

自動運転用敷地内地図の送受信システムの開発

生富 直孝 氷室 福
(技術研究所) (技術研究所)

Development of Local Site Maps Sending and Receiving System Dedicated to Autonomous Driving

Naotaka Ikutomi, Fuku Himuro

本論文では、公道から敷地内へシームレスに自動走行可能にさせるための自律走行における複数の地図の分散配置方法を提案した。提案するシステムで地図データの通信負荷テストを実施して、複数車両にデータを送信する際はネットワークのボトルネックを解消する必要があるとわかった。また、実測した地図と3Dモデルで作成した地図を用いて広域のシミュレーションを行った。その結果、自動走行中に敷地内の地図を受信しても自動走行を継続できることを確認し、カーブなどの自己位置推定に高い計算負荷がかかる箇所では地図配布を避けるべきということがわかった。

Toward the realization of an autonomous driving society, operating and managing maps for autonomous vehicles become necessary. In this paper, we proposed a method of distributing multiple maps in autonomous driving to enable seamless automatic driving from public roads to the local site. We conducted a distributing test of map data with the proposed system and found that network bottlenecks need to be eliminated when sending data to multiple vehicles. A simulation study was also carried out for a wide area, with the measured map and a map generated by 3D model and the driving stability of the vehicle was evaluated from the results. As a result, it was confirmed that automatic driving can continue even if a map of the site is received during automatic driving and found that map distribution should be avoided in areas where high computational load is applied to self-position estimation, such as curves.

1. はじめに

自動運転技術の実現に向けた技術分野の一つに自動運転専用地図がある。自動運転車両が自動走行するためには、①自分が今どこにいるかを把握する、②どの道路を通過して目的地に向かうかを定める、の少なくとも二つの技術が必要になり、双方ともに地図を活用する場合が多い。①に関しては主に点群地図が必要となり、車両に搭載されているLiDARから得られる実空間の情報と車両が保有している地図の情報をマッチングさせることで自己の位置を特定している。②に関しては、自動運転車が目的地に着くまでの経路や、交通信号機・標識といった地物情報が格納された地図を用いることが多い。

一般の公道においては、こうした地図の整備が進められている。国内の高速道路・自動車専用道路については、ダイナミックマッププラットフォーム株式会社によって既に高精度3次元地図データ(HDマップ)として提供が開始されており、現在では一般道

路の整備が進められている。一方で私有地等の敷地内については、地図の作成方法や管理についての議論が進められていない。

既存の自動運転地図配信技術については、ダイナミックマップ2.0コンソーシアム(以下、DM2.0)による共同研究がある。DM2.0では、自動運転専用地図を通信で扱う上での課題である大規模なデータ処理や、リアルタイムな応答性を解決するためのクラウド・エッジ・車両の三層のネットワーク構造を提案している¹⁾。エッジは自身が管轄する狭域のデータを保有し、クラウドは複数のエッジが持つ狭域情報を統合して広域情報を作成する。さらに、エッジは車両に対して管轄エリア内の地図データを配信する。しかしながら、エッジのデータベースに分散した敷地内の点群地図を格納する方法や、敷地内の地図データを取得するためのクエリ発行手順など、敷地内データの運用については具体的な検討がなされていない。

また、公道の地図データについてはあらかじめ車両が走行範囲の全ての地図データを保有しておくケ

ースが一般的だが、全国の敷地内の点群地図は膨大なデータ量になるため、全国の敷地内地図を予め全て保有しておくことは現実的ではない。そのため、敷地内へのシームレスな自動走行を実現させるためには、必要に応じて地図データを配信する技術が必要になる。

そこで本研究では、各敷地管理者がそれぞれ敷地内の地図を保有することを仮定して、敷地内へ進入してくる自動運転車両に対して地図を配信する技術の確立を目指して、シミュレーションベースで技術検証を実施した。

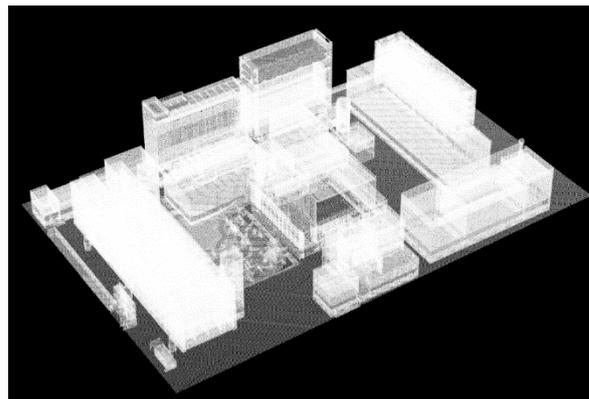


図-1 敷地内の点群地図

2. 地図配信プロトタイプシステムの構築

2.1 概要

自動走行中に地図データを配信してもシームレスに公道から敷地内に継続して自動運転が継続できることを確認するために、提案する地図配信技術を自動運転シミュレータに組み込んだプロトタイプシステムを構築する。

2.2 自動運転のシミュレータ

自動運転のシミュレータは、自動運転の制御システムと、空間を構成し環境を構築するツールからなる。

自動運転の制御システムには、Autoware.AI²⁾を採用した。Autoware.AIはThe Autoware Foundationが開発した自動運転システム用オープンソースソフトウェアで、車両に搭載されたカメラやセンサー等の情報や予め読み込んだ地図の情報を基に、物体や障害物の認知、経路作成、走行制御等の自動走行に必要な処理を実行するものである。予め読み込んでおく地図は、自車両の位置を推定するために必要な点群地図と、車両が走行するための経路地図の2種類が必要となる。

自己位置推定の手法はMagnussonのNDT(Normal-Distributions Transform) scan matching³⁾を採用している。NDT scan matchingでは、車両のLiDARが照射する点(以下、入力点)と点群地図中の点(以下、参照点)との整合度合いを計算する際に、点群地図をいくつかの格子に分割し、各格子中の参照点を正規分布で近似し、参照点の分布と入力点との距離の総和を最小化する並進と回転のパラメータを求める。このパラメータによって座標変換された入力点の確率密度関数の全格子分の総和を現在パラメータの評価値(以下、score)として、ニュートン法⁴⁾を用いて変換パラメータを更新する。

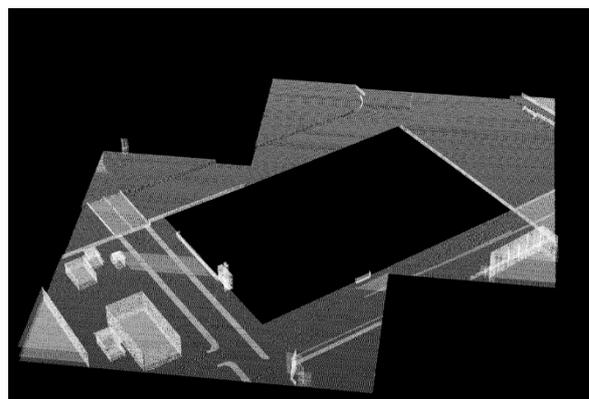


図-2 敷地内データを除去した公道の点群地図

更新したパラメータで再度入力点を変換し score を計算するフローを、score が収束するまで反復計算することで、自己位置推定を行う。

空間を構成し環境を構築するツールには、LGSVL Simulator⁵⁾を採用した。LGSVL Simulatorは、LG Electronicsが開発したゲームエンジンであるUnityをベースとしたマルチロボットシミュレータであり、都市レベルの大規模な空間モデル上で物理計算を行うことや、歩行者や対象車両以外の車両をNPC(Non Player Character)として表現することが可能である。Autoware.AIと連動して車両に搭載されているLiDAR等のセンサーをシミュレートすることも可能であり、デジタルツイン上で安全に自動運転走行が可能かを検証するのに適している。

シミュレーション空間を構成するためには対象空間の3Dデータが必要となる。今回のシミュレーションの対象空間は東京都内の複数棟を有する敷地および周辺道路としており、空間を構成するデータとして、敷地内の地図データは敷地所有者が独自に作成したBIMデータを変換したもの、周辺道路の地図データは株式会社ゼンリンの3D地図データオンライン提供サービス⁶⁾によって提供される3D地図オブジェクトを採用した。図-1に敷地内の点群

地図、**図-2**に敷地周辺の点群地図、**図-3**にシミュレータ実行時の様子をそれぞれ示す。

2.3 データ通信

一般的に点群地図は大容量データであるため、一括でデータを送信するのではなく分割してデータを送信できる通信プロトコルが望ましい。そこで本技術では、自動運転の走行に支障をきたすことなく地図を送信するために、TCP(Transmission Control Protocol)とUDP(User Datagram Protocol)の組合せを採用する。すなわち、車両と点群地図配信サーバの接続を確立させる段階には信頼性の高いTCPを採用し、速度とリアルタイム性が求められる地図の転送にはUDPを採用する。点群地図配信/受信のシーケンスを**図-4**に示す。経路情報地図に関しては、データサイズが非常に小さいため、データ転送に広く用いられるFTP(File Transfer Protocol)を採用する。また、地図を配信するトリガにはジオフェンスを想定する。ジオフェンスは、空間上に仮想的な境界線を設定して、境界線内への出入りを検知するための技術であり、これによって敷地の入口に近づいた車両を判別して地図配信することが可能になる。今回は、敷地側がジオフェンスで地図送信を制御する代わりに、車両が位置情報に基づいて地図を要求する仕組みとして実装した。

2.4 通信負荷テスト

構築したシステムにおいて地図データを送信するサーバや地図データを受信する車両のPCにかかる負荷を把握するために、シミュレーションの対象空間の点群地図よりも容量が大きいテスト用の点群データを送受信するテストを実施した。また、将来的に対応が必要となる複数台の自動運転車両にデータを配信する際の影響についても検討するため、地図配信サーバ1台に対して、地図を受信する有線LANで接続されたクライアントPCを2台用意し、単体のクライアントと通信した場合と2台のクライアントと同時通信した場合の、データ転送速度や地図データ通信プログラムの処理時間の差異を確認した。**表-1**に通信負荷テストの環境設定を示す。

表-1の環境設定でサーバに対してクライアントA及びクライアントBで単体アクセスした場合と、A、B同時にアクセスした場合のデータ送受信結果を**表-2**に示す。クライアントからサーバに単体アクセスした場合の結果はいずれも等しく

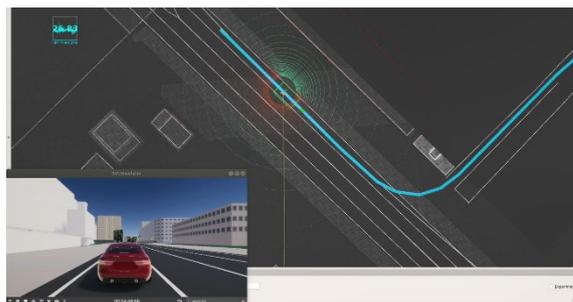


図-3 シミュレータ実行時画面

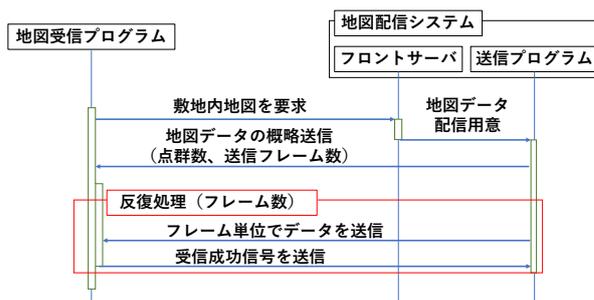


図-4 点群地図配信/受信のシーケンス

表-1 通信負荷テスト環境の設定

サーバ	CPU	Intel(R) Core(TM) i3-9100 CPU 3.60GHz
	メモリ	64GB
クライアント A	CPU	Intel(R) Core(TM) i7-3820 CPU 3.60GHz
	メモリ	16GB
クライアント B	CPU	Intel(R) Core(TM) i3-9100 CPU 3.60GHz
	メモリ	32GB
配信データ	point数	54,634,699
	データ量	625.2MB

表-2 通信負荷テストの結果

項目	クライアントからのアクセス	
	単体	2クライアント同時
サーバCPU 使用率 (%)	12~34	12~42
サーバメモリ 使用率 (%)	1.3	2.6
クライアント側の 地図受信の 処理時間 (秒)	68.4	136.7
クライアントの データ受信量 (MB)	781.6	781.6
クライアント側の データ転送速度 (Mbit/秒)	91.4	45.7

なった。また、同時通信クライアント数が倍増することで、クライアント側のデータ転送速度が半減し、クライアント側の地図受信の処理時間やサーバ全体のメモリ使用率が倍増した。サーバ全体のCPU使用率はピーク使用率が8%増加した。

2.5 考察

クライアント A、クライアント B それぞれでサーバに単体アクセスした場合の送受信結果が等しいことから、クライアントの PC 性能の違いはこの環境では通信負荷に大きな影響を与えないことが分かった。また、単体通信時と同時通信時において、プログラム処理時間やデータ転送速度が同時アクセス数と比例関係にあることから、ネットワーク部分がボトルネックであると考えられる。今回構築するプロトタイプシステムでは対象車両の台数が少ないため通信に問題はないが、複数車両に対して一斉に地図データを配信するためには通信システムの改良が必要になる。

3. 地図配信システムによる自動運転シミュレーション

3.1 シミュレーションによる技術調査

自動運転の地図には自車両の位置を推定するために必要な点群地図と、経路計画のために必要な経路地図の 2 種類がある。点群地図はデータ量が多いため、走行中にデータを受信した際に自己位置推定の計算負荷が高まることが予想される。また、敷地内の経路地図が途中で配信された場合、車両の目的地を敷地入り口の仮目的地から敷地内の最終目的地に再設定する必要があるため、経路計画の変更が実際の走行に間に合わなくなる可能性もある。したがって、それぞれの地図を合わせて配信した際に自動運転にどのような影響があるかを確認する必要がある。さらに、実際に地図配信システムを実装する場合には、車両と敷地内のサーバ間の通信環境を整備する必要がある。

そこで本章では、2 章で構築した地図配信プロトタイプシステムを用い、自動走行中に地図を配信する際のタイミングが走行安定性(自己位置推定やステアリング角度、速度変化)に与える影響についてシミュレーションで検証する。

3.2 シミュレーション設定

地図配信システムが自動走行に与える影響を確認するために、公道から敷地内の駐車スペースに向かって最高速度 6 km/h で自動走行するシナリオをベースに、シミュレーションを実施する。図-5 のように公道上に車両(図中の赤緑の円)が停止した状態で、敷地周辺の地図のみを保持した状態を初期状態とし、その後敷地入口に到達するまでに敷地内の地図を配信(図-6)して、シミュレー

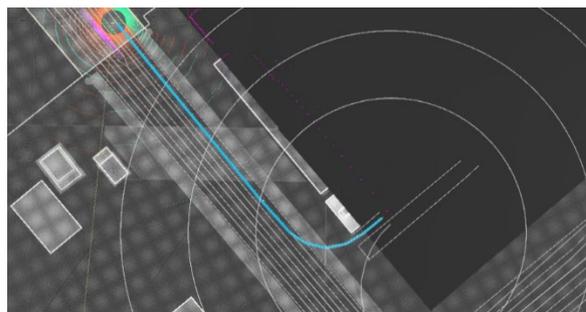


図-5 敷地内地図配信前

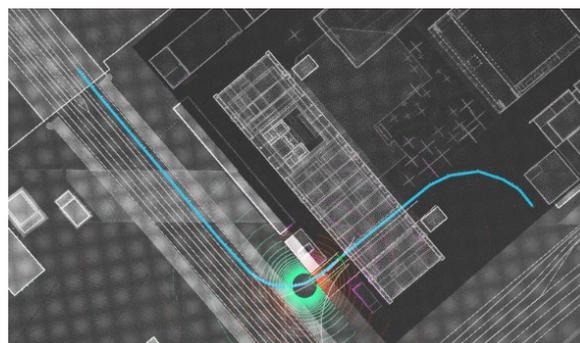


図-6 敷地内地図配信後

表-3 ジオフェンス半径別の完走成功率

ケース	実施数	完走数 (成功率)
半径40m	7	0(0%)
半径60m	7	5(71%)
半径80m	7	4(57%)

ション上の車両の挙動を確認する。ここで、図-5、図-6 中の青線はその時点で保持している経路地図の走行目的地までの経路を示している。また、地図を配信するのに適切なタイミングを調査するために、敷地入口を中心とした半径の異なる同心円状の複数のジオフェンスを設定し、ジオフェンスの通過を配信開始タイミングとしたケーススタディを実施する。なお、ジオフェンスは図-5 中の同心円で示すように、敷地入口から半径 40 m、60 m、80 m の計 3 ケースを対象とする。

3.3 シミュレーション結果

各ケースについて 7 回走行シミュレーションを実施した結果を表-3 に示す。ジオフェンスの半径 40m のケースは一度も完走しなかった。

次に、もっとも完走率の高かった半径 60 m のケースの未完走も含む全 7 回の走行時のステアリング角 [rad] と速度 [km/h] のログデータをそれぞれ図-7、図-8 に示す。ステアリング角が正の値は左折方向、負の値が右折方向を表しており、

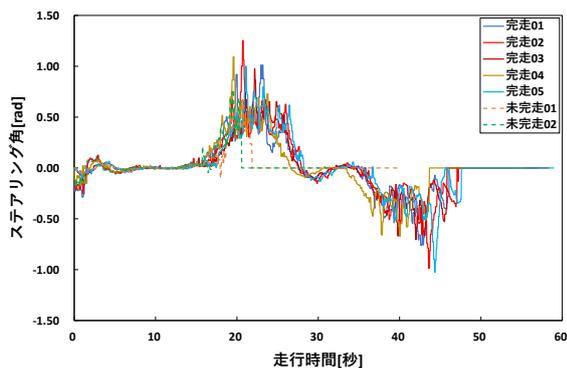


図-7 半径 60m ケースのステアリング角ログ

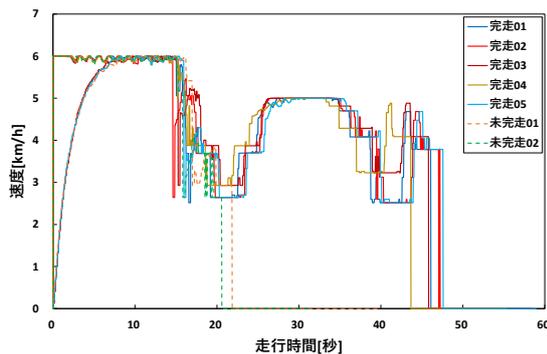


図-8 半径 60m ケースの速度ログ

図-7では正の方向、負の方向でそれぞれ大きいピークが表れている。これはそれぞれ敷地進入時の左折時と敷地内の駐車スペースへ向かう右折時のステアリング角を示している。図-8では、走行開始直後の加速している区間と、速度が6km/hまたは5km/hで安定している区間が直線走行時、それ以外の加減速している区間がカーブ走行時を表している。なお、図-7および図-8中の破線は、自己位置推定に失敗した未完走時のログデータを示している。走行開始から15秒が経過して左折を始めるまでは完走したケースとの差は見られないが、左折開始から5秒ほど経過した時点でステアリング角および速度の値が0になっている。

さらに、走行に失敗した半径40mの1ケースの自己位置推定結果を図-9に、完走した半径60mの1ケースおよび半径80mの1ケースの自己位置推定結果をそれぞれ図-10、図-11に示す。図中の実線はNDT scan matchingのscoreを表している(左縦軸)。この値は基本的に0に近づくほど、自己位置推定が安定していることを示す。緑の星印は自己位置推定計算中のループ計算部分の反復回数を示し(右縦軸)、反復回数が少なければ自己位置推定が安定していることを示す。また、地図データを受信したタイミングについてもグラ

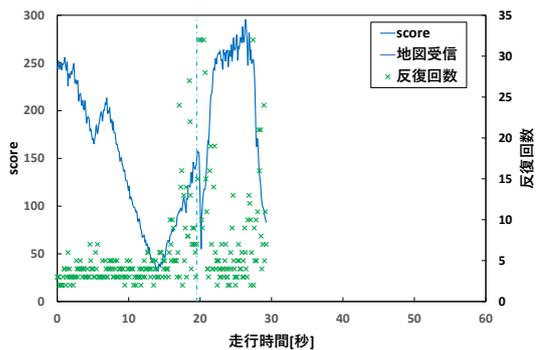


図-9 半径 40m の自己位置推定結果

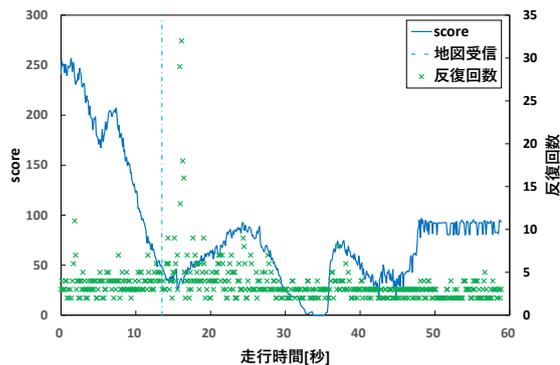


図-10 半径 60m の自己位置推定結果

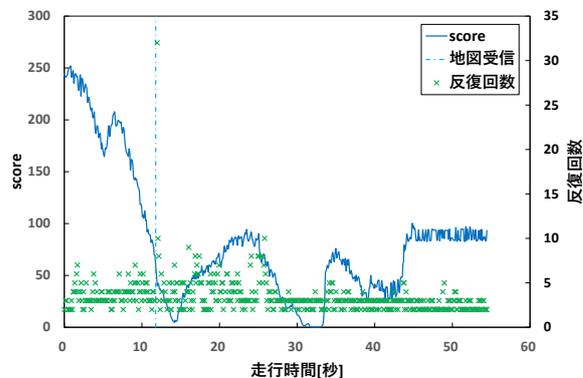


図-11 半径 80m の自己位置推定結果

フ中に一点鎖線で示している。

図-9の完走できなかったケースでは、地図を受信した直後からscoreおよび反復回数の値が急激に上昇し、走行開始時の値を超過した後、計算が完了せずに自己位置推定の計算が不能となった。図-10、図-11の完走したケースでは、走行を開始した直後からscoreが減少し、その後15秒付近までscoreが減少し続ける区間はシミュレーション上で公道上の直線を走行しており、自己位置推定も安定している。その後の25秒付近までのscoreおよび自己位置推定の反復計算が増加している区間は、シミュレーション上で左折中のタイ

ミングと一致している。また、完走したケースであっても地図受信直後は自己位置推定計算の反復回数が増加した。

3.4 考察

3.3節より、図-7、図-8のステアリング角および速度のログについて、未完走を除いた5つの走行ログデータは、公道から敷地内への左折進入及び施設内の駐車スペースへの右折といったシミュレーションで設定した走行シナリオ通りに完走していることを示しており、地図配信が車両の走行挙動に与える影響は小さいことが分かった。

また、図-10、図-11の完走したケースについて、地図データ受信直後の数秒間はscoreが増加せず反復計算の回数が増加していることから、走行中の地図受信が自己位置推定に与える影響は少ないことを示唆している。一方で、完走できていない図-9のケースでは、地図受信直後にscoreおよび反復計算の回数がともに増加している。さらに地図受信のタイミングがカーブ走行時と一致しており、カーブ走行後の点群地図が存在しない敷地内空間に突然敷地内の点群地図が出現し、自己位置推定時の空間の格子化や点群の正規分布化の計算量及びニュートン法によるパラメータ更新の反復計算回数が急増することで、自己位置推定の計算が収束しないため、走行に失敗する。まとめると、①カーブ走行時に計算負荷がかかる、②LiDARがスキャンしている自己位置推定範囲の点群地図に大幅な変更があると負荷がかかる、ということが分かる。したがって、カーブ等の自己位置推定計算の負荷が高い状況下での走行中は、計算量を急増させる事象を避けるべきである。

4. おわりに

本研究では、地図配信技術の確立を目的とした地図配信システムの構築及び自動走行シミュレーションによる検証を行った。今回構築したプロトタイプシステムによって単独車両が公道から敷地内の地図を持たない状態で自動走行を開始し、走行中に敷地内の地図を受信しても自動走行を継続できることを確認した。特に、ジオフェンスを用いたケーススタディによって、地図を配信するタイミングが重要であり、自己位置推定の計算負荷が高い状況、今回の例ではカーブ走行時に地図が受信されるようなタイミングを避けるべきということがわかった。具体的には、LiDARがスキャン

している範囲に点群地図を配信予定の空間が重なる前に地図データを送信しておくことが有効だと考えられる。さらに、ケーススタディの結果から、ジオフェンスの範囲が広がるほど走行が安定するとは限らないため、サーバから車両に通信する場合の通信機器の設置場所や電波強度に必要以上にバッファを持たせなくても、走行中の車両が地図配信によって予め保有している点群地図に大幅な変更が生じないエリアで地図を送信できれば自動走行を安定させられる可能性がある。今後は、より少ない設備投資で本システムを実装するための最適な通信機器の配置や電波強度についての検証や、地図配信に最適なタイミングの精査に取り組む必要がある。

また通信部分の課題として、現状のシステム構成ではサーバから地図を同時に配信する車両が増えるほどデータ転送速度もそれに比例して遅くなるため、実装段階に向けて転送速度の低下を防ぐ対策を考えなければならない。解決策の一つとして、ブロードキャスト配信を採用したデータ配信方法がある。ブロードキャスト通信では特定の相手を指定せず、同一ネットワーク内の全ての機器に向けて一斉にデータ送信をするため、複数の車両に対して並列処理でデータ送信が可能になる。今後は、地図配信システムの複数車両対応に向けて、ブロードキャスト配信の組み込みについても検討していきたい。

<参考文献>

- 1) DM2.0 コンソーシアム：“DM2.0 プラットフォーム通信アーキテクチャ (ACCEAN) の研究”，<https://www.nces.i.nagoya-u.ac.jp/dm2/ACCEAN20180806.pdf>, 2018
- 2) The Autoware Foundation：“Autoware.AI”，<https://github.com/Autoware-AI>, 2019
- 3) Magnusson, M.：“The Three-Dimensional Normal-Distributions Transform — an Efficient Representation for Registration, Surface Analysis, and Loop Detection”，PhD dissertation, Örebro universitet, 2009
- 4) 山本哲朗：“Newton 法とその周辺”，日本数学会「数学」，37, pp.1-15, 1985
- 5) LG Electronics Inc：“LGSVL Simulator”，<https://github.com/lgsvl/simulator>, 2020
- 6) 株式会社ゼンリン：“3D 地図データオンライン提供サービス”，<https://www.zenrin.co.jp/product/category/gis/contents/3d/index.html>, 2019