

【研究ノート】

「ヒト・モノ協調型のスマートモビリティ社会」 に関する研究報告

辻野雅之・内埜大斗・水上憲明・山口直彦

Research Report on “ Smart Mobility Society based on Human-Object Coordination ”

Masayuki Tsujino, Hiroto Uchino, Noriaki Mizukami, and
Naohiko Yamaguchi

Abstract: We aim to realize a “ smart mobility society based on human-object coordination” within the framework of the envisioned smart society in Society 5.0. This paper presents the current status of our research efforts, with a focus on simulating transportation planning for online demand-responsive transport (DRT) as an essential aspect of the research aimed at achieving our goals.

Keywords: smart mobility society, online demand-responsive transport (DRT), numerical simulation

1 はじめに

Society5.0 [1] が目指すスマート社会の到来を見据えつつ、「ヒト・モノ協調型のスマートモビリティ社会」という構想のもと、その概念の有効性検証を行っている [2]。そこでは、自動運転車・自律飛行 Drone のような自律的に移動する機器・装置（“AMO：Autonomous Mobile Object”）が重要な役割を果たす。社会システム全体での視点で、AMO を効率的に制御する方法が課題となる。このため、我々は、広域に展開された 5G による通信環境、高度化された IoT 技術、クラウド・エッジのサーバ技術を利用して、図 1 に示す 2 つの異なるタイムスパン（秒未満・分以上）で AMO を制御することで管理対象の社会システムを最適化することに関心がある¹⁾。

本稿では、この「ヒト・モノ協調型のスマートモビリティ社会」の研究状況の説明として、都市レベルでの最適化を狙いとする「オンデマンド交通の輸送計画シミュレーション」を中心に検討状況を示す。

1) 図 1 では、AMO に加え、本構想で制御対象とするヒトが操作する装置（図中、“HDO：Human-Driven Object”）も記載しているが、本稿の本文では HDO には言及しない。

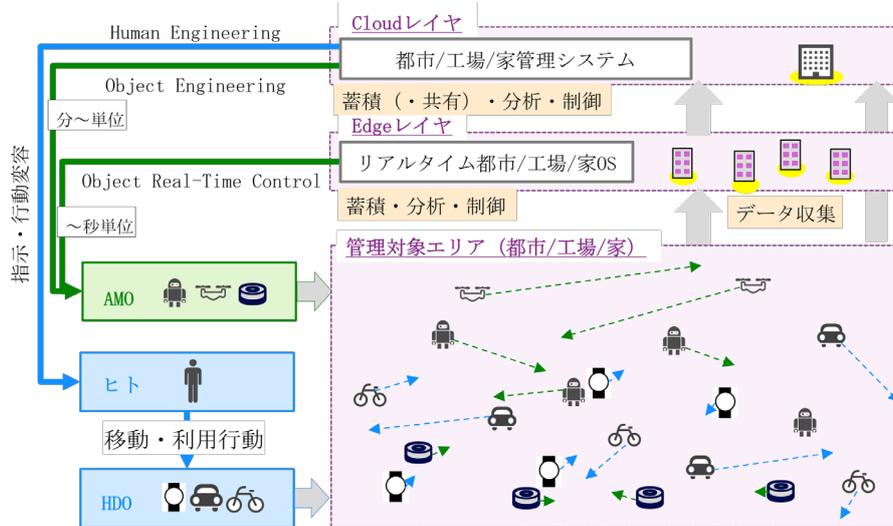


図1. システムイメージ

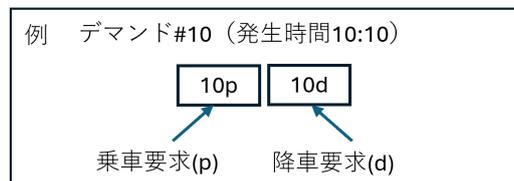
2 輸送計画シミュレーション検討状況

本章では、交通流シミュレータのオープンソースソフトである Simulation of Urban Mobility (SUMO) [3] を用いて行った輸送計画法の数値実験評価について説明する。

2.1 オンデマンド交通の輸送計画

マイカーに代わる高齢者向けの近距離移動手段として、オンデマンド交通が注目を集めている [4]。オンデマンド交通は、利用者からの要求（デマンド）に応じて乗り合いでの輸送を行うサービスである。随時発生するデマンドでは、利用者が乗車地点・降車地点を指定する（図2 参考）。輸送車には、デマンドの乗車地点まで利用者を迎えに行き、そこで利用者を乗せて、降車地点まで送り届けることが求められる。

デマンドは随時発生する
デマンドでは乗車地点・降車地点が指定される



※乗車要求・降車要求は地点を含む
(説明では、乗降順序のみに言及するので記載省略)

図2. デマンドの構成

このサービスを、複数の輸送車と、それらに対して以下の輸送計画・経路計画に沿った割当を行う制御装置からなるシステムで提供する。

輸送計画 各利用者を輸送する輸送車の割当、及び、各輸送車での利用者の乗降順序割当を行う。

経路計画 輸送車が、利用者の乗車・降車する地点間を移動する経路を選択する。

本研究では、経路計画は道路網の構成から自動的に求められる地点間の最短経路を選択するものとし、システムで発生するデマンドをどの輸送車に割当て、乗車・降車地点をどのような順序（乗降順序）で走査するかという輸送計画を対象とする。

輸送計画に対しては、以下の前提を置く（図3参考）。

- 新規にデマンドが発生した時点で輸送計画を実行する（策定された計画に基づき割当を行う）。
- 既に輸送車に乗っている利用者は、その利用者が指定する降車地点まで送り届ける（利用者を途中で降ろし、他の輸送車へ乗り換えさせない）。
- デマンド発生から所定の時間迄に乗車地点に利用者を迎えに行く必要がある（所定時間内に迎えにいけないデマンドはキャンセルされる）。
- 各輸送車はその定員を超えた人数の利用者を乗せられない。
- 未発生デマンドに対する情報を持たない（そのため、将来発注するデマンドの内容を踏まえた輸送計画は策定できない）。

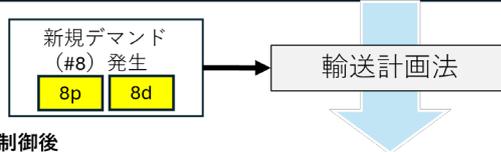
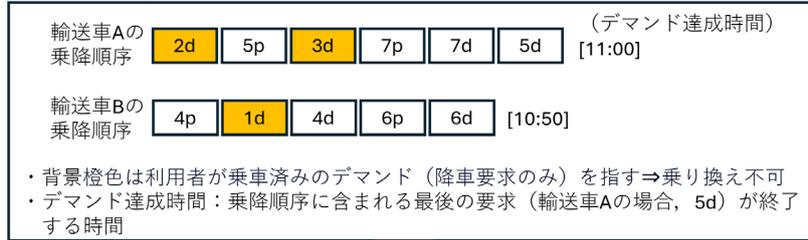
この前提の上で、以下に示す4つの輸送計画法（従来法 [ex1]、提案法 [ex2-4]）を比較評価対象とする。

ex1：逐次最適挿入法（従来法） 逐次最適挿入法 [5] では、既存のデマンドに対しては、輸送車／乗降順序割当の見直し（再割当）を行わない。その上で、新規デマンドを受け入れるために、その乗車・降車要求を挿入する既存の乗降順序での最適な位置を探索する。これは、全ての挿入可能な位置について挿入後のデマンド達成時間を計算し、そのデマンド達成時間が最も早い位置に挿入して新たな輸送計画を策定する（図4参考）。

この逐次最適挿入法では、各輸送車への利用者の再割当を行わず、既存の乗降順序の挿入位置に新規デマンドの乗降位置を割当てただけである。このため、輸送車内に閉じた割当と捉えることができる。さらに良い割当とするためには、この割当の範囲を拡張することが有効である。そこで、未乗車の利用者に対して割当てた輸送車を変更するよう輸送車間へ割当の範囲を拡張する。

図5で示すように、新規デマンドの発生時に拡張範囲とする輸送車を選択し、それらの輸送車に割当済みのデマンドを1つ選び、その選定デマンドを新規デマンド同様に逐次最適挿入法で割当てし直す「輸送車間再割当法」を提案する。逐次最適挿入法では、どのように新規デマンドが発生しても、一旦、輸送車に割当てた利用者を変更することはなかった。提案法では、新規デマンド発生時点で随時この再割当を行うことで、輸送計画が隘路に入り込むのを防ぐ効果を狙いとしている。

制御（割当・選択）前



制御後

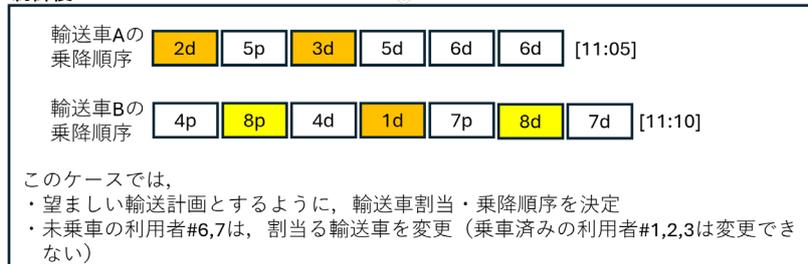
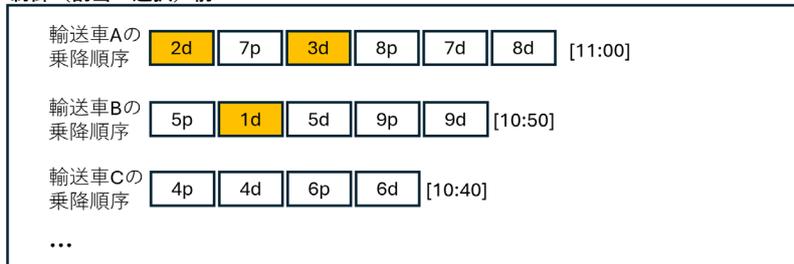


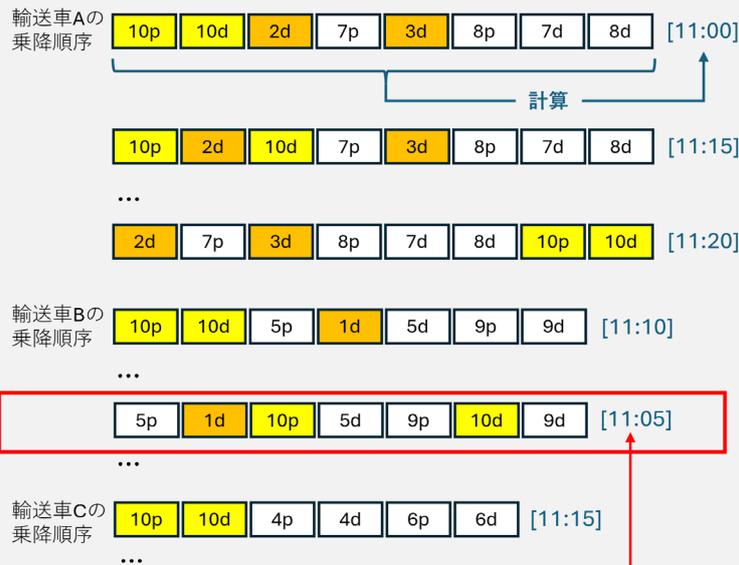
図 3. 輸送計画

制御（割当・選択）前



逐次最適挿入法:ex1

Step1. 新規デマンドの乗車/降車要求を既存の乗降順序の挿入可能な全ての位置に挿入する。なお、ここでの挿入可能性を定める要因は、輸送車の定員を超えないか、所定時間内に新規デマンドで指定する乗車地点に迎えに行けるか、及び、降車要求に先駆けて乗車要求に応えられていることである。その際、新規デマンド挿入後の乗降順序のデマンド達成時間を計算する。



Step2. 新規デマンド挿入後に計算した デマンド達成時間が最も早い挿入位置 に基づき、乗降順序を変更する。

制御後

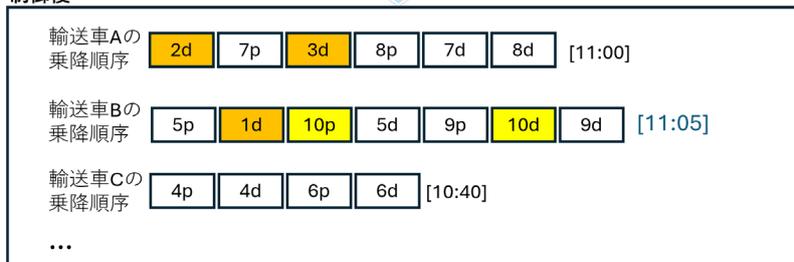
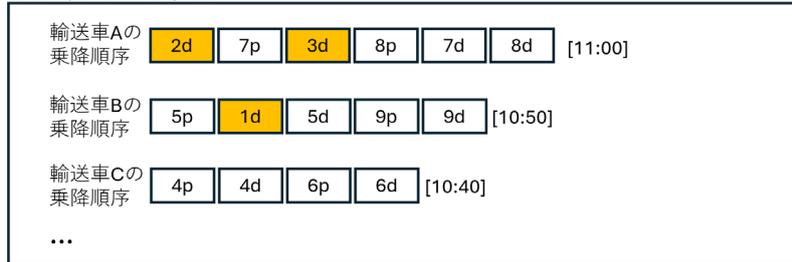


図 4. 逐次最適挿入法

制御（割当・選択）前



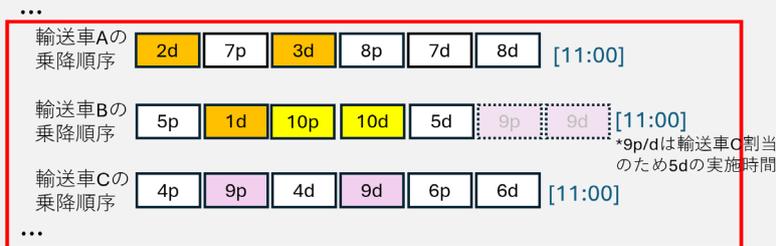
輸送車間再割当法:ex2-4

Step1. 逐次挿入最適法で新規デマンドを割当る輸送車を含む複数台の輸送車を選定する（選定法が、ex2-4で異なる部分）。
 ⇒以下に示す例では、輸送車A～Cが選定されている。
Step2. 選定輸送車に割当られているデマンドより、再割当可能なデマンドの内、まだ再割当の対象となっていないデマンドを選ぶ。デマンドが選択できたときはStep3に、再割当対象となっていないデマンドが無いときはStep4に移る。



7p 7d 再割当対象デマンド (#7)

Step3. 再割当対象デマンドと新規デマンドの乗車／降車要求を順に、選定輸送車の全ての挿入可能な位置に挿入する。その際、新規デマンド挿入後の乗降順序のデマンド達成時間を計算する。終了したら、Step2に移る。



Step4. 選定輸送車の最遅のデマンド達成時間が最も早い挿入位置に基づき、乗降順序を変更する。

制御後

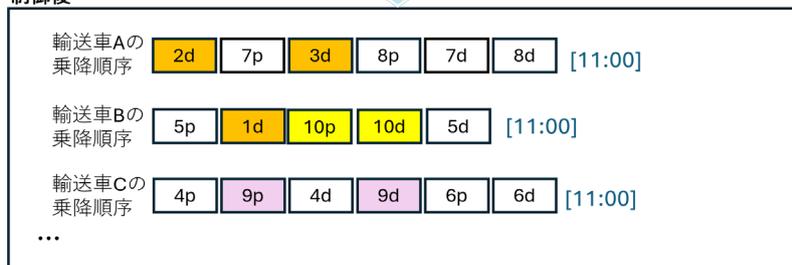


図 5. 輸送車間再割当法

割当範囲の拡張はより良い割当が求まる可能性が得られる反面、走査する輸送車の台数が増えたときに輸送計画に要する計算負荷が大きくなるという問題がある。そこで、計算時間を短縮させるため、再割当対象とする輸送車を絞り込む（ex3,4）ことを検討する。輸送車間再割当法として、再割当対象とする輸送車の選定法に応じた以下の3つの方法を比較評価対象とする。

- ex2：輸送車間再割当法（全輸送車選定）システム上の全輸送車を対象とする。輸送車の台数によっては、計算負荷が課題となる。
- ex3：輸送車間再割当法（逐次最適挿入法選定）逐次最適挿入法を行い、後述するデマンド達成時間の評価尺度で上位に評価される輸送車を目標とする台数分選定する。
- ex4：輸送車間再割当法（ランダム選定）全ての輸送車から、目標とする台数分の輸送車をランダムに選定する。

2.2 評価条件

本節では、SUMO を用いて行ったシミュレーションの条件について説明する。図6に示す、各辺200mで格子状に構成された道路網上を5台の輸送車が走査する。各輸送車の定員を4人とする。乗車人数を1人とするデマンドが、60秒毎にシステムで発生する。なお、デマンド発生から1,800秒（30分）以内に乗車地点に利用者を迎えにいけない場合、そのデマンドはキャンセルされる。本来、デマンド発生次第、輸送計画法に基づく割当制御を行うことを想定しているが、本シミュレーションでは実装の便宜上30秒間隔で周期的に新たに発生したデマンドに対する輸送計画を実施する。なお、この輸送計画実施の周期は、シミュレーション条件としている60秒間隔のデマンド発生頻度より短いため、一度の周期で割当制御対象となるデマンドは最大でも1件である。

輸送計画の評価であることを意識し、道路網には本システムで対象とする輸送車（5台）しか存在しない、また、交差点には信号を設置しない。ex3,4では、それぞれの方法に則り、再割当対象の輸送車を5台から3台に絞り込む。

その上で、実際の道路網での状況を模した評価とすべく、(1) 輸送車の速度は一定では

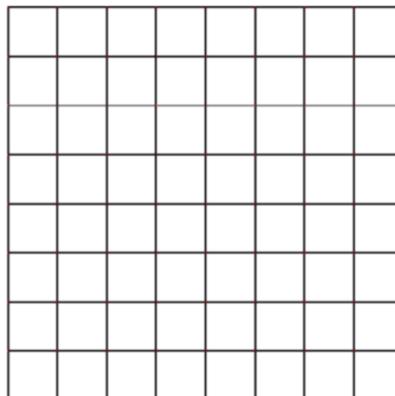


図6. シミュレーション対象の道路網

なく、所定の最高速度（30km/時）を守りつつ交差点で加減速を行う、(2) 輸送車は、利用者の乗降時に 60 秒間停車する、という走行ルールを適用する。

2.3 評価結果

本節では、シミュレーションで行った、4つの輸送計画法の評価結果について説明する。前節で示す条件のもと、シミュレーション時間を 10,000 秒とし、この間で 60 秒間隔での 150 件のデマンドを発生（最後の 1,000 秒はデマンド未発生）させ、評価対象とする ex1-4 の輸送計画法を適用した場合のシミュレーションを行った。なお、シミュレーションでは、以下の評価指標に基づき、輸送計画法を評価した。

処理時間 (Handling Time) シミュレーション実行から終了までにかかる時間。新規デマンドに対して輸送計画策定による割当制御に要する処理時間の概算に活用。

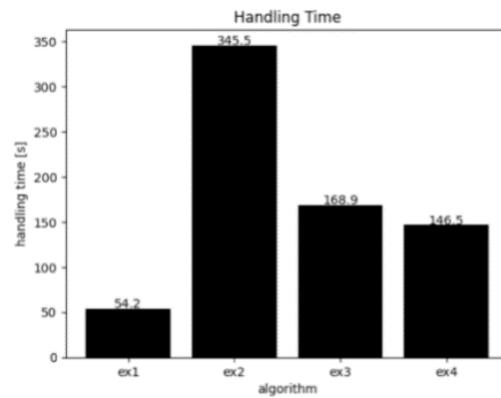
デマンド達成率 (Demand Achievement Rate) 発生したデマンドの内、シミュレーション時間内に、降車地点に送り届けられたデマンドの割合。キャンセルされたデマンド、時間切れになったデマンドがどのくらい少ないかを示す指標。

平均デマンド完了時間 (Average completion Time) デマンドが発生してから降車地点へ送り届けるまでに要する時間の平均。

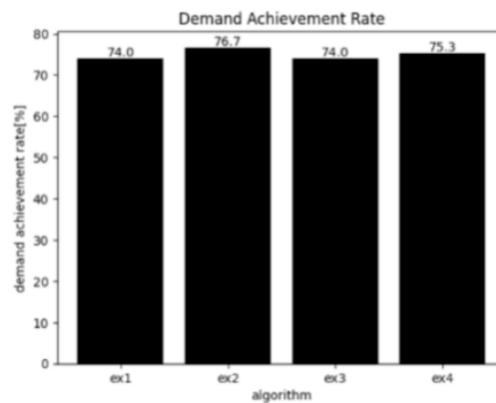
これまでに説明した条件によるシミュレーションの評価結果を図 7 に示す。この図は、10,000 時間のシミュレーションを 10 回実施した時の評価指標の平均値を示す。

図 7(a) で示す処理時間は、150 件のデマンドに対する輸送計画法の実行、10,000 時間のシミュレーションの実行、評価指標算出に関する計算時間を含む。この計算時間の大部分が輸送計画実行に要する計算時間であるため、この指標を用いて各輸送計画法の計算負荷を概算する。図 7(a) より、輸送車間再割当法による 3 つの輸送計画法は、逐次最適挿入法(処理時間:54.7 秒)と比べ、輸送計画法実行に計算時間を要していることが分かる。これは、「輸送車間に割当の範囲を拡張」したことに伴うものである。全輸送車を再割当対象とする ex2 の処理時間は、再割当対象が全輸送車 (5 台) のため、処理時間が最大 (345.5 秒) となっている。それに対し、再割当対象とする輸送車を 3 台に絞り込んでいる ex3, 4 は、割当範囲拡張に伴う計算負荷への影響は限定的 (ex3:168.9 秒、ex4:146.5 秒) である。ただし、この処理時間は最大である ex2 でも、新規デマンド 1 件当たりの輸送計画に要する時間が 2.3 秒 (345.5 秒/150) 程度である。リアルタイム性を要求しない適用シーンを踏まえると、この程度のシステム規模であれば輸送車間への割当範囲の拡張による輸送計画の計算負荷は問題ではない。しかし、ex2 と ex3,4 との計算時間の比較から類推されるように多くの輸送車からなるシステムでは、再割当対象の輸送車の台数を絞り込むことが有効になる。

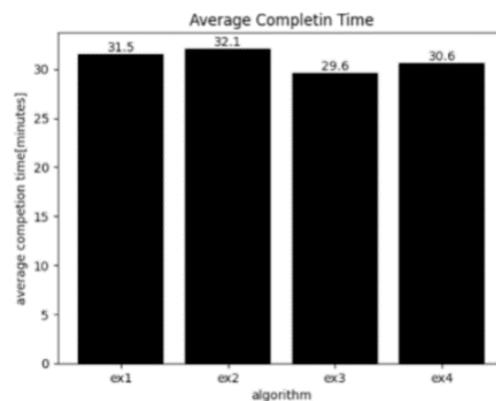
次に、図 7(b) によるデマンド達成率より、輸送車間再割当法がデマンドをキャンセルする割合を低下させる効果 (ex1:74.0% → ex2:76.7%, ex3:74.0%, ex4:75.3%) があつたことが分かる (ex3 のデマンド達成率は、ex1 と同じ)。また、図 7(c) による平均デマンド完了時間より、輸送車間再割当法の内、ex3,4 については ex1 より平均デマンド完了時間が短い。ex2 については、ex1 より平均デマンド完了時間が長い。これは、ex2 では広い範囲に拡張して良い割当を探し高いデマンド達成率を実現したため、輸送に時間を要す



(a) 処理時間



(b) デマンド達成率



(c) 平均デマンド完了時間

図 7. 数値シミュレーションの評価結果

るデマンドがキャンセルされなかったことによるものである。これより、提案した輸送車
間再割当法は、従来法である逐次最適挿入法より輸送計画の効率性を向上させることがで
きる事が分かった。

デマンド達成率の観点から、再割当対象の輸送車の絞り込みを行った場合は、全輸送車選定の場合程の効果は得られなかった。しかしながら、デマンド達成率・平均デマンド完了時間の両観点から、ある程度、輸送計画を効率化することができた。再割当対象の輸送車の絞り込み法は、デマンド達成率の観点からはランダム選定 (ex4) が、平均デマンド完了時間の観点からは逐次最適挿入法選定 (ex3) が良好な性質を示している。この2つの輸送車選定法は、2つの評価指標にてどちらかが優越するものではなく、比較不可能な関係にある。但し、前に述べた通り、システムのスループットに供するデマンド達成率を重視するという考えに則れば、ランダム選定が望ましいとも捉えられる。この結果は、輸送車間再割当法 (逐次最適挿入法選定) で、前処理とする逐次最適挿入法の結果に基づき選定した割当の効果がありそうな輸送車の選択が効果的でないということを意味している。今回は、1次分析に過ぎないため結論を導くには早計であるが、輸送車のランダム選定が元の輸送計画と特性が全く異なる輸送車を再割当の対象として選び出すことで隘路に陥るのを防いでいる効果によるものと類推している。

3 その他の検討状況

前章で報告した数値シミュレーション以外に、実機評価を見据えて実施している研究状況を以下で示す。

概念検証の内容検討 AMO と見立てた複数のロボット掃除機の制御に関する、概念検証のためのデモ内容 (複数機での連携による地図作成等) を検討した。

実機動作検証 LiDAR を搭載したロボット掃除機をゲーム用コントローラで遠隔操作し、ビルのフロア内を走査しながらフロア地図を作る機能を実装し、動作確認を行った (図8参考)。また、Edge と見立てた装置 (Jetson Nano) とロボット掃除機との間での通信用プログラムを作成し、通信接続とデータ送受信が行えることを確認した。

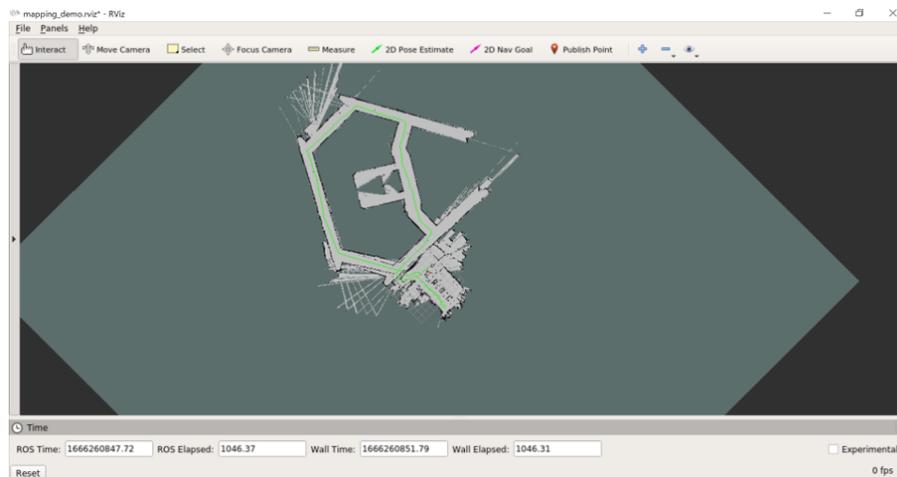


図 8. フロア地図作成の動作検証

4 おわりに

本稿では、「ヒト・モノ協調型のスマートモビリティ社会」の企画構想に基づき実施した検討の内、オンデマンド交通の輸送計画シミュレーションを中心にその検討状況を説明した。数値シミュレーションによる定量的検証と実験システムによる動作確認・概念検証の両面で、構想の有効性を確認しつつ研究を進めていく。

参考文献

- [1] 内閣府, Society 5.0
https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/ (2024年3月7日閲覧)
- [2] 辻野雅之, 水上憲明, 山口直彦, 根岸豊, 二村忍, 「ヒト・モノ協調型のスマートモビリティ社会」を目指して, 東京国際工科専門職大学紀要, 第2巻第1号, pp. 44-55, 2023.
- [3] SUMO, Simulation of Urban MObility
<https://eclipse.dev/sumo/> (2024年3月7日閲覧)
- [4] 日経BP ガバメントテクノロジー, オンデマンド交通サービス
<https://project.nikkeibp.co.jp/jpgciof/atcl/19/00003/00014/> (2024年3月7日閲覧)
- [5] 野田五十樹, 篠田孝祐, 太田正幸, 中島秀之, シミュレーションによるデマンドバス利便性の評価, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No. 1, pp. 242-252, 2008.

辻野雅之	東京国際工科専門職大学	工科学部	教授
内埜大斗	東京国際工科専門職大学	工科学部	情報工学科 4年
水上憲明	東京国際工科専門職大学	工科学部	情報工学科 講師
山口直彦	東京国際工科専門職大学	工科学部	情報工学科 助手