

中部圏は自動車産業の集積地であり、自動運転技術についての実証研究も盛んに行われるなど技術進歩が著しいエリアです。また、自動運転技術はすそ野が広く、自動車以外の分野のモノづくりへの応用可能性も秘めた極めて重要な技術といえます。このような認識のもと、2026年3月11日に当財団と一般社団法人中部経済連合会と共催でJRゲートタワーカンファレンスにおいて第26回中部社研時事フォーラム「自動運転が拓くモノづくりの未来」を開催しました。

本稿は、このフォーラムでのご講演「自動運転の民主化－基礎研究、オープンソース、商業化－」を基に、講師である名古屋大学総長特別補佐教授（講演当時）の武田一哉氏にその概要を執筆いただいたものです。（事務局）

## 自動運転の民主化

### －基礎研究・オープンソース・商業化をつなぐ視点

東海国立大学機構 機構アドバイザー

名古屋大学 審議役・名誉教授 武田 一哉

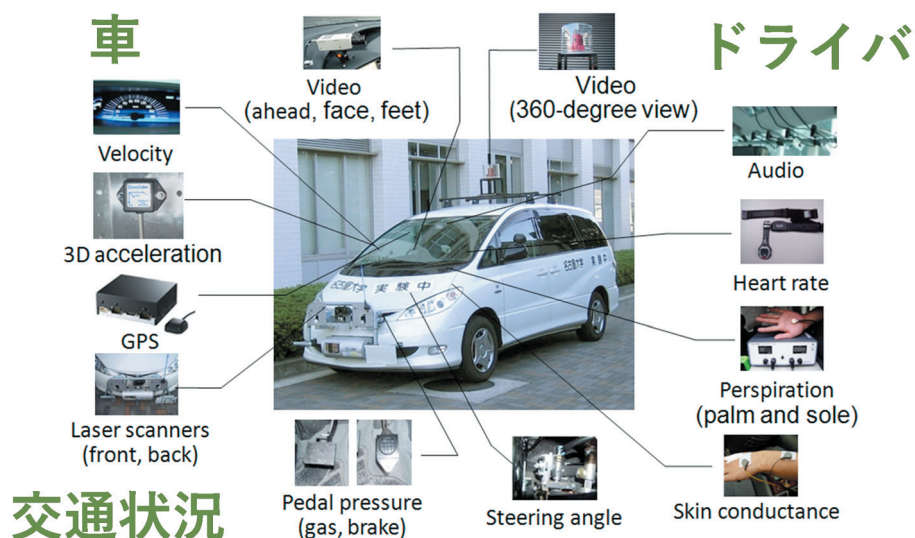


#### 1. 人間の行動をデータで理解するという出発点

「人間の行動はデータで理解できるか」この問いの背後には、従来の人工知能研究がしばしば直面してきた「知能をあらかじめ規則として書き下せるのか、それとも観測されたデータから学ばせるべきなのか」という問題があります。筆者にとって自動運転は、その問いを現実世界の中で検証できる格好の対象でした。なぜなら、運転には知覚、

判断、予測、操作が連続的に含まれ、その全体が秒単位で観測できるからです。

筆者はもともと、音声や映像を対象とするコンピュータサイエンスの研究に長く携わってきました。そうした研究を続ける中で、2000年頃から強く意識するようになったのが、「人間の行動は、データによってどこまで理解できるのか」という問いです。筆者自身はこの研究領域を「行動信号処理」と呼んできました。これは、信号処理理論、生成モデル、機械学習に立脚し、大規模データか



人間の運転を多面的な信号として記述することは、まずさまざまなセンサを使って実際の自動車の運行を記録することから始まります。

図1 さまざまなセンサを搭載した研究開発用データ計測車

ら人間の行動のような複雑で知的な現象を理解しようとする考え方です。本稿では、この発想を基礎に、自動運転をどのように捉えてきたかを振り返りながら、その先にある「自動運転の民主化」について述べます。

人間の行動を理論だけで完全に説明することは容易ではありません。しかし、環境はセンサによってデータとして取得でき、人間の行動もまたセンサデータとして計測できます。そうであれば、人間をひとつの「箱」とみなし、その入力と出力をデータとして捉えることで、複雑な行動の理解に近づけるのではないかと。この素朴な発想が、筆者の自動運転研究の出発点でした。この見方は、環境と行動の関係を観察可能なものとして捉えた行動科学の考え方とも通じています。

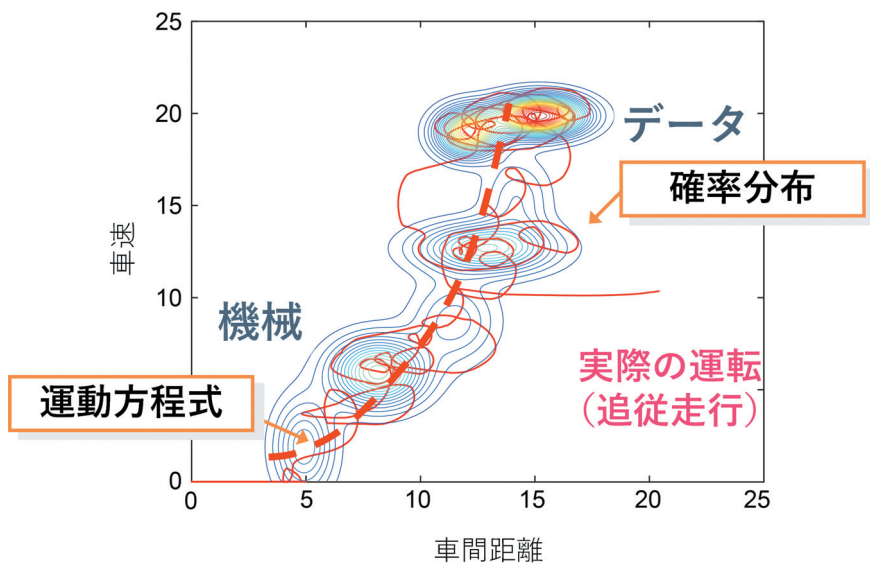
筆者が重視してきたのは、運転を単なる操作の連続としてではなく、環境の理解、他者の意図の推定、将来の危険の予測、そしてその時々々の目的に応じた選択の連鎖として捉える視点です。たとえば交差点に進入する場面では、信号の状態だけでなく、歩行者の迷い、対向車の速度、路面状況、さらには後続車への配慮までが同時に作用します。このような複雑な判断の重なりを、観測可能なデータとしてどこまで表現できるのかが、長年の研究課題でした。

## 2. 運転を対象にした総合的な計測

このような計測は、単に大量のデータを集めることを目的としたものではありません。どの情報が運転判断に効いているのか、どの瞬間に認知の負荷が高まるのか、また、同じ道路環境でも人によって操作がどのように異なるのかを、統合的に読み解くための基盤でした。人間の運転を「結果としての操作」だけでなく、「操作に至る過程」を含めて扱うことが重要だったのです。

こうした取り組みは、後年の自動運転研究にとって重要な意味を持ちました。近年では大規模データの利用が当然視されていますが、研究の初期段階では、どの信号をどの時間分解能で取得し、どのように同期させるか自体が大きな挑戦でした。実際の道路で取得された高品質なマルチモーダルデータは、人間の運転理解と自動運転技術の橋渡しを行う、いわば共通言語の役割を果たしてきたのです。

その具体的な題材として筆者が選んだのが運転です。運転は、外界を認識し、状況を判断し、操作として出力するという、人間の知的行動が比較的明瞭に表れる対象だからです。そこで2003年頃、名古屋大学でセンサ・カーを構築し、車両の状態、交通環境、ドライバの状態を同時に取得する総合



車間距離と車速の関係はデータ分布の観点から説明できます。

図2 データ分布による運転の解析

的な計測に取り組みました。速度、加速度、GPS、レーザスキャナ、ペダル操作、操舵角だけでなく、ドライバの映像、音声、心拍、発汗なども含めて、運転に関わるマルチモーダルな信号を集めました。自動運転の研究はしばしば制御や認識の問題として語られますが、筆者にとってはまず、人間の運転を多面的な信号として記述するところから始まっています。

当初は、運転を物理モデルや運動方程式で説明できないかという発想も当然ありました。たとえば車間距離と速度の関係を単純なモデルで表せば、理論的に運転行動を予測できるように思えます。しかし、実際の人間の運転はそれほど単純ではありません。現実のデータを重ねてみると、運転は一本の滑らかな線で記述されるのではなく、状況ごとに異なる密度やゆらぎをもった複雑な分布として現れます。そこから見えてきたのは、「人間の行動は方程式で一意に表すより、データの分布として捉える方が自然ではないか」ということでした。つまり、入力と出力の関係を固定的な法則としてではなく、確率分布や条件付き確率として記述する発想です。

### 3. 方程式ではなく分布として運転を捉える

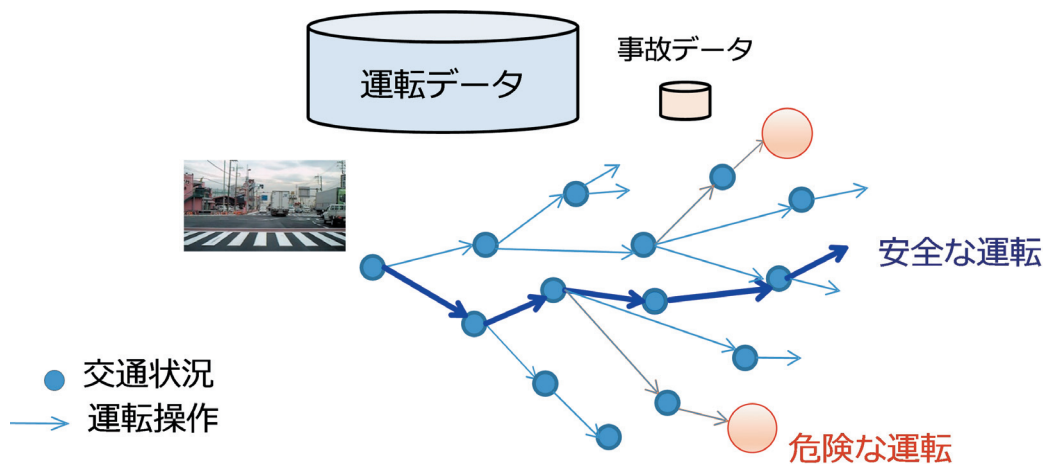
ここで大切なのは、正解が一つに定まらないと

いう点です。現実の交通では、安全で円滑な運転の仕方は一通りではなく、複数の妥当な行動が存在します。したがって、自動運転の知能を考える場合にも、唯一の操作系列を求めるより、人や状況に応じて妥当な行動の集合を扱える表現の方が、現実に適しています。

この考え方に立つと、運転は「もっともらしい行動」をデータから推定する問題になります。実際、同じ条件下で運転しても、前車との距離を丁寧に保つドライバもいれば、より自己流に近い運転をする人もいます。人間の運転をデータの組み合わせとして理解することで、その違いを再現し、将来の行動を予測することが可能になります。追従走行や車線変更の例を通じて、運転行動を確率的に表現し、個人差や状況依存性を含めてモデル化してきた研究は、現在の学習型自動運転やEnd-to-End型自動運転へつながる、ひとつの基礎になっていると考えています。

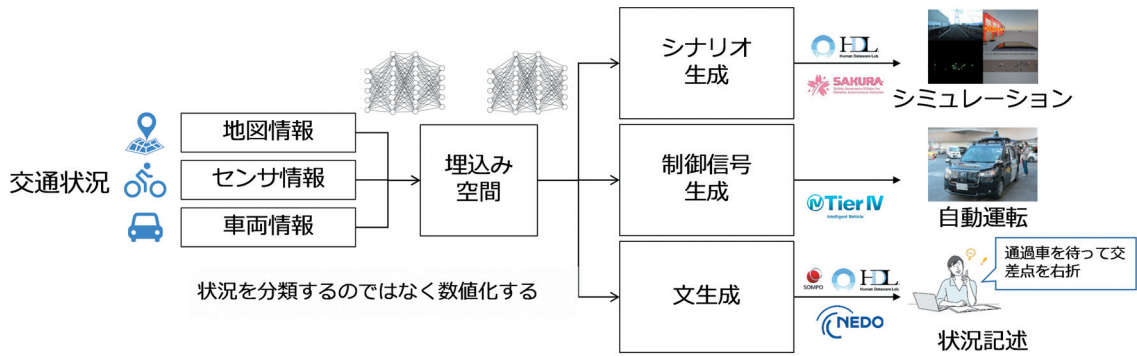
この見方は、安全性の議論にもつながります。人間の運転は、単に平均的な振る舞いをなぞればよいわけではなく、危険が高まりそうな兆候を早めに捉え、余裕を持って回避することが求められます。したがって、分布を扱うということは、典型例だけでなく、ばらつきや外れ値、まれだが重要な場面をどう扱うかを考えることでもあります。ここに、確率的なモデル化の意義があります。

もっとも、この方法には大きな課題もありまし



実際の交通では非常に多様な状況が現れるため、すべての状況を分類するのは困難

図3 交通状況の離散的な分類における課題



観測データから埋め込み空間表現を獲得し、その空間から運転に関連するさまざまな情報表現を生成することで、運転行動をモデル化します。

図4 埋め込み空間表現を用いた運転行動のモデル化

た。特定の条件ではうまく学習できても、交通状況全体を考えると、どのような状態をいくつ想定すればよいのかがすぐに問題になります。筆者自身、2010年代半ばの時点では、交通状況をいくつかの離散的な状態に切り分け、それぞれについて入力と出力の関係を学習すれば自動運転に近づけるのではないかと考えていました。しかし、「状態はいくつ必要なのか」という問いに対して、十分な答えを持つことができませんでした。現実の交通はあまりにも多様で、あらかじめ分類し尽くすことには限界があるからです。

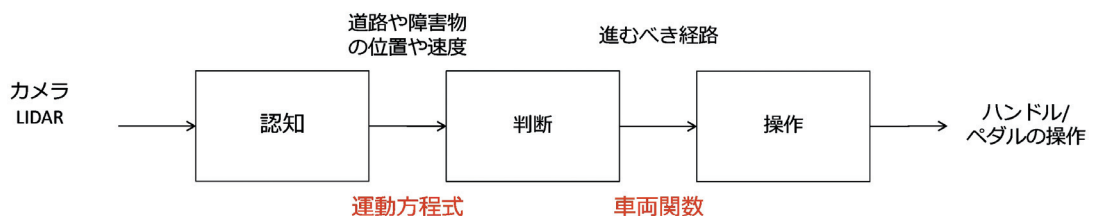
#### 4. 離散分類から埋め込み空間へ

この壁を越える鍵として見えてきたのが、深層学習における埋め込み空間の考え方です。交通状

況を離散的に分類するのではなく、連続的な数値空間（埋め込み空間）の中で表現するのは。この発想の利点は、交通状況が似ている場面が空間上でも近く表現されることにあります。たとえば、交差点進入時の注意深い減速や、前方車両のふるまいを見ながらの追従といった場面は、見かけは異なっても判断構造に共通性があります。埋め込み表現を用いれば、そのような共通性を人手のルールに頼り過ぎずに扱えるようになります。

これはまさに、自動運転研究における大きな転換点でした。現実世界を細かなラベルに分けて理解しようとするのではなく、豊富なデータから状況を連続空間の中に写像し、その上で認知や判断や操作を統合的に扱う。この発想によって、従来は切り分けが難しかった複雑な交通文脈を、より柔軟に扱えるようになってきました。

#### •モジュール型（工程間の誤差が累積）



#### •End-to-end 型（理解は困難だが学習による全体最適化が可能）

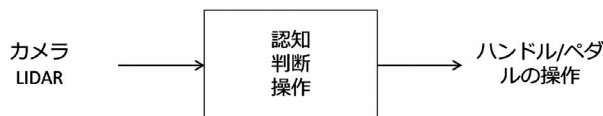


図5 モジュール型とEnd-to-End型の違い

埋め込み空間という発想は、研究開発の進め方そのものも変えました。従来は、研究者が交通状況を定義し、それぞれに応じた特徴量やルールを設計する必要がありました。しかし、表現学習を前提とすると、まず大量のデータから有効な内部表現を獲得し、その上に個別の判断や予測の層を重ねることができます。これは、複雑さをあらかじめ分解して理解する方法から、複雑さを保ったまま学習させる方法への転換でもあります。

## 5. End-to-End型自動運転の可能性

この延長線上にあるのが、現在広く注目されているEnd-to-End型の自動運転です。従来のモジュール型自動運転では、認知、判断、操作が別々の工程として設計されます。各工程は理解しやすく、工学的にも扱いやすい反面、工程間で誤差が蓄積しやすく、全体最適化が難しいという問題がありました。これに対しEnd-to-End型では、カメラやLiDARなどの入力から、進むべき経路や操作までを一体として学習します。内部の理解は容易ではありませんが、学習によって全体最適化を図れる点に大きな可能性があります。個々のモジュールの最適化が必ずしも全体の最適化につながらないという従来の問題に対して、根本的に異なるアプローチが開かれたといえます。

また、End-to-End型で学習されたいわば「交通基盤モデル」の意義は、高性能な推論器であることだけにはとどまりません。交通規則、地図情報、運行履歴、ヒヤリハット事例、さらには利用者の要請といった異種の情報を、ひとつの知識基盤として接続できる可能性があります。これは、自動運転を単なる車両制御技術から、移動サービス全体を支える知識基盤へと拡張する視点でもあります。

さらに近年は、大規模言語モデルやマルチモーダル基盤モデルの発展によって、学習型自動運転の可能性がますます広がっています。自然言語とセンサ情報を統合しながら自動運転に必要な情報を扱う枠組みも現れています。人間の運転には、

### ロボタクシー

- 大都市
- 同一車両
- 同一サービス

### 自動運転社会

- 多様な地域
- 多様な車両
- 多様な需要

規模のエコノミー

多様な移動課題の解決

## 鍵：End-to-Endとオープンソース

図6 自動運転の民主化

「前方に自転車がいる」、「ここでは慎重に進むべきだ」といった言語的・文脈的な知識が深く関わっています。交通ルールそのものも自然言語で記述されています。そう考えると、膨大な言語資源を取り込み、知識を段階的に学習できる基盤モデルは、自動運転にとっても強力な道具になり得ます。学習型自動運転は、単に運転操作を自動化する技術ではなく、知識と状況理解を接続する技術へと進みつつあります。

もっとも、将来の自動運転がすべて単一のEnd-to-End型に置き換わるとは限りません。むしろ、データ駆動型の柔軟性と、既存の工学的知見や安全設計をどのように組み合わせるかが重要になるでしょう。センサ融合、地図、ルールベースの検証、シミュレーションによる事前評価などを適切に組み合わせたハイブリッドな設計は、今後も有力な方向性だと考えられます。

## 6. ロボタクシーを超えて広がる自動運転社会

一口に「自動運転サービス」と言っても、現実には、地域ごとに道路環境も、利用者層も、求められるサービス水準も異なります。過疎地の生活交通、観光地の周遊、工場や空港の構内移動、ラストマイル物流など、自動運転が価値を発揮する場面は多岐にわたります。その意味で、自動運転の将来を考えるときには、少数の成功事例を横展開するだけでなく、多様な現場で成立する条件を整えることが重要です。

この点は、事業としての成立条件を考えるうえでも重要です。大都市のロボタクシーは、多数の利用者と高頻度運行を前提に投資回収を図るモデルですが、地方部や産業用途では、必ずしも同じ前提が成り立ちません。むしろ、限定領域で確実に役立つこと、既存の公共交通や物流と補完し合えること、運用コストを抑えながら継続できることが重視されます。自動運転の価値は、利用者数の大きさだけで測られるものではないのです。

ただし、ここで重要なのは、自動運転の進歩を単に「より高度なAIができた」という話で終わらせないことです。筆者がここで述べたい「自動運転の民主化」とは、自動運転を一部の巨大企業や一部の都市だけのものにしない、という考え方はです。ロボタクシーは、大都市、同一車両、同一サービスを前提とした「規模のエコノミー」の世界です。これに対して、自動運転社会とは、多様な地域、多様な車両、多様な需要に対応し、多様な移動課題を解決する世界です。地方部の移動、高齢者の足、物流、産業用途、小型モビリティなど、社会が必要とする移動は本来きわめて多様です。自動運転の価値を本当に社会に広げるには、この多様性に応えられる技術と仕組みが必要にな

ります。

## 7. オープンソースが支える実装基盤

オープンソースの価値は、技術の透明性や再利用性にあります。研究者、開発者、事業者が同じ基盤を参照しながら改良を重ねることで、個別の閉じた開発では得られない速度で知見が共有されます。標準化や人材育成の面でも、共通基盤の存在は大きく、結果として市場参入の敷居を下げることに繋がります。

そのための重要な基盤が、オープンソースです。自動運転ソフトウェア、移動機械、移動サービスのあいだをつなぐものとしてオープンソースを位置づけると、自動運転の見通しは大きく変わります。名古屋大学で開発された「Autoware」のような自動運転のオープンソースソフトウェアがあれば、限られた企業だけが自動運転技術を独占するのではなく、多様な主体がその上に独自のシステムやサービスを構築できます。「民主化」という言葉には、技術開発の裾野を広げることと、社会における適用可能性を広げることの、両方の意味が込められています。



移動サービス

**Autoware**  
オープンソースソフトウェア



自動運転ソフトウェア



移動機械

図7 多様な移動機械と多様な移動サービスを結びつけるためのオープンソース自動運転ソフトウェア

さらに、オープンソースは技術基盤であると同時に、コミュニティ形成の仕組みでもあります。共通の土台の上で、大学、スタートアップ、大企業、自治体がそれぞれの立場から貢献し、改善点を共有できれば、技術の成熟速度は大きく高まります。閉じた製品開発だけでは見えにくい問題も、異なる現場からのフィードバックが集まることで、より早く顕在化し、解決につながります。

このオープンソースの意義は、単にソフトウェアを無償公開するというものではありません。基盤部分を共有化し、その上で企業ごとの製品や顧客との共同開発を積み上げていく構図が重要です。つまり、基盤部分を共有し、その上で多様な現場や用途に合わせた実装を展開していくという発想です。これは、自動運転を大都市のロボタクシーだけに閉じ込めず、日本各地の地域課題や産業課題に応じて展開していくうえで非常に相性がよい考え方です。全国各地での実証実験や多様な車両への適用が進んできたことは、この方向性の有効性を示しています。

## 8. 社会実装に必要な制度と責任の整理

とりわけ学習型システムでは、「なぜその判断に至ったのか」をどこまで説明可能にするかが重要になります。安全認証、事故後の検証、保険、利用者への説明責任などを考えると、性能だけでなく、評価方法や運用条件を含めた制度的な設計が不可欠です。これは技術開発の外側の問題ではなく、技術そのものの設計要件に組み込まれるべき課題です。

もっとも、自動運転の社会実装においては、技術さえあればよいわけではありません。学習型自動運転には、なお多くの論点が残されています。たとえばEnd-to-End型では、既存の工業的安全標準とどう整合を取るかが大きな課題です。安全、進捗、快適性、交通ルール遵守といった複数の規範を、どのように学習の枠組みの中に埋め込むのか。あるいは、自動運転を使ってサービスを提供

する場合に、ソフトウェア提供者、車両メーカー、運行事業者、サービス事業者のあいだで責任をどう分担するのか。単一の企業がすべてを担う形だけでなく、バリューチェーンが分かれるケースが今後増えることも想定されます。技術と制度、技術と責任の接続は、自動運転の民主化を考えるうえで避けて通れません。

また、社会実装を進めるには、運転性能そのものとは別に、運用設計の巧拙が大きく効いてきます。どの区間を対象とするのか、遠隔監視をどの程度置くのか、緊急時の介入手順をどうするのか、利用者への案内をどう設計するのかといった点が、サービスの信頼性を左右します。自動運転は車両単体の技術ではなく、運行を含むシステムとして評価されるべきものです。

日本の特徴は、慎重さの裏返しとして、現場とのすり合わせを重視している点にもあります。地域交通事業者、自治体、道路管理者、住民など、多くの関係者との調整を通じて実装を進めるため、派手さはなくとも持続的な運用につながりやすい面があります。自動運転の普及は、単なる技術導入ではなく、地域社会の運営に関わる取り組みでもあります。

こうした制度設計の違いは、米国・中国・日本の比較によっても見えてきます。米国は「まず走らせて、問題があれば事後是正する」傾向が強く、中国は、社会実装だけでなく量産やデータ確保まで見据えて、戦略的に許認可を進めています。これに対して日本は、車両適合と運行許可を切り分け、遠隔監視や事故対応の責任を制度上明確化しながら、現実的に自動運転社会へ向かおうとしています。どの方式が単純に優れているというよりも、それぞれの国が、自国の産業構造や社会制度に即して自動運転を位置づけていると見るべきでしょう。自動運転の普及は技術競争であると同時に、制度設計と社会受容の競争でもあります。

日本にとって重要なのは、こうした慎重な制度設計を、単なる制約としてではなく、信頼性の高い実装モデルとして磨き上げることです。高齢化や地方交通の縮小といった日本固有の課題は、自

動運転の必要性をむしろ明確にしています。限られた条件の中でも着実に運用できる仕組みを築ければ、それは他国に対しても十分に示唆を持つモデルとなり得ます。

## 9. 多様な移動課題を解くために

今後の焦点は、自動運転を「特別な先端技術」から「社会が選択できる実用的な手段」へと移していけるかどうかにあります。多様な主体が参加できる技術基盤を整え、地域や用途に応じて組み合わせ可能な形で提供していくことができれば、自動運転はより広い社会的価値を持つようになります。

以上のように、自動運転をめぐる論点は、基礎研究、AI、オープンソース、事業化、制度設計へと広がっています。しかし、最後に改めて強調したいのは、自動運転社会の本質は、ロボタクシーを大量に展開することだけにはない、という点で

す。本来、自動運転が解くべきなのは、社会のなかに散在している多様な移動課題です。そのためには、さまざまな地域、車両、サービスに適應できる技術が必要であり、その鍵としてEnd-to-End型の学習とオープンソースが重要な役割を果たします。まだ解くべき技術課題は多く残されています。しかし、だからこそ、自動運転は研究者にとっても、産業界にとっても、社会にとっても、きわめて刺激的な領域であり続けています。「自動運転の民主化」とは、その可能性をより広い社会へ開いていくための視点にはかなりません。

その中で大学の役割も小さくありません。大学は、すぐに製品化される技術だけでなく、その背景にある原理や表現、評価方法、人材育成を担うことができます。また、産学官の異なる立場をつなぎ、長期的な視点から技術の公共性を考える場にもなり得ます。自動運転の民主化という視点は、技術を社会へ開いていくうえで、大学が果たすべき役割を考えるうえでも示唆的です。

## 参考文献

- Miyajima, Chiyomi; Nishiwaki, Yoshihiro; Ozawa, Koji; Wakita, Toshihiro; Itou, Katsunobu; Takeda, Kazuya; Itakura, Fumitada; “Driver modeling based on driving behavior and its evaluation in driver identification,” *Proceedings of the IEEE* 95(2), 427-437 (2007)
- Takeda, Kazuya; Hansen, John HL; Boyraz, Pınar; Malta, Lucas; Miyajima, Chiyomi; Abut, Hüseyin; “International large-scale vehicle corpora for research on driver behavior on the road,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 12(4), 1609-1623, (2011)
- Miyajima, Chiyomi; Takeda, Kazuya; “Driver-behavior modeling using on-road driving data: A new application for behavior signal processing,” *IEEE Signal Processing Magazine*, 33(6), 14-21 (2016)
- Kato, Shinpei; Takeuchi, Eijiro; Ishiguro, Yoshio; Ninomiya, Yoshiki; Takeda, Kazuya; Hamada, Tsuyoshi; “An open approach to autonomous vehicles,” *IEEE Micro*, 35(6), 60-68 (2015)
- Karlsson, Robin; Carballo, Alexander; Fujii, Keisuke; Ohtani, Kento; Takeda, Kazuya; “Predictive world models from real-world partial observations,” *Proc. of 2023 IEEE International Conference on Mobility, Operations, Services and Technologies (MOST)*, 152-166 (2023)