

Automated Transportation System for Products and People on the Basis of Taxi-type Automated Guided Vehicles

Masao NAKAGAWA*, Toshiki HIROGAKI** and Eiichi AOYAMA***

(Received November 21, 2022)

The automotive industry is said to be facing a once-in-a-century transformation represented by CASE (Connected, Automated, Sharing, and Electrified). In the face of the remarkable progress in car electrification and automation, there is a need to resolve social issues such as reducing carbon dioxide emission and traffic collisions. In Japan, where the ratio of elderly people is increasing, it is important to offer means for safe transportation for them to improve their quality of life. In addition, the shortage of logistic drivers is a serious issue, due to a decrease in the working age population. In order to resolve these social issues in CASE, MaaS (Mobility as a Service), which allows users to use multiple transportation services through digital channels, with automated vehicles is considered to be highly attractive. Based on these needs, this paper discusses the transportation efficiency of automated vehicles by comparing them with the current status of the industrial automated guided vehicles (AGVs), which can be expanded to the autonomous mobile robots (AMRs).

Key words : automated driving, Mobility as a service, automated guided vehicle, traffic engineering, flying vehicle, transportation

キーワード: 自動運転, MaaS, AGV, 交通工学, 空飛ぶ車, 搬送

タクシー型 AGV の搬送計画に着想を得た モノと人の移動に関する自動運転に対する考察

中川 正夫, 廣垣 俊樹, 青山 栄一

1. 緒言

昨今の自動車産業は、CASE (Connected, Automated, Sharing and Electrified) ¹⁾と称される 100 年に一度の大変革期を迎えているといわれている。電動化や自動運転をはじめとする技術が著しく進歩する中で、いかに自動車で二酸化炭素の排出量の削減、交通事故死傷者数の削減等の社会課題を解決するのか、自動車のあり方に変革が求められている。

日本政府は、2022 年に策定した「デジタルを活用した交通社会の未来 2022²⁾」の中で、2025 年を目処に全国各地域での無人自動運転移動サービスの実現や自動運転レベル ⁵⁾を活用したモビリティサービスの実装に向けた調査を行うとしている。

少子高齢化が急速に進行する日本において、増加する高齢者の移動手段の確保は QOL (Quality of life) を高める上でも重要である。また、生産年齢人口の

* National Traffic Safety and Environment laboratory, Tokyo
Telephone: +81-90-5907-3681, E-mail: masa74n@gmail.com

** Department of Mechanical Systems Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6503, E-mail: thirogak@mail.doshisha.ac.jp

*** Department of Mechanical Engineering and Science, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6506, E-mail: eaoyama@mail.doshisha.ac.jp

減少により、物流を支えるドライバの人手不足も深刻な問題である。ニーズに合わせたペイできる必要かつ十分なシステムを組むことさえできれば、自動運転によりこうした社会課題を解決できると考えられる。ニーズに迅速に応えるうえで、自動化できることから自動化し、人に頼るべき項目は必然的に残ると考えられる。したがって、自動運転レベルはあくまでもシステムを組んだ結果であり、レベル4や5でなければならない理由はなく、デジタルを活用したニーズに基づくものと考えられる。

自動運転によって社会問題の解決に貢献するにあたり、モノと人を輸送する MaaS⁴⁾ (Mobility as a service) の実現可能性が高いと考えられる。MaaS としての自動運転車は限られた運行設計領域 (ODD: Operational design domain) 内で走り、工場の中を走る AGV (Automated Guided Vehicle)⁵⁾ に相当する。また近年、AGV は多数のセンサ情報に基づく自律走行の機能を具備した AMR (Autonomous Mobile Robot) に発展し、公共の搬送に応用した例も出現してきており、自動運転車 (ADV: Automated Driving Vehicle) の技術との類似性も見られてきている⁶⁾。

一方で、自動運転においては ODD 内に他の交通参加者や信号等があり、一般的な工場や倉庫を想定した場合に比べて煩雑な環境の中で走ることになる。そこで本報では、自動運転へのニーズと現状に基づき、タクシー型 AGV に着想を得た自動運転の輸送効率について考察を行った。

2. 各国のニーズと自動運転の現状

本章では、アメリカ、ヨーロッパおよび日本における社会問題解決の方向性と人の移動を中心にした自動運転に関する最新事情をまとめる。

2.1 アメリカの方向性と自動運転の現状

アメリカ政府は、ITS world congress 2022 において、Transformation by transportation を掲げ、safer, greener and smarter transportation の実現に向け、1.環境負荷の低減、2.安全性の向上、3.効率の向上 (渋滞の解消)、4.経済効果の優先順位で政策を進めていくことを表明した。2021 年 11 月 15 日に成立し

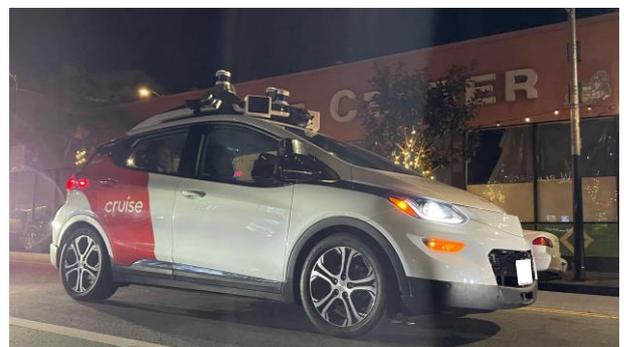
たインフラ投資雇用法 (IIJA: Infrastructure investment and jobs act)⁷⁾により、約 5500 億ドルの投資が行われることが見込まれ、本資本により上記の政策が推し進められる見通しである。

アメリカでは交通事故死傷者数が増加傾向にあり、特に交差点において年間 1 万人の死者⁸⁾が出ている。こうした事故による死傷者数の削減のため、自動運転が一つの解決策として考えられている。

アメリカでは、40 の州とワシントン D.C.において自動運転の運行が認められており、なかでもサン



(a) Waymo one



(b) Cruise GM Volt



(c) Zoox

Fig. 1. Automated driving vehicles in San Fransisco.

フランシスコでは 44 社が有人での自動運転の運行許可を取得し、6 社が無人での運行許可を（そのうち 3 社が無人での営業許可を）取得している。

Fig. 1 に示す Waymo⁹⁾や Cruise, Zoox 等の自動運転車が日々街中を走行し、データを収集するとともに機能改善、安全性の向上に努めており、uber に替わるモノや人を運ぶサービスの構築を目指して技術を磨いている。

2.2 ヨーロッパの方向性と自動運転の現状

ヨーロッパでは、Greener, smarter and safer な交通社会の構築に向け、データを活用した政策を基軸に産業の発展を促進する政策を掲げている。上記目標の達成に向け、データにより効果的な対策を講じるべき対象を明らかにすることを目指しており、その対策の一つとして自動運転の利用を考えている。

対策に応じた自動運転を活用したシステムを構築するべく、自動運転の基礎技術の醸成に力を入れており、EC (European Commission) 傘下の Horizon Europe¹⁰⁾や Hi-Drive, VVM, Set Level といった様々なプロジェクトが整理され効率よく展開されている。

2.3 日本の方向性と自動運転の現状

日本では、「デジタルを活用した交通社会の未来 2022」に掲げているように、個人所有の車両とサービスカーのそれぞれについて目標として掲げている。2025 年までに高速道路上レベル 4 およびレベル 4 サービスカーを全国 40 か所で運行するとし、SIP-adus といった基盤技術の構築¹¹⁾に加え、福井県永平寺町や茨城県境町等においてレベル 4 サービスカー¹²⁾の営業運転を始めている。

高齢者の移動手段の確保や運送業界のドライバー不足の問題に対して、いかにビジネスモデルを構築し、自動運転で貢献するかが課題となっている。

3. タクシー型 AGV に着目した輸送効率の考察

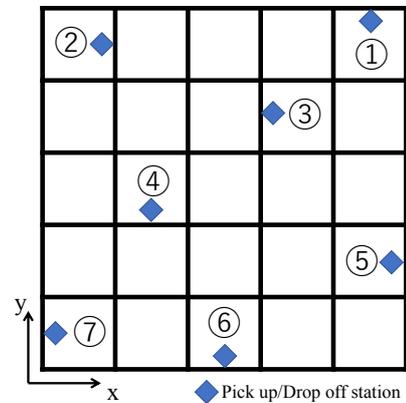
近年、主に工場内やその敷地内での搬送を目的とした自動搬送車 AGV とその自律型協働ロボット AMR と自動運転の具現化において、無線給電の技術の共用化等が取り込まれており¹³⁾、両者に共通

する技術的な課題が多いことが判明してきている。そこで前章の人の移動を中心にした方向性を考慮して、自動運転による応用の可能性について検討する。

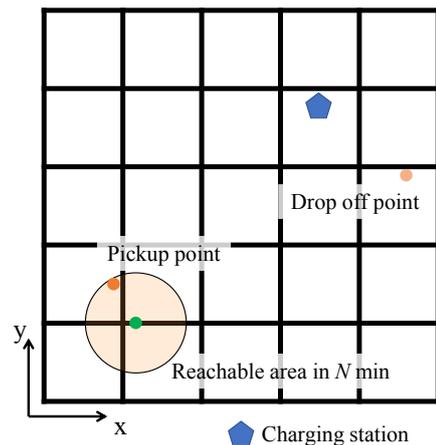
3.1 限定領域における自動運転

MaaS の自動運転車は、ODD と称される限られた領域内で走行する。例えば、Cruise はサンフランシスコの一部の領域¹⁴⁾を ODD として運行している。

本報では、この限定領域内における自動運転を用いた人の移動に関する輸送効率について検討する。



(a) Facility model for AGV



(b) ODD model for ADV

Fig. 2. Model comparison between AGV and ADV.

まず、人の移動に関する自動運転と AGV の差異ならびに自動運転の前提条件について整理する。

1. 自動運転では限定領域内の任意の場所で利用者を乗降させるが、AGV は特定の場所で荷物を積み下ろしする。

2. 自動運転では、アプリからの申請により、利用客の乗車場所と降車場所があらかじめわかるものとする。
3. 自動運転車は電動車両であるとし、走行可能距離と充電場所までの距離の管理を行う。

上記より、AMR への発展が期待できる仲谷らのタクシー型自動搬送モデル¹⁵⁾を参考に AGV と自動運転のコース図の比較を Fig. 2 に、AGV のアルゴリズムを参考にした自動運転と乗客とのマッチングのアルゴリズムを Fig. 3 に示す。

Fig. 2 に示すように、AGV では特定の場所で荷物が発生し、特定の場所へ運ぶのに対し、自動運転では充電場所 (CS: Charging station) だけが定まっておき、任意のタイミングで任意の場所から乗車のリクエストが発生する。

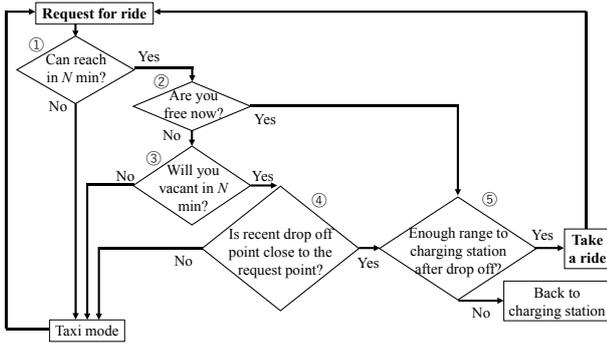


Fig. 3. Matching algorithm of ADV and rider.

以降、Fig. 3 に即して ODD 内における乗客とのマッチングについて考察する。乗客からの乗車リクエストは任意のタイミングであり、リクエストから乗車までに要する時間として乗車待ち時間 N [min] をパラメータにする。

- ① 自動運転車から見て、平均車速 V_{ave} [m/s] で N 分以内に到達可能な距離 D_{inN} [m] に乗客が出現する確率を P_{inN} とする。なお、現在位置を (x_{now}, y_{now}) 、 $i-1$ 番目の乗客の降車位置を $(x_{i-1,off}, y_{i-1,off})$ 、 i 番目の乗客のリクエスト乗車位置を $(x_{i,on}, y_{i,on})$ とする (i は 2 以上)。また、自動運転車は道路を走行するため、2 地点間の距離は Fig. 2 に即してマンハッタン距離とする。

$$D_{inN} = D_{i-1,off} + D_{int(i)} \quad (1)$$

$$D_{i-1,off} = |x_{i-1,off} - x_{now}| + |y_{i-1,off} - y_{now}| \quad (2)$$

$$D_{int(i)} = |x_{i,on} - x_{i-1,off}| + |y_{i,on} - y_{i-1,off}| \quad (3)$$

- ② リクエスト発生時に空車 (つまり、 $i-1$ 番目の乗客がいない場合) であれば、 i 番目の乗客を乗せる方向で進める (⑤へ)。
- ③ リクエスト発生時に貸走中で、 N 分以内に $i-1$ 番目の乗客が降車しない場合には貸走を続ける。なお、 N 分未満で $i-1$ 番目の乗客が降車する確率を P_{off} とする。
- ④ N 分未満で $i-1$ 番目の乗客が降車する場合、降車位置と i 番目の乗客のリクエスト乗車位置との位置関係を評価する。現在位置と $i-1$ 番目の乗客の降車位置への進行方向を基準に、以下の式(4)を満たす場合、マッチングが成立するとする。式(4)が成立する確率を P_{rel} とする。式(4)を満たさない場合、 i 番目の乗客の乗車位置を通り過ぎて $i-1$ 番目の乗客を降車させるため、 i 番目の乗客の乗車位置まで戻らざるを得ないが、U ターン等の融通が利かない等、道路の都合による制約があると考えられる。

$$D_{i,on} > D_{i-1,off} \quad (4)$$

$$D_{i,on} = |x_{i,on} - x_{now}| + |y_{i,on} - y_{now}| \quad (5)$$

- ⑤ 最後に、リクエストの降車位置 $(x_{i,off}, y_{i,off})$ から充電場所 (x_{cs}, y_{cs}) までの距離と航続距離 (R_{rem}) との関係の評価する。自動運転と親和性の高い電動車両の使用を前提としているため、充電場所まで戻れるだけの航続距離を残しておく必要がある。したがって、式(6)を満たす時リクエストを承認して乗客を乗せ、そうでない場合は充電場所へ戻る。ここで、信号や渋滞等の交通事情を考慮し、安全率を S (≥ 1) とする。なお、式(6)が成立する確率を P_{range} とする。

$$R_{rem} > S(|x_{i_off} - x_{cs}| + |y_{i_off} - y_{cs}|) \quad (6)$$

したがって、乗客とマッチングできる確率 P_{mat} は式(7)で表される。

$$P_{mat} = P_{inN}P_{off}P_{rel}P_{range} \quad (7)$$

上記を踏まえ、輸送効率について考察する。Fig. 4に示すようにフル充電時の航続距離 R_{full} に対する乗客の輸送距離を輸送効率 η と定義する。

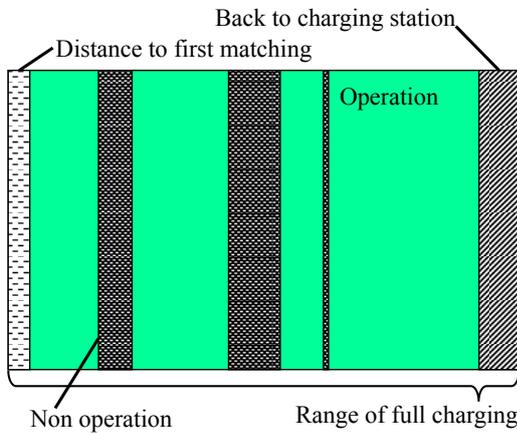


Fig. 4. Efficiency for a ADV operation.

最初のマッチングまでの空車で走行距離を D_{emp} とし、式(8)と定義する。これは最初の乗客を充電場所で乗せる ($x_{1_on}=x_{cs}, y_{1_on}=y_{cs}$) ことで解消できると考えられる。

$$D_{emp} = |x_{1_on} - x_{cs}| + |y_{1_on} - y_{cs}| \quad (8)$$

また、充電のため充電場所に戻らなければならないことから、 n 番目の乗客が降車する最後の降車場所 (x_{n_off}, y_{n_off}) から充電場所へは必ず空車で回送となる。

最後の降車場所が充電場所に近いのが理想ではあるものの、乗客の都合に依存するため、選択の余地はないと考えられる。最後の降車場所から充電場所への走行距離 D_{back} を式(9)と定義する。

$$D_{back} = |x_{n_off} - x_{cs}| + |y_{n_off} - y_{cs}| \quad (9)$$

以上より、自動運転車 1 台あたりの輸送効率 η は式(10)のように表される。

$$\eta = 1 - \frac{D_{emp} + \sum_{i=2}^n D_{int(i)} + D_{back}}{R_{full}} \quad (10)$$

ここで、乗客候補が ODD 内に様に分布していると仮定すると、乗車待ち時間 N を伸ばすことで探索範囲が広くなり、 P_{inN} が高まると考えられる。

しかし、乗客候補にとって許容可能な乗車待ち時間 N に上限があること、 $i-1$ 番目の乗客の降車位置と i 番目の乗客のリクエストの乗車位置が離れ、 D_{int} が延び効率が低下する可能性があることから、適切な乗車待ち時間 N を定める必要があると考えられる。乗車待ち時間 N の範囲は社会における受容性により定まると考えられるが、長くても 15 分といったところが妥当であると考えられる。

また、工場内の荷物と違い、乗客は自身で移動可能なため、④において D_{int} が 50m 等、歩ける距離だった場合、 i 番目の乗客に割引やクーポンの配布等のインセンティブを与えて $i-1$ 番目の乗客の降車位置 (x_{i-1_off}, y_{i-1_off}) まで移動願うことで、マッチングの不成立を防ぎ、かつリクエスト乗車位置まで自車が移動する必要がなくなることから効率も向上させることが可能になると考えられる。

以上、限定領域内における自動運転を用いた人の移動に関する輸送効率について検討した。1 台当たりの輸送効率を高めることで、総乗客数に対して稼働台数を抑制することができ、消費エネルギーの削減につながると考えられる。

一方で、乗客数に応じた適切な台数配置や自動運転車間の乗客の取り合い等の課題については今後検討が必要と考える。

3.2 立体倉庫に着目した3次元への拡張の可能性

従来の FMS (Flexible manufacturing system) 生産システムでは、マシニングセンタ等の工作機械、その工作物を操り運ぶ産業用ロボット・AGV と立体

自動倉庫が工場内での基本構成¹⁶⁾である場合が多い。そこで3次元空間上にモノを収納してその流れを制御している自動倉庫にも着目して検討する。

モノの移動に関して昨今ではドローンを用いた輸送が考えられ、人の移動に関しても空飛ぶ車¹⁷⁾の構想が現実味を帯びてきている。そこで本節では、前節までの2次元の人の移動を3次元に拡張し、その差異について考察する。

Fig. 2(b)のODDモデルを3次元に拡張したものをFig. 5に示す。z=1の階層のみの移動であれば前節までと同様である。飛行可能な空域の制限等を鑑み、Fig. 5では立方体の一部を削っている。

3次元のODDにおいて、空中の任意の場所で乗客が出現することは考えられないため、ヘリポート等AGVにおけるP/D (Pick up/ Drop off station) 相当の場所が必要である。P/Dがあることで、前節の自動運転のアルゴリズムに加え、AGVにおけるマッチングの課題等が生じることが予想され、AGVにおける知見が有用であると考えられる。

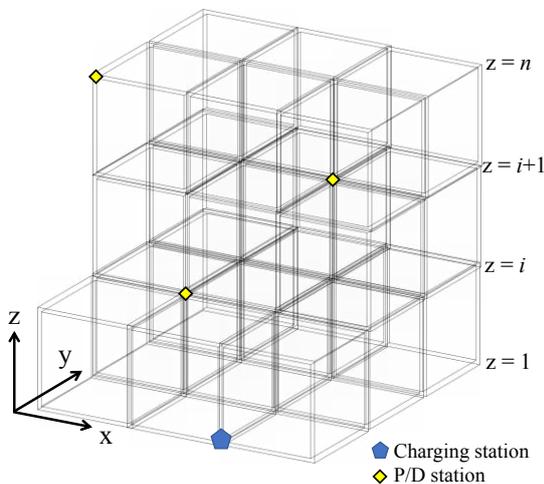


Fig. 5. Expanded ODD model for 3D.

また、z=1より上の階層において、ダイナミックマップ¹⁸⁾等を用いて構築された空間IDを用いる等を行うことにより、3次元空間においても正確な移動が実現できると考えられる。自動運転やAMRにおける自己位置推定に関し、SLAM (Simultaneous localization and mapping)¹⁹⁾が重要な基礎技術となっており、レーダやLiDAR、カメラ等各種センサを用

いた手法^{20, 21)}がある。水中を航行するAUV (Autonomous underwater vehicle) への応用^{22, 23)}等も見られ、空間ID等を用いた3次元空間におけるより高度なSLAMへの発展が期待される。

空域制限等によってマンハッタン距離で移動しなければならない領域もあると考えられるが、制限がなければユークリッド距離で移動できる。2次元を対象とした衝突の問題に加え、落下などの安全性に対する課題が増大するものと考えられるが、適切な法整備やルールの策定により、3次元に拡張した式(2), (3), (5), (7), (8), (9)において、マンハッタン距離がユークリッド距離になれば、移動距離が短縮され輸送効率の向上を図れると考えられる。

自動運転に空飛ぶ車/ドローンを組み合わせ、モノと人の輸送を3次元へ拡張することにより搬送効率を向上し、環境負荷の低減や安全性の向上等、社会課題の解決に貢献できることが期待される。

4. 結論

自動運転へのニーズと現状に基づき、限定領域における人の移動に関して、AMRへの発展が期待できるタクシー型AGVに着目し、自動運転を用いた輸送効率について考察を行った。

- (1) 自動運転はモノや人の移動において、環境負荷の低減や安全性の向上等、社会課題の解決に向け貢献できる手段の一つである。
- (2) AGVでは特定の場所で荷物が発生し、特定の場所へ運ぶのに対し、自動運転では充電場所だけが定まっており、任意のタイミングで任意の場所から乗車のリクエストが発生する。
- (3) 乗車待ち時間Nの範囲は社会における受容性により定まると考えられるが、自動運転による輸送効率における重要なパラメータである。
- (4) インセンティブによる乗客の協力により、マッチングの不成立を防ぎつつ、効率も向上させることも可能になると考えられる。
- (5) 自動運転に空飛ぶ車/ドローンを組み合わせ3次元の輸送へと拡張することにより、輸送効率を向上できる可能性がある。
- (6) 自動運転や空飛ぶ車/ドローンの導入に関し、

安全性に課題が生じることは十分に懸念される。適切な法律やルールの策定により、安全性も確保しつつ社会問題を解決することが求められる。

参考文献

- 1) 太田信義, “自動車産業にみる技術大変革と対応戦略: 技術アウトソーシングの意義と課題”, 名古屋学院大学論集, **57**[1], 197-236 (2020)
- 2) デジタル庁, “デジタルを活用した交通社会の未来2022”, https://www.digital.go.jp/assets/contents/node/information/field_ref_resources/22791050-006d-48fd-914d-e374c240a0bd/1ae00570/20220802_news_mobility_outline_01.pdf (2022.10.23 にアクセス)
- 3) SAE international, “SAE J3016”, (2021)
- 4) 中村文彦, 外山友里絵, 牧村和彦, MaaS がよくわかる本, (秀和システム, 東京, 2022)
- 5) T.Hirogaki, E.Aoyama, K.Ogawa, T.Kono, and D.Mitsuoka, “Autonomous Conveyance Control of AGV Based on Knowledge of Taxi Transportation Rules”, *Key Engineering Materials*, 523-524, 693-698 (2012)
- 6) 村井亮介, 松野文俊, “自律移動搬送ロボットのホテル・空港におけるサービス提供の可能性に関する実証実験の実施”, 日本ロボット学会誌, **36**[4], 279-285 (2018)
- 7) U.S. DOT, <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/3684/text> (2022.10.23 にアクセス)
- 8) U.S. DOT, Federal Highway Administration, <https://highways.dot.gov/safety/intersection-safety/about> (2022.10.23 にアクセス)
- 9) J.M.Scanlon, K.D.Kusano, J.Engstrom, and T.Victor, “Collision Avoidance Effectiveness of an Automated Driving System Using a Human Driver Behavior Reference Model in Reconstructed Fatal Collisions”, Waymo. LLC (2022)
- 10) Directorate-General for research and innovation, “Horizon Europe, the EU Research and Innovation Programme (2021-27)”, European Commission (2021)
- 11) R.Shirato, S.Kuzumaki, “Japan’s SIP-Adus Program on Road Vehicle Automation”, *Automated Vehicles Symposium 2019 Road Vehicle Automation* 7, 13-22 (2019)
- 12) 加藤晋, “遠隔システムを用いた無人自動運転移動サービス-社会実装に向けた産総研の取り組み”, 学術の動向, **27**[2], 77-81 (2022)
- 13) 尾林秀一, “磁界結合方式無線電力伝送の産業応用に向けた技術開発”, 日本 AEM 学会誌, **28**[4], 282-287 (2020)
- 14) Cruise, <https://getcruise.com/rides/> (2022.10.23 にアクセス)
- 15) T.Nakatani, D.Morikawa, N.Harada, T.Hirogaki, and E.Aoyama, “Autonomous Transport System with Taxi-type Automated Guided Vehicles Based on Transport Density”, *Proceedings of the ASME 2021 international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference*, IDETC2021-68097 (2021)
- 16) 山口賢治, 小坂哲也, “機械加工システムの変遷と最新ロボットセル”, 精密工学会誌, **78**[8], 670-673 (2012)
- 17) U.Eker, G.Fountas, P.Ch.Anastasopoulos, and S.E.Still, “An Exploratory Investigation of Public Perceptions Towards Key Benefits and Concerns from The Future Use of Flying Cars”, *Travel behavior and society*, 19, 54-66 (2020)
- 18) 今井龍一, 中村健二, 塚田義典, 土田直之, 山本忍, “ダイナミックマップを用いた道路地物の3次元空間の領域生成に関する研究”, 土木学会論文集 F3, **78**[2], I_93-I_102 (2022)
- 19) B.Alsadik, S.Karam, “The Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)-An Overview”, *Surveying and geospatial engineering journal*, **1**[2], 1-12 (2021)
- 20) Z.Hong, Y.Petillot, A.Wallance, S.Wang, “RadarSLAM: A Robust Simultaneous Localization and Mapping System for All Weather Conditions”, *The international journal of robotics research*, **41**[5], 519-542 (2022)
- 21) H.Ding, B.Zhang, J.Zhou, Y.Yan, G.Tian, B.Gu, “Recent Developments and Applications of Simultaneous Localization and Mapping in Agriculture”, *Journal of field robotics*, **39**[6], 956-983 (2022)
- 22) P.Mu, X.Zhang, P.Qin, B.He, “A variational Bayesian-Based Simultaneous Localization and Mapping Method for Autonomous Underwater Vehicle Navigation”, *Journal of marine science and engineering*, **10**[1563], 1-20 (2022)
- 23) F.Demim, S.Benmansour, N.Abdelkrim, A.Rouigueb, “Simultaneous Localization and Mapping for Autonomous Underwater Vehicle Using a Combined Smooth Variable Structure Filter and Extended Kalman Filter”, *Journal of experimental & theoretical artificial intelligence*, **34**[4], 621-650 (2022)