モビリティイノベーションシリーズ ⑤

自 動 運 転

二宮 芳樹・武田 一哉
編著 編

コロナ社

モビリティイノベーションシリーズ
編集委員会

編集委員長

森川　高行（名古屋大学）

編集副委員長

鈴木　達也（名古屋大学）

編　集　委　員

1巻：森川　高行（名古屋大学），　山本　俊行（名古屋大学）
2巻：青木　宏文（名古屋大学），　赤松　幹之（産業技術総合研究所）
　　上出　寛子（名古屋大学）
3巻：河口　信夫（名古屋大学），　高田　広章（名古屋大学）
　　佐藤　健哉（同志社大学）
4巻：鈴木　達也（名古屋大学），　稲垣　伸吉（南山大学）
5巻：二宮　芳樹（名古屋大学），　武田　一哉（名古屋大学）

（2020年4月現在）

シリーズ構成

1巻：「モビリティサービス」　2巻：「高齢社会における人と自動車」
3巻：「つながるクルマ」　4巻：「車両の電動化とスマートグリッド」
5巻：「自動運転」

5巻編者・執筆者一覧（所属，執筆担当箇所）

編著者：二宮（にのみや）　芳樹（よしき）（名古屋大学，1，2章）
編　　者：武田（たけだ）　一哉（かずや）（名古屋大学）

執筆者

目黒（めぐろ）　淳一（じゅんいち）（名城大学，3.1，3.2，3.5，3.6節）
竹内栄二朗（たけうちえいじろう）（株式会社ティアフォー，名古屋大学，3.3，3.4節）
村瀬（むらせ）　洋（ひろし）（名古屋大学，4.1節）
出口（でぐち）　大輔（だいすけ）（名古屋大学，4.2節）
新村（しんむら）　文郷（ふみと）（名古屋大学，4.3節）
平山（ひらやま）　高嗣（たかつぐ）（名古屋大学，4.3節）
川西（かわにし）　康友（やすとも）（名古屋大学，4.4節）
久徳（きゅうとく）　遙矢（はるや）（豊田工業大学，4.5節）
赤木（あかぎ）　康宏（やすひろ）（名古屋大学，5章）
奥田（おくだ）　裕之（ひろゆき）（名古屋大学，6章）
萩原（はぎわら）　亨（とおる）（北海道大学，7章）
安積（あづみ）　卓也（たくや）（埼玉大学，8章）
加藤（かとう）　真平（しんぺい）（東京大学，8章）
清水（しみず）　綾子（あやこ）（石原総合法律事務所，9.1，9.2節）
中川（なかがわ）　由賀（ゆか）（中京大学，中川法律経営事務所，名古屋大学，9.3節）
石黒（いしぐろ）　祥生（よしお）（名古屋大学，10章）
野辺（のべ）　継男（つぐお）（インテル株式会社，11章）

（2020年11月現在）

刊行のことば

人は新たな機会を得るために移動する。新たな食糧や繁殖相手を探すような動物的本能による移動から始まり，交易によって富を得たり，人と会って情報を交換したり，異なる文化や風土を経験したりと，人間社会が豊かになるほど，移動の量も多様性も増してきた。しかし，移動にはリスクが伴う。現在でも自動車事故死者数は世界で年間 130 万人もいるが，古代，中世，近世における移動に伴うリスクは想像を絶するものであったであろう。自分の意志による移動を英語で travel というが，これはフランス語の travailler（働く）から転じており，その語源は中世ラテン語の trepaliare（3 本の杭に縛り付けて拷問する）にさかのぼる。昔は，それほど働くことと旅することは苦難の連続であったのであろう。裏返していえば，そのようなリスクを取ってまでも，移動ということに価値を見出していたのである。

大きな便益をもたらす一方，大きな苦難を伴う移動の方法にはさまざまな工夫がなされてきた。ずっと徒歩に頼ってきた古代でも，帆を張った舟や家畜化した動物の利用という手段を得て，長距離の移動や荷物を運ぶ移動は格段に便利になった。しかし，何といっても最大の移動イノベーションは，産業革命期に発明された原動機の利用である。蒸気鉄道，蒸気船，蒸気自動車，そして 19 世紀末にはガソリンエンジンを積んだ自動車が誕生した。そして，20 世紀初頭に米国でガソリン自動車が大量生産されるようになって，一般市民が格段に便利で自由なモビリティをもたらす自家用車を得たのである。自動車の普及により，ライフスタイルも街も大きく変化した。物流もトラック利用が大半になり，複雑なサプライチェーンを可能にして，経済は大きく発展した。ただ，同時に交通事故，渋滞，環境破壊という負の側面も顕在化してきた。

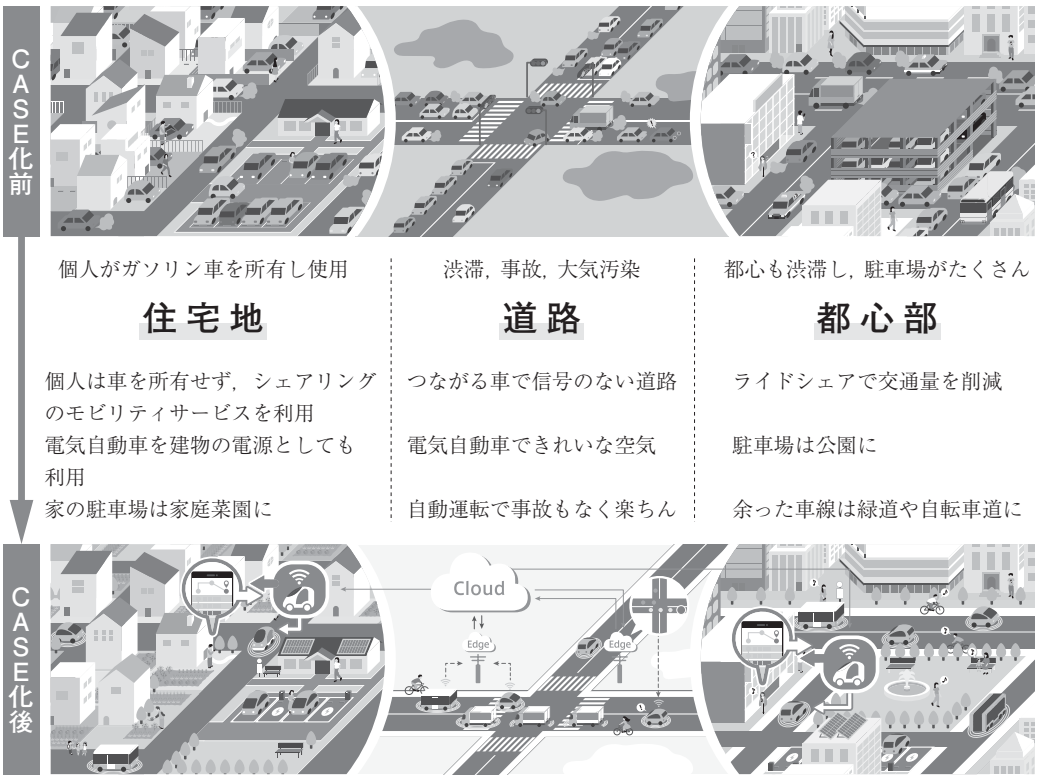
いつでもどこにでも，簡単な操作で運転して行ける自動車の魅力には抗しがたい。ただし，免許を取ったとはいえ素人の運転手が，車線，信号，標識という物理的拘束力のない空間とルールの中を相当な速度で走るからには，必ずや事故は起きる。そのために，余裕を持った車線幅と車間距離が必要で，走行時には 1 台につき 100 平方メートル近い面積を占有する。このため，人が集まる，つまり車が集まるところではどうしても渋滞が起きる。自動車の平均稼働時間は 5 % 程度であるが，残りの時間に駐車しておくスペースもいる。ガソリンや軽油は石油から作られ，やがては枯渇する資源であるし，その燃焼後には必ず二酸化炭素が発生する。世界の石油消費の約半分が自動車燃料に使われ，二酸化炭素排出量の約 15 % が自動車起源である。

このような自動車の負の側面を大きく削減し，その利便性をも増すと期待される道路交通革命がCASE化である。CはConnected（インターネットなどへの常時接続化），AはAutonomous（またはAutomated，自動運転化），SはServicized（またはShare & Service，個人保有ではなく共有によるサービス化），EはElectric（パワートレインの電動化）を意味し，自動車の大衆化が始まった20世紀初頭から100年ぶりの変革期といわれる。CASE化がもたらすであろう都市交通の典型的な変化を下図に示した。本シリーズ全5巻の「モビリティイノベーション」は，四つの巻をCASEのそれぞれの解説にあてていることが特徴である。さらに，CASE化された車を使う人や社会の観点から取り上げた第2巻では，社会科学的な切り口にも重点を置いている。

このような，移動のイノベーションに関する研究が2013～2021年度にわたり，文部科学省および科学技術振興機構の支援により，名古屋大学COI（Center of Innovation）事業として実施されており，本シリーズはその研究活動を通して生まれた「移動学」ともいうべき統合的な学理形成の成果を取りまとめたものである。この学理が，人類最大の発明の一つである自動車の革命期における知のマイルストーンになることを願っている。

2020年3月

編集委員長　森川 高行



（イラスト作成：関口　愛）

まえがき

自動車はパワー源を馬などに依存していた馬車から，車自らの力で移動するモビリティとして誕生し，瞬く間に陸上交通を席巻する存在となった。自動車は自らパワー源をもつが，移動のためには人の運転操作が必要になる。運転操作はスキルを習得する必要があるが，人のすばらしい認知・判断・操作能力と，道路整備によって，数多くの自動車が高速に整然と移動する陸上交通を実現できた。しかし，運転操作は人の疲労を生み，人のミスによる事故も社会問題に発展した。そんな運転操作を機械側で実現する夢は，自動車誕生から間もなく語られ，さまざまな方式の実車実証も継続的に行われてきた。そして機械がパワー源のみならず，運転のための知能をもつ自動車へと発展した自動運転は，今世紀に入って目覚ましい発展を遂げ，2010年代には現実となって大ブームを迎えるに至った。自動運転は，これまでの自動車のもつ事故や渋滞・エミッションの問題の解決のみならず，運転操作から人を開放し，さらに人だけでなく物流を含むモビリティの変革なども大きく期待されている。また，今後の自動車の変革は自動運転のみならず，CASE と呼ばれる，コネクテッド化（Connected），自動化（Autonomous），シェア・サービス化（Shared & Service），電動化（Electric）が絡み合ったシステムとして進むと予想されている。

「自動運転」の関連内容で『モビリティサービス（第 1 巻）』，『高齢社会における人と自動車（第 2 巻）』，『つながるクルマ（第 3 巻）』については本シリーズですでにまとめられているため，本書は自動運転の技術的な仕組みを中心として，第 1〜3 巻との関連領域を少し含む内容で構成した。

まず 1 章では，自動運転の概要として，仕組みや歴史，さらにその現状と課題について解説する。

2〜7 章で，自動運転の構成要素となる，センサ，地図と位置推定，認知，判断・行動計画，制御，HMI について詳細な解説を行う。

2 章ではセンサとして，自動運転の目となる主要な外界センサとして，RADAR，LiDAR，カメラについてその役割や原理を説明する。

3 章では，高度な自動運転の実現に欠かすことができない認知機能の一つとして，地図と位置姿勢推定について，その信号処理の基礎理論から，実際に地図を構築する技術や，多くのアプローチがある位置姿勢推定技術について説明する。

4 章では，認知機能の中核となる外界センサに基づく走行環境認識について，機能の整理を

行い，深層学習を中心に目覚ましく進化している認識技術について詳細に説明する。

5 章では，自動運転の判断部分となる，判断・行動計画機能について，その定義から課題を整理し，現状手法を詳細に説明する。

6 章では，自動運転車両を計画された軌道に対して正確に動かす制御について，自動運転に関わる読者を対象に，その理論基礎から，現状利用されている技術について詳細に説明する。

7 章では，自動運転のレベル 2 やレベル 3 で顕在化し，世の中でも多くの議論が行われている人と自動運転システムの役割分担で，特に HMI について数多くの研究例を紹介しながら詳細に説明する。

8 章では，自動運転の実装に関して，オープンソースソフトウエアである Autoware を題材に紹介する。

9 章では，自動運転の技術に加えて重要になる社会的な側面について，法制度の観点で現状と課題を詳細に説明する。

10 章では，人を運転から解放した自動運転で新たに生まれた人との関係性や，エンタテインメントなどについても説明する。

11 章では，本書のまとめとして，自動運転がもたらすモビリティ社会や産業構造の変化という大きな視点からの議論を行う。

本書では，執筆時点での最新の状況に基づいて記述するようにしたが，自動運転を取りまく状況の変化は速く，読者の手に届くときには，古くなっている記述があることはご容赦いただきたい。本書が，自動運転の発展と普及の一助になれば幸いである。

最後に，お忙しいなか執筆をお引き受けいただいた著者の皆様，本書の出版にあたりご尽力いただいたコロナ社の皆様，名古屋大学 COI における出版事務局やその他の関係者の皆様に厚くお礼を申し上げる。

2020 年 11 月

5 巻編集委員　二宮　芳樹

本書において記載されている会社名，商品名，製品名などは，一般に各社の登録商標，商標，または商品名などです。本文中では，TM，©，® マークは省略しています。

目　　次

1. 自動運転概論

1.1　自動運転とは …… 1
　1.1.1　自動運転の定義と分類 …… 1
　1.1.2　運転自動化レベル …… 2
　1.1.3　自動運転のその他の分類 …… 3
　1.1.4　自動運転の用語 …… 4
1.2　自動運転の歴史 …… 4
　1.2.1　自動運転の幕開けとインフラ型の展開 …… 4
　1.2.2　自律型の展開 …… 6
　1.2.3　自律型とインフラ型の統合による現在の自動運転ブーム誕生 …… 8
1.3　自動運転の現状 …… 11
　1.3.1　二つのシナリオ …… 11
　1.3.2　オーナーカーシナリオの現状 …… 12
　1.3.3　サービスカーシナリオの現状 …… 13
1.4　自動運転への期待 …… 15
　1.4.1　自動車の負の側面の解決 …… 15
　1.4.2　新たな社会課題の解決 …… 16
　1.4.3　交通社会やビジネスモデルの変革 …… 16
1.5　自動運転の課題 …… 17
　1.5.1　人とシステムの協調 …… 17
　1.5.2　安全性の課題 …… 19
　1.5.3　開発戦略の課題 …… 22
引用・参考文献 …… 23

2. セ　ン　サ

2.1　センサの役割と種類 …… 25
　2.1.1　人の五感とセンサ …… 25
　2.1.2　一般道路での自動運転レベル 4 で必要なセンシング機能 …… 26
2.2　RADAR …… 29

2.2.1 RADARの現状 …… 29
2.2.2 RADARの仕組み …… 31
2.2.3 RADARの課題と今後 …… 34
2.3 カ メ ラ …… 34
2.3.1 カメラの現状 …… 34
2.3.2 カメラの課題と今後 …… 37
2.4 LiDAR …… 38
2.4.1 LiDARとは …… 38
2.4.2 LiDARの動作原理 …… 39
2.4.3 LiDARの課題と今後 …… 43
引用・参考文献 …… 44

3. 認知：地図と位置姿勢推定

3.1 自動運転にとっての地図と位置とは …… 46
3.1.1 地図と位置推定の関係 …… 46
3.1.2 自動運転における位置推定の役割と，必要となるセンサ …… 47
3.2 自動運転で活用される高精度地図の概要 …… 48
3.2.1 自動運転で活用される高精度地図 …… 48
3.2.2 位置推定のための地図 …… 50
3.2.3 認識のための地図 …… 52
3.2.4 経路計画・制御のための地図情報 …… 53
3.3 点群ベースの照合技術 …… 55
3.3.1 ICPスキャンマッチング …… 57
3.3.2 NDTスキャンマッチング …… 58
3.4 セ ン サ 融 合 …… 61
3.4.1 ベイズフィルタ …… 61
3.4.2 カルマンフィルタ …… 62
3.4.3 パーティクルフィルタ …… 62
3.5 GNSSと慣性センサ …… 63
3.5.1 GNSSの概要と自動運転との関係 …… 63
3.5.2 GNSSの欠点 …… 64
3.5.3 自動車におけるGNSSと慣性センサの統合 …… 66
3.6 Mobile Mapping System（MMS） …… 69
3.6.1 MMSの概要，利用されているセンサ …… 69
3.6.2 絶対位置を基準とした三次元復元 …… 71
3.6.3 MMSで作成した地図とSLAMで作成した地図の違い …… 73
引用・参考文献 …… 75

4. 認知：外界センサによる走行環境認識

4.1　環境理解とは …… 76
4.2　歩行者・車両の検出 …… 77
4.2.1　データセット …… 79
4.2.2　検出窓走査型の歩行者検出 …… 80
4.2.3　候補提案型の歩行者検出 …… 81
4.2.4　直接回帰型の歩行者検出 …… 82
4.2.5　まとめ …… 83
4.3　歩行者属性認識 …… 84
4.3.1　歩行者属性の分類 …… 85
4.3.2　静的属性 …… 85
4.3.3　動的属性 …… 87
4.3.4　応用 …… 89
4.4　走行環境の詳細認識 …… 90
4.4.1　画像の領域分割と認識 …… 90
4.4.2　条件付き確率場によるセマンティックセグメンテーション …… 91
4.4.3　深層学習によるセマンティックセグメンテーション …… 92
4.4.4　最近の動向 …… 94
4.4.5　まとめ …… 97
4.5　センサフュージョン …… 97
4.5.1　センサフュージョンの必要性 …… 97
4.5.2　情報の利用方法に基づくセンサフュージョン技術の分類 …… 100
4.5.3　情報の統合段階に基づくセンサフュージョン技術の分類 …… 102
4.5.4　センサ間のキャリブレーション …… 105
4.5.5　まとめ …… 106
引用・参考文献 …… 107

5. 判断・行動計画

5.1　運転行動計画の階層 …… 115
5.1.1　広域経路計画 …… 116
5.1.2　行動判断 …… 117
5.1.3　走行軌跡計画 …… 117
5.1.4　目標軌跡への追従制御計画 …… 118
5.2　判断・行動計画とリスク評価法 …… 119
5.2.1　顕在リスク …… 119
5.2.2　潜在リスク …… 120

5.2.3 人工リスク評価関数 …… 121
5.2.4 潜在リスクの発生確率 …… 122
5.2.5 リスク評価法の分類と特徴 …… 123
5.3 最適経路探索法 …… 124
5.3.1 移動コストの評価 …… 125
5.3.2 グラフに基づく最短経路探索 …… 126
5.3.3 リスク場・確率場に基づく経路探索 …… 127
5.4 運転行動判断 …… 128
5.4.1 決定論的行動判断 …… 128
5.4.2 機械学習による運転行動判断 …… 129
5.5 走行軌跡生成 …… 130
5.5.1 運動曲線による運動軌跡生成 …… 130
5.5.2 評価関数最適化による軌跡生成 …… 131
引用・参考文献 …… 131

6. 車両の制御

6.1 自律走行における走行目標実現のための車両制御 …… 133
6.1.1 車両制御の概論 …… 133
6.1.2 本章における「車両制御」の範囲について …… 134
6.1.3 対象とする車両 …… 134
6.2 車両制御に用いられる座標系 …… 134
6.3 目標軌道実現のための車両の簡易モデル …… 136
6.3.1 車両モデルを考える必要性 …… 136
6.3.2 システムモデリング …… 137
6.3.3 車速制御のためのモデル …… 137
6.3.4 車両の横方向モデル …… 139
6.4 PID 制御を用いた車両制御 …… 143
6.4.1 PID 制御の基礎 …… 143
6.4.2 PID 制御による車速制御 …… 144
6.4.3 PID 制御による軌跡追従制御 …… 144
6.4.4 PID 制御による舵角目標値の計算 …… 145
6.4.5 前方の先読み点を用いた PID 制御：look ahead control と点追従制御 …… 146
6.5 車両のダイナミクスを考慮した軌跡追従制御 …… 147
6.5.1 状態空間モデル …… 148
6.5.2 DBM に基づくパス追従誤差システム …… 148
6.5.3 安定性と極配置法によるゲインの設計 …… 149
6.5.4 線形二次レギュレータによるゲインの設計 …… 150
6.5.5 モデル予測制御 …… 150

6.5.6　拘束条件なしの線形二次モデル予測制御に対する簡易的な解法 …… 152
6.6　制御手法の違いによる経路追従誤差の評価 …… 153
6.7　車両制御の今後 …… 155
引用・参考文献 …… 155

7. 自動運転（レベル 2 とレベル 3）の Human Machine Interface（HMI）

7.1　ドライバの視認行動と知覚・認知リソース …… 157
7.1.1　ドライバの視認行動 …… 157
7.1.2　ドライバの知覚・認知リソース …… 158
7.1.3　ドライバの知覚・認知リソースに関するリスク管理 …… 159
7.2　システムの動作を示す HMI とモダリティの選択 …… 160
7.2.1　モダリティの選択：視覚・聴覚・触覚 …… 160
7.2.2　視覚モダリティ …… 160
7.2.3　聴覚モダリティ …… 162
7.2.4　触覚モダリティ …… 162
7.3　レベル 2 におけるドライバの運転行動と HMI …… 162
7.3.1　システム開始時の HMI …… 163
7.3.2　システム動作中のドライバの周辺認知レベル（situational awareness）…… 163
7.3.3　システムの運転制御に割り込むとき（オーバーライド）の HMI …… 164
7.3.4　システムへの抵抗感と HMI …… 165
7.4　レベル 3 におけるドライバの運転行動と HMI …… 167
7.4.1　レベル 3 と HMI の要件 …… 167
7.4.2　RTI と HMI …… 167
7.4.3　RTI を安全に行う HMI のさらなる改善 …… 169
7.5　システム利用時の安全性 …… 170
7.5.1　過　　信 …… 170
7.5.2　眠　　気 …… 170
7.6　ま　と　め …… 171
引用・参考文献 …… 172

8. 実　装　技　術

8.1　オープンソースソフトウエア Autoware …… 176
8.1.1　Autoware の概要 …… 176
8.1.2　ROS …… 179
8.1.3　自己位置推定 …… 183
8.1.4　環　境　認　識 …… 186

8.1.5 経 路 生 成 …… 189
8.1.6 経 路 追 従 …… 191
8.1.7 その他の Autoware の機能 …… 193
8.2 GPU・メニーコアへの実装 …… 193
8.2.1 Drive PX2 への実装 …… 194
8.2.2 メニーコアへの実装 …… 195
引用・参考文献 …… 198

9. 自動運転社会の法制度

9.1 自動車と法の関わり …… 199
9.1.1 法 と は 何 か …… 199
9.1.2 わが国の法体系 …… 200
9.1.3 私法について …… 201
9.1.4 法 令 の 理 解 …… 202
9.1.5 自動車は，どのように法と関わるか …… 203
9.1.6 交 通 事 故 …… 204
9.1.7 交通事故を未然に防ぐための法律（規制法） …… 205
9.1.8 交通事故後の対処のための法律（法的責任に関する法律） …… 206
9.1.9 自動車についての法の変容 …… 207
9.2 自動車が備えるべき安全性 …… 209
9.2.1 自動車（車両）の設計・製造に関する法的責任 …… 210
9.2.2 自動運転車に何を求めるか …… 212
9.2.3 自動車が備えるべき安全性 …… 212
9.3 自動車に関する現行法規と自動運転の社会実装に伴う変容 …… 213
9.3.1 概 観 …… 213
9.3.2 国 際 法 規 …… 214
9.3.3 国 内 法 規 …… 217
引用・参考文献 …… 227

10. 自動運転技術と人との関わり方

10.1 自動運転技術とインタラクション …… 228
10.1.1 HMI と HCI …… 229
10.1.2 完全自動運転技術が完成したとしても残る問題 …… 230
10.2 自動運転車両に乗る …… 232
10.3 自動運転車両を用いたサービスとその利用 …… 235
10.3.1 SecretSign …… 235

10.3.2　CarBuddy …… 237
10.4　自動運転におけるエンタテインメントの可能性 …… 238
10.5　完全自動運転車におけるインタラクションの未来 …… 241
引用・参考文献 …… 241

11．自動運転で変わるモビリティ社会・産業構造

11.1　自動運転とモビリティ社会の前提になる Vehicle IoT …… 243
11.2　なぜ，日本でのみ「車載」カーナビが普及したのか …… 245
11.3　さらなる地図の重要性 …… 248
11.4　地図と Vehicle IoT による見えない世界への対応 …… 249
11.5　半導体が車の安全性を高めた …… 253
11.6　「コネクテッド」でさらに安全性を高める …… 255
11.7　自動運転のもう一つの分類：Operational Design Domain …… 256
11.8　自動運転の開発方向性と市場方向性の二極化 …… 258
11.9　モビリティ社会の変貌：MaaS への発達 …… 260
11.10　サービスカーで変わる産業構造 …… 262
引用・参考文献 …… 269

索　　引 …… 271

1 自動運転概論

自動運転は，これまで人が行ってきた運転を，車側で実現する技術である。自動車すなわちautomobileは，「自ら」という意味のギリシャ語由来のフランス語“auto”と，動くものを意味するラテン語“mobile”の組み合わせで，「自ら動くもの」という意味である。これは，ペダルやステアリング操作によって機械システムが自動的に動くことを意味して用いられていたが，自動車が誕生して100年余り経ち，真の自動車の誕生が自動運転とも考えられる。電車や航空機などのモビリティでは，自動運転はすでに実運用されているが，陸上の主要モビリティである自動車の自動運転は，1939年にそのコンセプトは提案されたものの，夢の技術であった。21世紀になり，技術革新や野心的なアプローチが実を結び，2010年代には世界的大ブームとなった。自動運転は，自動車に100年に一度の変革をもたらすキーワードCASE†，すなわち，コネクテッド化（Connected），自動化（Autonomous），シェア・サービス化（Shared & Service），電動化（Electric）の一つとなり，単なる車の機能向上に留まらず，自動車の在り方や交通社会の変革を起こす可能性が指摘されている。

本書では，この世界的なブームとなっている自動車における自動運転について，その現状，実用化を可能にした技術のポイント，社会実装に向けての技術，社会的な課題について最新の情報を網羅し，本章では自動運転に関して概説する。

1.1 自動運転とは

1.1.1 自動運転の定義と分類

自動車は出発地から目的地まで，人の運転操作により，主として道路を通行して移動するモビリティである。鉄道とはレールの有無で区別される。運転は，認知・判断・操作という三つの情報処理で構成される。自動運転は，人が担当していたこの情報処理を車両システムが担当することにより，人の関与なしで運転される自動車である。

人が担当するすべての情報処理をシステムが取ってかわり，どんな場所でも運転できる自動運転は，一朝一夕には実現できない。そのため，自動運転には，さまざまな進化のステップやレベル分けが存在する。

† CASEに用いられる単語はいくつかのバリエーションがあるが，最初に提唱したダイムラー（Daimler）社が用いた単語に沿って表現した。

1.1.2　運転自動化レベル

運転自動化レベル（levels of driving automation）は最もよく知られる自動運転のレベル分けの一つである。現在，米国自動車技術者協会（Society of Automotive Engineers，SAE）で定義した6段階のレベル分けが一般的で，日本でも採用されている。SAEの定義には2014年1月版と2016年9月改正版[1)†]があり，ここでは2016年改正版に沿って説明する。運転の役割を運転タスク（dynamic driving task，DDT）と縮退運転（DDT fallback）とし，それぞれを人とシステムのどちらが分担するかでレベル分けするとともに，さらに運行設計領域（operational design domain，ODD）をレベル分けに導入している。運転タスク（DDT）は運転操作，すなわち継続的な縦横の車両制御（sustained lateral and longitudinal vehicle motion control）と監視・対応，すなわち物体やイベント検出と反応（object and event detection and response，OEDR）からなる（**図1.1**）。

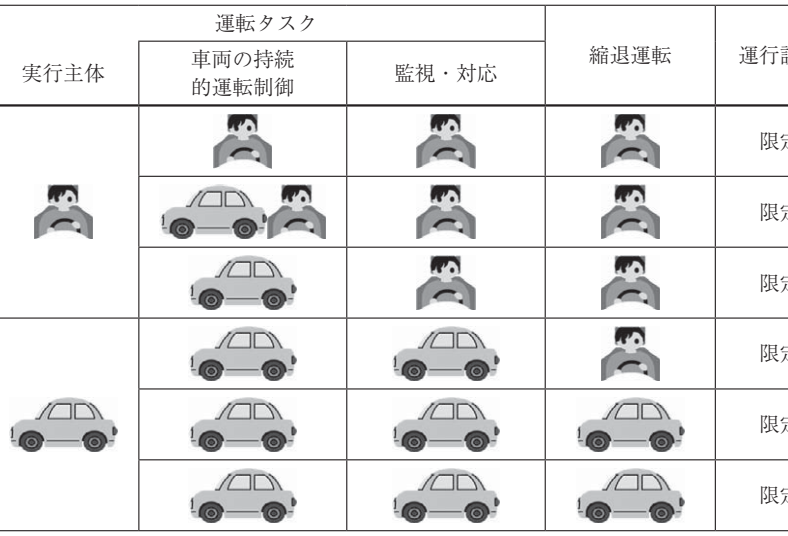
SAEレベル	運転タスク			縮退運転	運行設計領域
	実行主体	車両の持続的運転制御	監視・対応		
0					限定あり
1					限定あり
2					限定あり
3					限定あり
4					限定あり
5					限定なし

図1.1　SAEによる運転自動化レベルの定義

SAEレベル0は，人がすべての役割を担当するマニュアル運転（no driving automation），SAEレベル1は，システムが運転操作の一部を担当するいわゆる運転支援（driver assistance），SAEレベル2は，監視は人が行うがすべての運転操作はシステムが担当する部分的自動運転（partial driving automation）である。SAEレベル3は，操作に加えて監視までをシステムが担当するが，縮退運転は人が担当する条件付き自動運転（conditional driving automation）である。SAEレベル4は，システムがすべての運転タスクを担当する高度自動運転（high driving automation）である。SAEレベル4は，ODDになんらかの条件を含むかどうかで，条

† 肩付き数字は章末の引用・参考文献の番号を示す。

件のないものがSAEレベル5の完全自動運転（full driving automation）である。監視は認知・判断を行うことであり，監視の責任主体がどちらにあるかで大きくコンセプトが異なるため，SAEレベル0～2は運転支援（driver support），SAEレベル3～5は自動運転（automated driving）と大別される。高度自動化車両（highly automated vehicle，HAV）という言葉は，システムが監視に責任をもつSAEレベル3～5を指す。

ドライバやオペレータが乗車せずに，通信システムで遠隔地から監視・制御する遠隔型の自動運転では，一見ドライバの乗車していないSAEレベル4のように思われるが，遠隔ドライバやオペレータの役割を同乗ドライバと同様に考えれば，遠隔常時監視をするものはSAEレベル2であり，介入要請時のみに対応する場合はSAEレベル3，発車係（dispatcher）である場合はSAEレベル4となる。最近は，ドライバやオペレータが乗車しないことを示す言葉として，無人運転が用いられるようになった。

運転自動化レベルはあくまで，人とシステムの運転における役割分担のレベルを示したものであり，一般的にはレベルが高いほど高い知能レベルがシステムに要求されることが多いが，システムの知能レベルを示しているものではない。工場内搬送車のような誘導線で単純な障害物回避機能しかもたない車両も，SAEレベル4で運行されている場合がある。すなわち，運転自動化レベルは進化のステップではなく，人と機械の役割分担のコンセプトの違いを示すものである。SAEレベルの順番には意味がなく，2016年改正版では，レベル間の数字表現（2.5など）も存在しないと説明している。

本書では，SAEレベルXまたはSAEレベルXの自動運転を単に「レベルX」と表記する。

1.1.3 自動運転のその他の分類

その他の自動運転のレベル分けや分類には，走行できる道路の複雑度合いや，運転の複雑度合い，インフラの必要度合いなどがある。走行場所には，不整地と走行エリアを定義した道路環境があり，道路環境には構造化レベルにより，高速道路，自動車専用道路，幹線道路，一般道路，市街路，細街路などの段階に分類できる。構造化された自動車専用道路では，道路形状が規格化され，交差点などの複雑な接続関係をもつ箇所も少なく，道路周辺構造も画一化され，ペイント線なども比較的メンテナンスされており，自動運転の難易度が低い。あるレーン内に走行を限定したり，車速制限を低く設定するなどの条件を加えれば自動運転の難易度は下がる。車速を低速（30 km/h）以下に限定したものはISOでもlow-speed automated driving（LSAD）と分類されている。これらの分類は，自動運転の世界ではODDの条件の違いと表現されている。ODDには以上の条件に加えて，雨，雪，霧などの天候条件が表現されることが多い。

1.1.4　自動運転の用語

なお，自動運転を意味する用語としては，ほかにニュアンスの異なる自動走行，自律走行，無人運転などがある。本シリーズでは，一般的に用いられている自動運転で統一する。英語表記についても，SAE で勧めている自動（automated）をできるだけ用いる。自律（autonomous）もかなり一般的に使われているが，自律はインフラを用いないというニュアンスが強い。同様に自己運転（self-driving），無人（unmanned），ロボット（robot）なども用いない。

1.2　自動運転の歴史

1.2.1　自動運転の幕開けとインフラ型の展開

現状の自動運転を正しく理解するために，まず自動運転の歴史を紐解く。自動運転のコンセプトが最初に提案されたのは，1939 年のニューヨークで開催された万国博覧会（World's Fair）での自動化ハイウェイシステム（automated highway systems，AHS）のジオラマ展示である（**図 1.2**）。これは，ゼネラルモーターズ社（General Motors Company，以下，GM 社）が自社のパビリオン「Highway and Horizon 館」で 20 年後の未来の米国を見せる「Futurama†」として展示したもので，デザイナーの Norman Bel Geddes が手がけたものである。

図 1.2　1939 年の万国博覧会での自動運転のジオラマ[2)]
〔出典：To New Horizons（1940），https://publicdomainreview.org/collection/to-new-horizons-1940（2020 年 7 月現在）〕

AHS は，道路側に磁気誘導線を敷設し，RADAR（radio detection and ranging）によって車間制御を行う物理インフラ型の自動運転であった。米国という長距離運転が一般的な自動車大国で，長距離運転の負荷低減と快適性向上が訴求されているのが興味深い（**図 1.3**）。1950 年代から 1960 年代にかけて，米国 RCA 社，GM 社，オハイオ州立大学，ドイツのシーメンス社，

† future（未来）と panorama（パノラマ）を組み合わせた造語

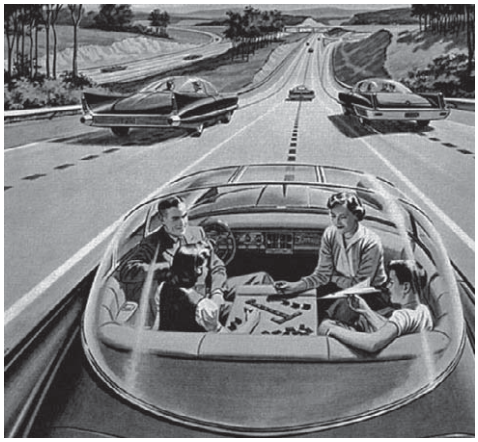


図 1.3 1950 年代の自動運転のイメージ[3)]
〔出典：sketch of a “driverless car of the future”, Saturday Eveing Post I the 1950s, http://1u4we0207ruc34o1s412c2ca-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2015/06/Americas-Electric-Light-and-Power-Companies.jpg（2020 年 7 月現在）〕

日本の機械技術研究所などでインフラ型自動運転の研究が行われていた。GM 社が開発したプロト車両の自動走行の紹介映像では，道路側の管制官のようなオペレータや，自動運転時にステアリングが収納され，2 基の RADAR を搭載した車両が登場し，自動運転により運転から解放され，乗員と楽しく会話し，食事をしながら移動する様子が描かれている（**図 1.4**）。

図 1.4 1950 年代の自動運転の技術開発[4)]
〔出典：GM-Key To The Future，https://media.gm.com/media/us/en/gm/bcportal.html/currentVideoId/3767696901001/pnId/11/typeId/c/currentChannelId/Most%20Recent.html（2020年7月現在）〕

物理インフラ型の自動運転アプローチは，その後も継続的に研究や実証が行われた。特に，米国カリフォルニア大学バークレー校の PATH[†1] Project 主導の National Automated Highway Systems Consortium（NAHSC）が，1995 年から 1997 年にかけてサンディエゴの HOV[†2] レーンで行った大規模な自動運転実証が有名である（**図 1.5**）。この実証では，日米の自動車会社が参加し，磁気ネイルという永久磁石列を道路に敷設して，隊列走行の実証も行われた。磁気

†1 California PATH（California partners for advanced transportation technology）
†2 high-occupancy vehicles レーンの略で，規定人数以上が搭乗している車のみ走行可能な車線。

索　　引

【あ】

アイコンタクト 88
アイセーフ帯 42
アクティブ 26
アジャイル開発 183
歩きスマホの認識 89
安全運転教育 18
安全技術ガイドライン 19

【い】

意思疎通 22
位置姿勢推定 46
移動困難者 16
イメージパージング 90
インターネット 243, 245, 266, 267, 268
インタフェース 230
インタラクション 230
インタレース 36
インフォテインメント 238
インフラ 3
インフラ協調型 6

【う】

ウィーン道路交通条約 215
運行設計領域 2
運転支援 2
運転自動化レベル 2
運動学的等価２輪モデル 140

【え】

遠隔ドライバ 3
遠赤外光カメラ 26
遠赤外線カメラ 98

【お】

オートメーションサプライズ 231
オーナーカー 11, 259, 263, 265, 266, 268

【か】

開　口 33
介入要請 18
顔の向きの推定 87
拡張カルマンフィルタ 7
拡張現実感 239
確率伝播法 91
カーシェア 16
可視光カメラ 25, 97
過　信 12
カーナビ 243, 244, 245, 246, 247, 248
体の向きの推定 87
環境理解 76
慣性センサ 46
完全自動運転 3
感　度 36

【き】

機械技術研究所 5
機械走査 33, 41
規制車速 22
逆畳み込み 93
キャリブレーションパラメータ 105
協調型 6
極配置 150
近赤外光照明 37
近赤外光カメラ 37

【く】

空間分解能 27
クラウド 246, 251, 260
グローバル座標系 134
グローバルシャッタ 36

【け】

刑　法 213, 223
経路座標系 135
顕在リスク 119

【こ】

広域経路計画 116
公共交通 16
工場内搬送車 3
高精度三次元地図（地図） 8
高精度地図 47
構造化 3
交通事故 15
交通渋滞 15
高度自動運転 2
高度自動化車両 3
高齢化 16
誤差システム 148
コーナリングスティフネス 141
コネクテッド 255
コネクテッド化 1

【さ】

再生可能エネルギー 261
最適制御 150
サービスカー 12, 260, 262, 265, 268
三次元構造 27
三次元地図 247, 249, 251, 255, 257

【し】

シェア・サービス化 1
シェアリングエコノミー 16
視覚情報 25
磁気ネイル 5
システム同定 137
姿勢推定 88
実勢車速 22
自動運転 243, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 260, 261, 268
自動化 1
自動化ハイウェイシステム 4
自動緊急ブレーキ 8
自動車 1
自動車運転死傷行為等処罰法 213, 223
自動車専用道路 3
自動車損害賠償保障法 213, 225
車載コンピュータ 245, 247, 255
車両座標系 135
ジュネーブ道路交通条約 215
条件付き確率場 91
条件付き自動運転 2
状態フィードバック制御 147, 149
衝突余裕時間 119
照明ロバスト 27
自律型 6
シングルビーム走査 40
人口減少 16
深層学習 35, 255, 256, 257, 267
身長推定 86

【す】

ステアリング操作 1
ステレオカメラ 6, 27, 97
スーパーシティ 260, 262
スマートシティプロジェクト 16
スマホ 244, 247, 253, 259, 260, 262, 264

【せ】

製造物責任法 213, 225
性別識別 86

セマンティック
　セグメンテーション 90
線形二次レギュレータ 147, 150
線形パラメータ可変システム 152
線形パラメータ変動システム 143
センサ 25
センサ融合 47
先進運転支援システム 8
全層畳み込みニューラル
　ネットワーク 92

【そ】

走行アルゴリズム
245, 249, 251, 255, 256
走行軌跡計画 117
相対速度 30
ソリッドステート 41

【た】

第一原理 137
ダイナミックマップ 15
ダイナミックレンジ 34
ダイムラーデータセット 79
タイヤすべり角 140
隊列走行 5
畳み込みオートエンコーダ 92
畳み込みニューラル
　ネットワーク 92
単眼カメラ 27

【ち】

知覚・認知リソース 158
駐車支援 19
超音波センサ 26, 97, 101
調　停 22

【て】

ディジタルインフラ 8
ディジタルビームフォーミング
　方式 33
データセンタ
243, 244, 249, 251, 255, 260
デッドレコニング 245
テレマティクス 243
点　群 47
天候ロバスト 27
電子走査 41
点追従制御 146
電動化 1

【と】

等価２輪モデル 140
統　合 100
動力学的等価２輪モデル 141
道路運送車両法 213, 217
道路交通法 213, 220
道路地物 50
ドップラー効果 32
ドライバモニタ 18

【に】

二次タスク 12

【ね】

ネットワークセキュリティ 245
年齢認識 85

【の】

ノード 179

【は】

排出ガス 15
ハイパースペクトルカメラ 38
パターン認識 28
バックモニタ 35
パッシブ 25
発車係 3
バッテリー 244
パーティクルフィルタ 62
パルス方式 31
判断・行動計画 115

【ひ】

ビーム切り換え方式 33
ヒューマンエラー 19
ヒューマンコンピュータ
　インタラクション 229
ヒューマンファクタ 13
ヒューマンマシン
　インタフェース 228

【ふ】

ファンクショナルセイフティ 245
フェーズドアレイ方式 33
複　合 100
輻射熱 37
服装認識 86
物体の所持認識 86
物体検出 77
物理インフラ 4
物　流 14
部分的自動運転 2
フラッシュ LiDAR 41
フリッカ 36
プーリングインデックス 93
プログレッシブ 36

【へ】

米国自動車技術者協会 2
ペダル操作 1

【ほ】

保安基準 217
ボクセル 58
歩行者検出 77
歩行者属性 84
歩容の認識 88

【ま】

マイクロ波 29
マニュアル運転 2
マルチコア 177
マルチパス 65, 103
マルチビーム走査 41
マルチモーダル音声対話 232

【み】

ミリ波 29
民　法 213, 225

【む】

無人運転 3

【め】

メニーコア 177
免許返納 16

【も】

モダリティ 160
モデル予測制御 150
モノパルス方式 33
モバイルサービス 268
モビリティ 1
モビリティサービス
258, 259, 260, 262, 264, 266, 268
モビリティ社会 243
モービルアイ 35

【ゆ】

融　合 101
誘導線 3
ユークリディアン
　クラスタリング 187
ユーザエクスペリエンス 231

【ら】

ライドシェア 16
ライドヘイリング 262, 264
ラスト１マイルモビリティ 13

【り】

リスク評価 119
リスク予測 21
裏面照射型 36
両眼立体視 25

【れ】

レーザレーダ 38
レベル０ 2
レベル１ 2
レベル２ 2, 162, 259
レベル３ 2, 167, 257, 258, 259
レベル４ 2, 248, 257, 259, 260
レベル５ 3
連　合 101

【ろ】

ロボットタクシー 13
ローリングシャッタ 36

【A】

ACC（adaptive cruise control） 8
ADAS 8, 247, 249, 250, 253, 255
AEB 8
aggregate channel features 81
AHS（automated highway systems） 4
AHS 研究組合 6
ASV プロジェクト 8
atrous spatial pyramid pooling 95
Autonomous 1
Autoware 22

【B】

Bayesian SegNet 94

【C】

C-V2X 252, 253
Caltech データセット 79
CAN 243, 245, 254
CASE 1
CCD 36
City Mobil 14
CityPersons データセット 79
CMOS 36
Connected 1

【D】

DARPA Grand Challenge 8
DARPA Urban Challenge 8
DDT（dynamic driving task） 2
DeepLab 95
deformable part model 81
Depthwise Separable Convolution 95
DRIVE PX2 194
dynamic bicycle model 141

【E】

early フュージョン 103
EasyMile 14
ECU 254, 255
Electric 1
ENet 96
ESPRI 34
EV 244, 259, 261

【F】

Faster R-CNN 82
feature-level フュージョン 104
FMCW 方式 31
Futurama 4

【G】

GLONASS 63
GM（ゼネラルモーターズ） 4
GM Cruise 13
Google 9
Google Car 9
GPS 63, 245
GPU 13, 194

【H】

HD-MAP 51
high-level フュージョン 102
HMI 19, 157
HTTP 243
Hybrid-State A* アルゴリズム 191

【I】

ICP 58
ICT 245, 246, 257, 259
IMU 46

【K】

kinematic bicycle model 140
KITTI データセット 79
KKT 条件 152

【L】

lane keeping assist system 8
late フュージョン 102
LDW 17
levels of driving automation 2
LGSVL 193
LiDAR 6, 249, 250, 251, 253
LiDAR 方程式 39
linear quadratic regulator 147
look ahead control 146
low-level フュージョン 103
LRF 38
LSAD（low-speed automated driving） 3
LTE 244, 247

【M】

MaaS 16, 260, 264, 268
Mask R-CNN 96
MATLAB/Simulink 193
MEMS 41
mid-level フュージョン 102
MMIC 30
MMS 47
model predictive control 150
MUSIC 34

【N】

NAHSC 5
Navlab 6
NAVYA 14
NCAP 18
NDT スキャンマッチング 51
NTSC 36

【O】

ODD（operational design domain） 2, 250, 256
OEDR 250
Open Platform 22
OSS 22
OTA 245, 251, 256, 259, 266

【P】

Passenger Economy 16
PATH 5
PC 244
PCD 50
PID 制御 143
PND 247
PROMETHEUS Project 7
PSPNet 94
pure pursuit 191
Pyramid Pooling Module 94

【Q】

QZSS 63

【R】

RADAR 4
receding horizon control 151
region-based convolutional neural network 82
ResNet 94
RF 34
robot 4
ROS 176
ROS 2 183
RTI 18, 167
RTK-GNSS 46

【S】

SAE 2
SegNet 94
self-driving 4
Shared & Service 1
Si フォトニクス 43
single shot detector 82
SLAM 50
slow フュージョン 102
SOTA（software update over the air） 12

【T】

Tesla 12
TOF 38
TTC 119

【U】

U-Net 94
Uber Technologies 13
unmanned 4
UWB 34

【V】

Vehicle IoT 243, 244, 249, 251, 253, 255
Velodyne 39

【W】

waypoint 54
WP1 216
WP29 215

【Y】

YOLO 187
you only look once 82

【数字】

1949 年ジュネーブ道路交通条約 213
1958 年協定 213, 214
1968 年ウィーン道路交通条約 213
1998 年協定 213, 214
2 周波 CW 方式 31

―― 編著者・編者略歴 ――

二宮　芳樹（にのみや　よしき）
1981年　名古屋大学工学部電子工学科卒業
1983年　名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了（電子工学専攻）
1983年　株式会社豊田中央研究所勤務
2008年　博士（工学）（名古屋大学）
2014年　名古屋大学特任教授
現在に至る

武田　一哉（たけだ　かずや）
1983年　名古屋大学工学部電気工学科卒業
1985年　名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了（電気電子および電気第二専攻）
1985年～93年　国際電信電話株式会社（KDD，現KDDI）勤務
1986年　国際電気通信基礎技術研究所（ATR）出向
1988年　米国マサチューセッツ工科大学滞在研究員
1993年　博士（工学）（名古屋大学）
1995年　名古屋大学助教授
2003年　名古屋大学教授
現在に至る

自　動　運　転
Automated Driving

© Yoshiki Ninomiya, Kazuya Takeda et al.　2021

2021年1月25日　初版第1刷発行　★

検印省略

編著者　二宮芳樹
編　者　武田一哉
発行者　株式会社　コロナ社
代表者　牛来真也
印刷所　壮光舎印刷株式会社
製本所　株式会社　グリーン

112-0011　東京都文京区千石4-46-10
発行所　株式会社　**コロナ社**
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan
振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)
ホームページ　https://www.coronasha.co.jp

ISBN 978-4-339-02775-4　C3353　Printed in Japan　（三上）

JCOPY　＜出版者著作権管理機構 委託出版物＞
本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は，そのつど事前に，出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088，FAX 03-5244-5089，e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー，スキャン，デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は，いかなる場合も認めていません。
落丁・乱丁はお取替えいたします。