人の皿洗い戦略」は異なるが、どういう順番で物体を接触させていくのかということが状態遷移図で表現される。どういうアクションからどういう状態に移るのが明示されるのだ。そして、状態遷移図からは共通項を見いだすことができる。

「ほとんどの人が右手でスポンジを持っていて、左手でお皿を持っている状態を経験していれば、これは『頻度の高い状態なので、そこは踏襲しなければならない』と判断されます。一方、非常にまれな状態、例えばゴミ箱のなかにコップを捨てるような行動はノイズ（雑音）として切り捨てます。そうすることでロボットが取るべき行動を見いだします」

この研究はドイツ・ミュンヘン工科大学のゴードン・チェン教授たちとの共同研究だが、VR空間にログインするための環境とHMD機材さえあれば、誰でもどこからでも参加できる。

インタラクションは行動の見真似だけではない。ロボット側から人間に質問で確認したり、人間から指示を与えることでスキルをどんどん向上させたりする対話システムを構築することもできる。

ただし現状のロボットは因果関係を理解しているわけではないし、作業自体の最終目的もわかっていない。例えば皿洗いの目的が皿を綺麗にすることだと理解しているのではなく、単に動作を模倣しているにすぎない。その課題の根本的解決策はいまだに見いだせていない。

「バットの素振りなら関節角度を真似ればいだけですが。しかしバットをボールに当ててホームランを打つとなると、模倣すべき対象が何なのかをロボットが自分自身の力だけで突き止めることは難しいのが現状です」

人間が日常生活で行うこともさまざまなレベルがある。稲畑准教授は完全にロボットが自律的に判断するのは当面は難しいと考えて、人間が指示などで教師信号を適宜入れていく、そし

て指示を自然に模倣学習に取り込めるようなシステムが必要だと語る。

## 人をナビゲーションするシステム

稲畑准教授らは、ロボットの競技会「ロボカップ」において「ヒューマンナビゲーション」という競技を創設して、人とインタラクションできるシステムづくりにも取り組んでいる。通常のロボコンと違い、VRプラットフォームを使うことでより公正・低コストでハードウェアトラブルのない競技を実現するのが狙いだ。実ロボットを使った競技でのタスクは家庭内で人間に指示された何かをロボットが取って来るというものだが、ヒューマンナビゲーション競技では、ロボットがVR空間にログインした人間に対して指示を出す。

ロボットには、三次元のXYZ座標位置で指定された物体を別の座標位置に移動させよという問題が送信される。競技に参加した各チームは、その三次元座標を人間に理解できるように、例えば「目の前のテーブルの上のマグカップをキッチンのシンクに入れてください」といった自然言語に変換するプログラムを書く。人間は自分自身の向きを次々と変えてしまうので、上下左右のような人中心の座標での指示語を使うには人間の状態も把握しなければならない。システムからのナビゲーションに応じて人間が迷わず行動できれば高得点が得られる。

次回の本番は2020年10月に愛知県で開かれる「ロボカップ・アジアパシフィック大会」で行われる。参加目標チーム数は8。日本からは4チームが参加する予定だ。

## 家庭用ロボットは最後の砦

稲畑准教授が取り組んでいるもう一つの柱が、ロボットが人間に対してお願いする能力だ。ロボットが何でも自分でやろうとするのではなく「できない」と思ったら人間に頼めばいい。

「家庭はロボットにとって最後の超難関です。ロボット準拠住宅のようなものを新たにつくるのであれば別ですが、一般家庭でお皿を洗ったり洗濯物を畳んだり、自力で何でもできるロボットを実現するのは相当難しい。そこで『掃除ができないので物をどかしてください』とロボットが頼むことで、できることを増やして、より快適な生活にしていくのが一つのあるべき姿だと考えています」

「できないこと」を頼むためには、ロボットは自分自身が「できること」、つまり物理的な限界を認識する必要がある。そのためにもシミュレーションが重要なファクターになる。人間が脳内で想像するように、何ができて何ができないかを具体的に把握する必要があるからだ。

ロボットが世界の精緻なモデルを自らつくり、リアルタイムに更新していく機能も必要だ。稲畑准教授は、いまはまだ「2歩先」の研究だと考えているそうだが、最後の砦である家庭にも挑んでもらいたい。ナビゲーションや行動の共通項を見いだす機能は生産現場やサービス業の最適化にも活用できそうだ。

(取材・文=森山和道 写真=佐藤祐介)

# ロボットから人の知能の 謎を解き明かす

空気を読んで協調作業するために必要なこと

村田真悟 Shingo Murata

国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系 助教/  
総合研究大学院大学 複合科学研究科 助教

ロボットが「空気」を読んで、人の生活をサポートする時代は訪れるのだろうか——。そんな未来を実現するためには、ロボットそのものが人のように考え、判断する必要がある。NIIの村田真悟助教は、「予測誤差最小化」の研究に取り組むなかで、人の知能や脳の仕組みを探究。その成果の一部をロボットに応用することで、研究を加速させようとしている。

## 人間の認知機能は「予測誤差最小化」に基づく

村田助教のロボットへのアプローチは、「役に立つロボットをつくる」ことではない。人の知能や脳の理解をめざした研究をするなかで、ロボットを活用し、その仕組みの検証を行うというものだ。いわばロボットは、知能や脳を知るためのツールにすぎない。だが、この仕組みが、「空気」を読んで人と自然にインタラクションができるロボットを生む近道になる可能性がある。

村田助教が取り組んでいるのは、「予測誤差最小化」の研究である。これは、いまでは認知ロボティクス研究の一つのテーマに位置づけられているが、もともとは認知神経科学の分野で

提唱されている原理である。村田助教は次のように説明する。

「人は会話をする際に、相手からどんな返事がくるかを予測しています。しかし、その返答が予想外の内容であった場合に、人は驚くことになる。これが予測誤差です。学習という行為は、長い時間軸で蓄積した予測誤差を最小化するようにシナプスの結合を調整するものであり、行動は、短い時間軸で生じた予測誤差を解消するためのもの。そして、知覚も同様に短い時間の予測誤差を最小化するためのものです。つまり、人は予測と違うことが生じたら、その誤差が小さくなるように学習をしたり、行動をしたりしているわけです。

そして、認知神経科学の権威であるカール・フリストン氏は、自由エネルギー原理と呼ばれる脳の統一原理を提唱するなかで、この予測誤差最小化によって、人のすべての認知機能を説明できると述べています。そこで、私はこうした予測誤差を最小化するための仕組みを、ロボットを使って実験しようと考えているのです」

## 予測誤差を最小化するロボットをつくる意味

仮に、予測誤差最小化が人のすべての認知機能につながるとすれば、乳幼児が親や兄弟などの他者、まわりの環境などとのインタラクションを通じて、学習し、判断していくことにも説明がつく。

また、人が他者と共同作業する場合も、予測は大事なメカニズムになる。相手の意図を推定して行動すること、予想外のことがあるとそれを理解して判断すること、そしてまた、他者の意図を推定し直して、それに基づいた協調行動を実現することになるからだ。

これは、人と協調作業をするロボットでも同じだ。特定の用途に利用するロボットであれば、事前に起こりうる状況を想定し、そのためのプログラムやアルゴリズムを組み込んで稼働さ



村田真悟



せればいい。しかし、人と協調してコミュニケーションをしたり、作業をしたり、あるいは「空気」を読んで人をサポートするロボットの実現には、その場その場で判断して、行動する能力が必要になる。人の行動や考え方、作業のプランが変わったときにも、それをロボット自身が認識し、判断して、人を支援しなければならない。しかし、事前に想定した状況のみに対処可能なプログラムやアルゴリズムで、そのようなロボットを実現するには限界があるだろう。

そうした意味でも、認知ロボティクスや予測誤差最小化といった研究は、人の支援に役立つ未来のロボットの実現には不可欠な研究と言っている。「どんな状況でも予測誤差を最小化できるロボットをつくり上げれば、人のような認知機能を獲得して、その結果、人の役に立つロボットをつくることができるかもしれません」と村田助教は語る。

実は、自閉スペクトラム症をはじめとする発達・精神障害を有する人々を理解したり、そのような人々とコミュニケーションしたりする手立てとしても、予測誤差最小化は有効だという。例えば自閉スペクトラム症の原因の一つに、予測誤差の精度の推定がうまくできないことがあげられている。この仮説を、モデルに組み込んでロボットで学習実験を行うと、自閉スペクトラム症のようにふるまうロボットができあがるという。

予測に対して、絶対的な自信があるときほど、外れたときの誤差に対する係数が大きくなる。逆に自信がないときは、予測が外れてもそれほど驚きはない。言い換えれば、誤差の重みづけを変えることによって、ふるまいを変えることができる、というわけだ。これも人を理解する一つの取り組みである。村田助教は、精神医学の研究者らとともに、こうした研究にも取り組んでいる。

### 情報学の貢献と究極のロボット

ロボットに予測誤差最小化の機能を埋め込むのに有効なのが、深層学習の一つであるRNN (Recurrent Neural Network) である。これは、再帰結合をもったニューラルネットワークであり、簡単にいえば、過去の状況を把握しながら時系列データを扱うことで、文脈依存の予測を行って、出力するというものだ。

ロボットに応用すると、腕を上げ下げする際の角度や視覚などの情報を、過去の状況をもとに予測して、腕を正しい方向に、正しい角度で動かすことができるようになる。ロボット自らが、過去の履歴データを利用することで、よりよい予測や判断ができるようになるというわけだ。

「私が学部4年生として卒業研究を始めた9年前は、ニューラルネットワークの研究を行うにもツールがなくて、一からつくる必要がありました。TensorFlowやPyTorchといったライブラリが出てきたことで、ロボットの発展に向けた研究が簡単に始められるようになり、障壁が低くなりました」と村田助教。

また、画像や音声などのマルチモーダル情報を取り扱う情報学の要素技術との組み合わせも、ロボットの発展に貢献する可能性があるという。

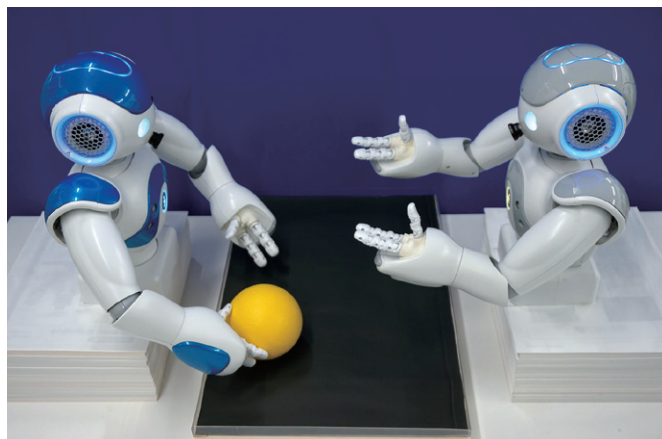


写真1 | ロボット同士のインタラクション。学習した二つの動きを、予測誤差最小化により自動的に切り替える様子が見られる(動画=https://youtu.be/sQ1u32tQOic)。

「例えば画像認識によって椅子を理解するだけに留まらず、身体をもつロボットが、身体を通じた体験を積み重ねることで、椅子は座るためのものという概念が生まれ、状況によっては、机のような形でも椅子として使えることを理解できるようになる。これを一つひとつ記述するのではなく、ロボットが身体を通じた経験で理解することが可能になれば、もう一段上の評価や発展をさせるためのプラットフォームとしてロボットを有効に使うことができるようになります」

現在、村田助教は研究の過程で、2台のロボットを使った予測誤差最小化によるコミュニケーションの実験を行っている(写真1)。ロボット同士が向かい合い、相手からボールが転がってきたらそれを返すという行動と、ボールが手元に止まったら、両方の腕でボールを左右に転がすという行動だけをロボットに学習させておく。最初はボールをお互いに転がしあっているが、摩擦などの影響で、手元でボールが止まってしまった場合、相手がボールを転がしてくるという予測に誤差が生じる。そこで、その誤差を解消するために、ロボットが左右にボールを転がすことで、誤差が小さくなり、行動が落ち着くことになる。ここでは、ロボット自らが誤差を判断し、学習させていない「切り替え」という行動によって、誤差を解消する動きが見られる。

しかし、現時点では、ロボットが「空気」を読むレベルまでには、かなりの道のりがあるのも確かだ。

では、「空気」を読むロボットとは、いったいどのようなものなのだろうか。

「究極のロボットとは、すべてのことを、人間に代わって行うことができるものかもしれません。でも、それは空気を読むロボットとは違うでしょう。ロボットができることであっても、実は人は自分でやりたいと思っているかもしれません。あるいは、リハビリ支援のロボットであれば、なんでも手厚くやるのではなく、人が能動的に取り組むように仕向ける必要もある。人の意図や気持ち、立場を理解して、判断することが未来のロボットには求められるのではないのでしょうか」

(取材・文=大河原克行 写真=佐藤祐介)

NEWS  
1

## 「SINET」東京-大阪間で400Gbpsにスピードアップ 世界最高水準の大容量回線を長距離区間で実用化

NIIは、学術情報ネットワーク「SINET5」の東京-大阪間に、世界最高水準の長距離400Gbps回線を構築し、12月9日から運用を開始しました。これは、現在運用しているSINET5が全都道府県を結んでいる100Gbps回線の4倍の通信容量となる大容量回線です。

この400Gbps回線は、大学・研究機関等が集中する関東エリアと関西エリア間でのデータ通信需要増が通信容量を圧迫している状況を解決するため、関東エリアと関西エリア間の通信容量の増強を目的に構築しました。これによって、大容量のデータ通信による回線占有などの懸念がなくなり安定した通信が確保されるだけでなく、大学間連携や大型研究プロジェクトなどのさらなるデータ通信増や新規の超大容量データ転送にも対応可能となります。



記者会見で「SINET」東京-大阪間で400Gbps化について説明する漆谷重雄副所長（左）と栗本崇准教授

NEWS  
2

## SINET5のVR体験に歓声 大学共同利用機関シンポジウム2019に出展

NIIなど全国の大学共同利用機関は10月20日、「大学共同利用機関シンポジウム2019～宇宙・物質・エネルギー・生命・情報・人間文化 その謎に挑む～」を日本科学未来館（東京都江東区）で開催し、最先端の研究を紹介するブース展示や、研究者が最新トピックなどを紹介する「研究者トーク」を行いました。

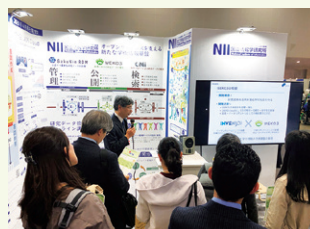
開会式では、大学共同利用機関協議会会長を務める喜連川優NII所長が開会のあいさつを行い、大学共同利用機関の役割や取り組みを紹介しました。

NIIブースでは、NIIが構築・運用する学術情報ネットワーク「SINET5」の100Gbpsの帯域を体験できるVRアクティビティを設置。100Mbpsの家庭用高速回線を「細い水道管」、その1000倍の帯域をもつSINET5を「広大な地下空間」に、そこを流れるデータ量を「水」になぞらえた迫力あるVR映像に、体験した来場者から驚きの声があがりました＝写真。



NEWS  
3

## 「管理」「公開」「検索」の 三つの研究データ基盤を紹介 「第21回図書館総合展」に出展



NIIは、11月12日から14日までパシフィコ横浜（神奈川県横浜市）で開催された「第21回図書館総合展」に出展しました。ブース展示では、オープンサイエンスを支える新たな学術情報基盤としてNII

が開発している「データ管理基盤（GakuNin RDM）」「データ公開基盤（WEKO3）」「データ検索基盤（CiNii Research）」のほか、2020年以降の目録所在情報システム（CAT2020）や次期JAIRO Cloudについて紹介しました＝写真。

期間中は連日、NIIオープンサイエンス基盤研究センター（RCOS）のスタッフらがブースに立ち、来場者からの質問に答えたり、プレゼンを行ったりしました。

また、「オープンサイエンスや研究データ管理」、「論文のオープンアクセス」、「これからの学術情報システム」をテーマにした三つのNIIフォーラムを開催。科学技術を取り巻く問題について、研究者や大学図書館職員らが熱い議論を交わしました。

NEWS  
4

## AIで「くずし字」を読み解く 日本文化とAIシンポジウム2019を開催

情報・システム研究機構 データサイエンス共同利用基盤施設（ROIS-DS）人文学オープンデータ共同利用センター、同機構国立情報学研究所、人間文化研究機構 国文学研究資料館は11月11日、一橋講堂（東京都千代田区）で「日本文化とAIシンポジウム2019～AIがくずし字を読む時代がやってきた～」を開催しました。

日本では、古典籍・古文書・古記録などの過去の資料（史料）が千年以上も大切に受け継がれており、数億点規模という、世界でも稀にみる大量の資料が現存しています。その多くが「くずし字」で書かれてい

ますが、現代のほとんどの日本人は「くずし字」で書かれた過去の資料を読めなくなっており、大量のくずし字をどう読み解くかが喫緊の課題となっています。そこで、3機関は協力して、AI（人工知能）を活用してくずし字を読み解く研究を行っています。

シンポジウムでは、AIに関する多数のコンペティションで世界的に注目を集めるKaggleが開催した「くずし字認識：千年に及ぶ日本の文字文化への扉を開く」の入賞者が登場し、開発したくずし字認識アルゴリズムについて解説しました。



また、情報・システム研究機構特任助教・国立情報学研究所特任研究員のカラーヌワット・タリン氏＝写真＝が開発した「くずし字」を自動で読み取って現代文字にする「KuroNet」のデモなども行い、参加者の注目を集めました。

## 有限と無限のせめぎあいとは？

蓮尾准教授が講義／市民講座「情報学最前線」第3回

国立情報学研究所は11月7日、市民講座「情報学最前線」の第3回を開催し、アーキテクチャ科学系 蓮尾 一郎准教授が、「理論計算機科学入門 有限と無限のあいだー数学的理論から、AI・自動運転ー」と題して講義しました＝写真。

計算機のプログラムや情報システムのふるまいを数学的に研究するのが理論計算機科学という学問分野です。計算機やプログラムは、無限に豊かなふるまいをする一方で、これらを実際につくったり解析したりするためには、そのサイズは有限でなければなりません。蓮尾准教授は、「理論計算機科学のポイントは、人間の手の届かない無限を、数学を使ってなんとか有限の記号列で表現することです」と説明し、この『有限と無限のせめぎあい』について、さ

まざまなソフトウェアシステムのモデル検査に応用されているオートマトン（計算の原理を解明するために考案された数学的モデルの一つ）を用いて解説しました。その上で、ソフトウェア製品の安全性に数学的証明を与えることは最大の品質保証であり、これからのAI時代には、形式手法（ソフトウェアの品質保証のための数学的手法）を拡張して、物理情報システムや機械学習システムに応用していくことに大きな可能性があることを話しました。

また、蓮尾准教授は自身が研究総括を務める「JST ERATO 蓮尾メタ数理システムデザインプロジェクト」という研究プロジェクトを紹介しました。このプロジェクトでは、特に自動運転システムを対象とする「工業製品の設計サポート」について、



その信頼性保証を支えるモデリング手法・形式手法・テスト手法、さらにこれらを含む実用的な Verification & Validation (V&V) 技術の研究開発に取り組んでいます。蓮尾准教授は、「AIを安全な論理的レイヤーで覆ってあげることで安全性を保証し、安全で説明可能な自動運転システムをつくるのが目標です」と研究の展望を語りました。

## 「ロボット」「機械学習」をテーマに授業

高校や高専で出張授業を開催

国立情報学研究所は11月21日、2019年度第1回出張授業を東京都立戸山高等学校で開催しました。この授業は、将来を担う高校生・高専生を対象に、研究所の研究成果を紹介し、生徒・学生に情報学を身近に感じ、関心をもってもらうことが目的です。

第1回は、「ロボットとの自然な対話を目指して～社会的身体性知能の発達～」と題して、情報学プリンシプル系 稲邑 哲也准教授が1年生36名を対象に授業を行いました。稲邑准教授は、ロボットの知能をどのように育てるかという研究や、ロボットの競技会「ロボカップ」の取り組みなどについて、AIの歴史や実用的な例を交えてわかりやすく説明しました。講義終了後、生徒たちは、稲邑准教授が開発したVRシ

ステムを体験。VRゴーグルを着用してさまざまな体験をするたびに、生徒から大きな歓声が沸き上がりました。

第2回は、12月6日に久留米工業高等専門学校で開催。情報学プリンシプル研究系 杉山 磨人准教授が、専攻科1年生28名に対し、「機械学習のしくみ」をテーマに授業を行いました。杉山准教授は、機械学習やデータマイニングといった近年注目されている人工知能の要素技術について、自分の研究を交えながら解説しました。機械学習とは、経験から学習することで自動的に賢くなる計算機プログラムをつくるのが目的であり、自動運転や音声認識、創薬、不良品検知、ゲームなど多岐にわたる分野で応用されていることを紹介しました。



[上] 東京都立戸山高等学校で講義する稲邑准教授  
[下] 久留米高専で行われた杉山准教授による出張授業の様子

## 「これいいね！」Facebook、Twitterアカウントの最も注目を集めた記事(2019年9月～2019年11月)



国立情報学研究所 NII (公式) Facebook  
[www.facebook.com/jouhouken/](http://www.facebook.com/jouhouken/)

NIIは、第31回国際情報オリンピックでの日本代表選手の活躍をたえるプロジェクトを、NIIが入る学術総合センター建物の外壁で上映しています。今年の大会は、8月4日から11日まで、アゼルバイジャンで開催され、日本代表の高校生4人は金メダル1個、銀メダル3個を獲得しました。(2019/9/10)



国立情報学研究所 NII (公式) Twitter  
@jouhouken

[広報誌 NII Today No.85]  
「フェイクに挑む／不正な情報を見抜くために」を公開しました。(2019/10/20)



つぶやくビット君 Twitter  
@NII\_Bit

第67回電気科学技術奨励賞 贈呈式にきたんだびっと。加藤 文彦特任研究員と武田 英明教授、受賞おめでとうだびっと!!!  
(2019/11/20)

\*記事の本文は一部 編集・省略しています。

# 研ぎ究めを遊ぶ

浅田 稔

Minoru Asada

大阪大学先導的学際研究機構  
共生知能システム研究センター  
特任教授

研究とは、自身を「研ぎ」、基本的課題を「究める」過程を楽しむことであると考えている。そして、多くの研究者との出会いが、研究を究める推進力になってきた。コンピュータビジョンの動画像研究から始まり、強化学習のロボットへの応用を経て「ロボカップ」の発想に至り、認知発達ロボティクスの提唱と推進、そして、その延長上にある構成論的人間学の考えに至る経緯の中で、多くの人との出会いが、これまでの研究の核である「人間とは何か」に迫るための課題を生み、研究を進展させてきた。

その一つに、今回の特集の巻頭を飾るカーネギーメロン大学の金出武雄先生との出会いがある。すでにご存知のように、金出先生は令和元年度文化功労者に選ばれており、日本ロボット学会会長として、学会誌にお祝いの言葉を寄せたところだ。なにしろ金出先生は、私の研究人生の中で、恩師の辻三郎 大阪大学名誉教授、卒論時からお世話になった生物工学の鈴木良次 大阪大学名誉教授に次いで、三番目に尊敬する研究者なのである。特に、金出先生の座右の銘ともいべき「素人発想、玄人実行！」という考え方にはたいへん共感を覚える。

今年3月の退職記念最終講義でも紹介したが、私の座右の銘の一つに「Out of sight, out of mind」がある。和訳は「去る者は日々に疎し」だが、「見えないものは存在しない」と訳すこともできる。実は1歳以下

の新生児は、見えないものは存在しないと知覚する。ワーキングメモリが未熟だからだ。この言葉は、私の卒論研究であるゴンズイという魚の群れの追跡システムにおいても一つのヒントになった。というのも、魚の重なりによる隠れを発見するには予測と注意が必要だからだ。研究の最初にこのような重要な課題に接したことはラッキーだった。ちなみに、我々大人も、都合の悪いことは、意識的にも無意識的にも無視（Out of sight）しがちで、新生児のことを馬鹿にできない。

二つ目の座右の銘は、「すべてのサクセスはハンディキャップから始まる」だ。これは、孔雀の羽や尾長鶏の尾などの生物のハンディキャップ理論になぞらえた言葉だが、私は「順風満帆が一番危ない！ 危機意識が問題の本質にたどり着く近道」だと考えている。そのことを実感した経験がある。ロボカップの最初の論文を大きな国際会議に投稿したものの、落とされて憤慨し、小さなワークショップや研究会で発表し、大きな反響を得たことが自信につながり、翌年、大きな国際会議で一字一句違えず投稿した論文がベスト10（最優秀論文候補で1%！）に選ばれたのである。憤慨したことが効いたわけだ。

座右の銘は他にもあるが、最近ではロボット学会の新たなホームページ「ロボ學（robogaku.jp）」で会長ブログ「みのつぶ短信」の中でも触れている。そちらもご覧ください。

## 今後の予定

- 1月21日 | 市民講座「情報学最前線」第4回「トポロジーで光を操る—光はボールとドーナツを見分けるか—」(講師:岩本 敏 東京大学先端科学技術研究センター教授/新学術領域「ハイブリッド量子科学」研究メンバー)  
=詳細、お申し込みは <https://www.nii.ac.jp/event/shimin/>
- 1月下旬~2月上旬 | 第3回SPARC Japan セミナー2019 =詳細は、<https://www.nii.ac.jp/sparc/event/>
- 3月13日 | 国立情報学研究所トップエスイーセミナー「Pytorchを利用した深層学習の実践」  
=詳細は、<https://www.topse.jp/ja/seminar.html>

## 表紙の言葉

教室のロボットたちが学習しているのは、ディスプレイに映る遠隔地で行われている料理の手順です。人を思いやることのできる“賢いロボット”をつくるには、人間の動きを真似たり、ロボット同士で学び合ったりして、ロボット自身が判断して動ける、自律的な存在となる必要があるのです。

情報から知を紡ぎだす。

国立情報学研究所ニュース [NII Today] 第86号 令和元年12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  
発行人 | 喜連川 優 編集長 | 佐藤 一郎  
表紙画 | 城谷俊也 編集 | 田井中麻都佳  
制作 | 株式会社マツダオフィス / サイテック・コミュニケーションズ

本誌についてのお問い合わせ | 総務部企画課 広報チーム

TEL | 03-4212-2028 FAX | 03-4212-2150 e-mail | kouhou@nii.ac.jp

「NII Today」で  
検索！



情報犬ビット  
(NII キャラクター)

<https://www.nii.ac.jp/about/publication/today/>