

【研究ノート】

「ヒト・モノ協調型のスマートモビリティ社会」 を目指して

辻野雅之・水上憲明・山口直彦・根岸豊・二村忍

Towards “Smart Mobility Society based on Human-Object Coordination”

Masayuki Tsujino, Noriaki Mizukami, Naohiko Yamaguchi,
Yutaka Negishi and Shinobu Nimura

Abstract: The smart society to be realized in Society 5.0 aims to solve various economic and social problems by collecting data from devices and equipment to be managed and utilizing the collected data to improve the efficiency of resource use. We are interested in realizing a “ smart mobility society based on human-object coordination ” in which humans and autonomously moving devices and equipment are appropriately coordinated to meet the mobility and transportation needs of society, considering the evolution of a smart society. Against this background, we are working on formulating specific research plans and extracting elemental technologies for the realization of this society in the near future. In this paper, we describe the main efforts we are currently making as part of this research project.

Keywords: smart mobility society, human-object coordination, cloud-edge computing, numerical simulation

1 はじめに

Society5.0 [1] が目指すスマート社会は、人工知能・IoT・クラウドなどの最新 IT 技術を活用することで、経済成長と、QoL (Quality of Life) の充実とを両立することを期待している。これは、管理対象の機器・装置に組み込んだセンサからデータを収集し、収集したデータの蓄積 (、共有)、分析、制御による一連のデータ活用のサイクル (本稿では、“IoT データ活用サイクル”) での処理により、スループット向上・資源効率化等の観点で社会全体を最適化することにより実現する。

将来的には、このスマート社会では、自動運転車・自律飛行 Drone 等の自律的に移動する機器・装置 (本稿では、“AMO: Autonomous Mobile Object”) が重要な役割を果たす。また、最近の IoT 技術の進展・5G の広域展開等により、クラウド・エッジなどに置かれた計算資源を用いて様々な機器・装置をリアルタイムに制御する環境が整いつつある。

我々は、この環境を用いて、都市・工場などの広域エリアで AMO を管理し、自律動作する AMO に対して様々なタイムスパンでの制御命令を発し、AMO が連携して与えられ

たジョブの実施をシステム全体で最適化することに関心がある。

この AMO 連携により最適化された「スマートモビリティ社会」のシステムは、当初は現在のヒトが操作する機器・装置（本稿では、“HDO：Human-Driven Object”）からなるモビリティ社会システムとは個別に形成される。しかし、スマートモビリティ社会の進展とともに、これら AMO 連携の社会システムに、徐々に HDO が加わることで「ヒト・モノ協調型のスマートモビリティ社会」に段階的に移行すると考える。そこでは、AMO と HDO との連携による、さらなる広範な社会システムでの最適化を図ることが課題になる。そこで、我々は、この課題を念頭に置き、「ヒト・モノ協調型のスマートモビリティ社会」の実現に向けて構想の具現化・概念の有効性検証・要素技術の抽出等を進め、並行して直近での具体的な研究目標の設定を進めている。

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」を目指した「研究企画」での検討状況について説明する。

2 構想の全体像

2.1 ユースケース

「ヒト・モノ協調型のスマートモビリティ社会」のシステムにおける要求条件を明確にするため、提供するサービスのユースケースを検討している。

技術的特異点 [2] に向かっているとも言われる現在の社会が、今後どのように変革するかを的確に予見することは難しくなっている。そのため、現在の視点での実用性・有用性に固執せず、将来への発展や今後の環境変化を見越して幅広く可能性がありそうなユースケースを抽出している。

我々が、検討しているユースケースの例を表 1 に示す。ここでは、都市・工場等の特定のエリアに属する AMO・HDO を管理対象とする。これら AMO・HDO に装着したセンサから取得したデータを 5G による低遅延の無線アクセス環境を通じて収集し、与えられたジョブをそれぞれの目的（表 1 に記載の「評価尺度（例）」に基づく効率性の実現等）に応じて最適化するシステムを考える。

表 1. ユースケース

No.	対象エリア	AMO	HDO	ジョブ	評価尺度（例）
ケース1	都市	自動運転車	自動車 （人が運転）	都市において人・物を運ぶ	移動時間 燃料代
ケース2	物流拠点・倉庫	自律搬送機器	搬送機器 （人が操作） 人	人／出庫時のスペース内での棚入れ／出し	棚入れ／出し時間 所定時間からの乖離
ケース3	工場・オフィス・家	ロボット 掃除機	掃除機 （人が操作）	エリア・フロア・部屋全体の清掃 （全体を走査・清掃）	清掃時間 時間当たり清掃面積

2.2 システム

本構想で想定するスマートモビリティ社会のシステムイメージを図1に示す。

都市・工場等の管理対象エリアで、与えられたジョブを効率的に遂行するように、複数のAMO・HDOを連携して制御する汎用的な基盤の構築を目指す。このため、エリア内で収集したデータを蓄積（・共有）・分析し、機器・装置の制御に反映させる、機器・装置の管理・制御を行なう情報基盤をクラウド・エッジ連携システム [3] で構築する。

エッジは管理対象エリアの直近に配置し、管理対象のAMO から得られた（局所的な）データを用いて秒未満の時間オーダー（理想的には、5G が想定するリアルタイム）で制御する汎用的な機能を有する「リアルタイム都市/工場/家OS」の機能を実装する。図1では、このリアルタイムOSを介したAMOに対する制御の流れを、“Object Real-Time Control”と呼ぶIoTデータ活用サイクルで示す。

この局所データに基づくリアルタイムでの制御に加えて、分以上のより長い時間オーダーでシステム全体を最適化に導く、“Object/Human Engineering”と呼ぶIoTデータ活用サイクルによる機器・装置の制御も実施する。“Object/Human Engineering”では、システム全体で取得したデータを活用するため、クラウドで実装する「都市/工場/家管理システム」の機能で、高速な最適化アルゴリズムを用いてシステム全体の最適解を求める。

“Object/Human Engineering”は、“Object Real-Time Control”によるリアルタイム制御を、より長期の時間オーダーでのシステム全体からの情報に基づく制御で覆うようにしてシステム全体の最適化へ導くことを狙いとしている。

このうち、“Object Engineering”は、AMO に対してリアルタイム制御を誘導するような長期スパンでの制御を施す。また、“Human Engineering”は、HDO を動作させるヒトに対する指示、または、行動変容をもたらす情報提供を通じて、HDO の動作を制御すること

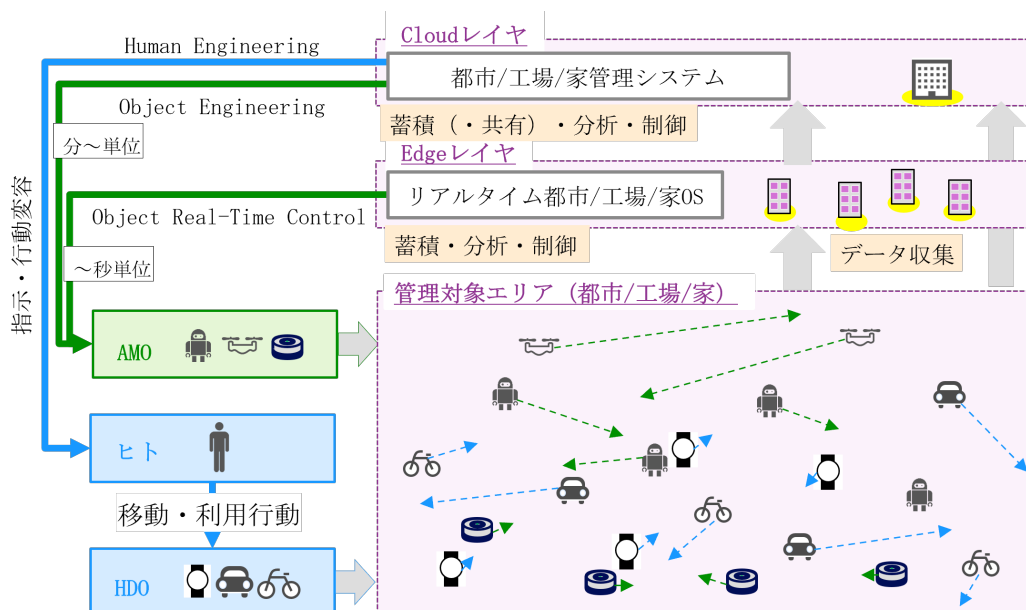


図1. システムイメージ

を狙いとする。ヒトを目的に叶うよう行動変容を促す方法は、中長期的な研究課題として取り組むことを考えている（現在の文献調査の状況について4章で言及する）。

これら2つのIoTデータ活用サイクルを担う機能であるリアルタイム都市/工場/家OS、及び、都市/工場/家管理システムは、スマートモビリティ社会の中核の機能と捉え、そのユースケースを踏まえつつ汎用性を保つために必要な共通機能の抽出を図っていく必要がある。

このようにして、「ヒト・モノ協調型のスマートモビリティ社会」を管理/制御するシステムを構築することを考える。

3 有効性検証

本研究で構想した概念の有効性を検証するため、シミュレーションによる数値評価と実機による動作評価の研究環境の準備を進めている。この2つの有効性検証の検討状況を簡単に説明する。

3.1 トイモデルシミュレーションシステム

走行レーン上を複数のAMOが動作してジョブを実行するトイモデルでのシミュレーションの数値評価について示す。

まず、図2にてシミュレーションで評価する動作について説明する。図2(a)で示すように、シミュレーションでは、4つのAMOが、単位時間当たり単位距離の等速度で長さ400の線分上の走行レーンを動作する。走行レーン上の位置は、左端からの距離(0~400)による座標で表す。この走行レーン上に4つの指定された地点に「マーカ」と呼ぶAMOの到達目標が出現する(図2(b)参照)。マーカが出現する地点は、一様乱数により走行レーン上にランダムに決まる。マーカは、配車したAMOが到達すると消滅し、この消滅と同時に新たなマーカが出現する(図2(c,d)参照)。この出現の時点で、マーカはいずれかのAMOに配車される(図2(e,f)参照)。結果、常に、配車された4つのマーカが、システム上に存在する。また、AMOが配車したマーカに到達した時、得点(1点)を獲得する。

シミュレーション動作の詳細事項を以下で補足する。

- 4つのAMOは、それぞれ50, 150, 250, 350の線分上の座標位置からシミュレーションを開始する(図2(a)参照)。
- シミュレーション開始時に4つのマーカが出現する。各マーカに配車するAMOはその項番順で決定する(図2(b)参照)。
- マーカに到達したが、配車されたマーカを持たないAMOは、新たにマーカが配車されるまで到達した地点で停止し、待ち状態になる(図2(f)参照)。
- AMOは、配車されたマーカに向かう走行途中や配車されたマーカを持つ状況では停止しない。
- AMOは、配車されたマーカを予約し、予約順序でマーカを巡回する。マーカの巡回順序はこの予約順序から変更できない(図2(f)参照)。

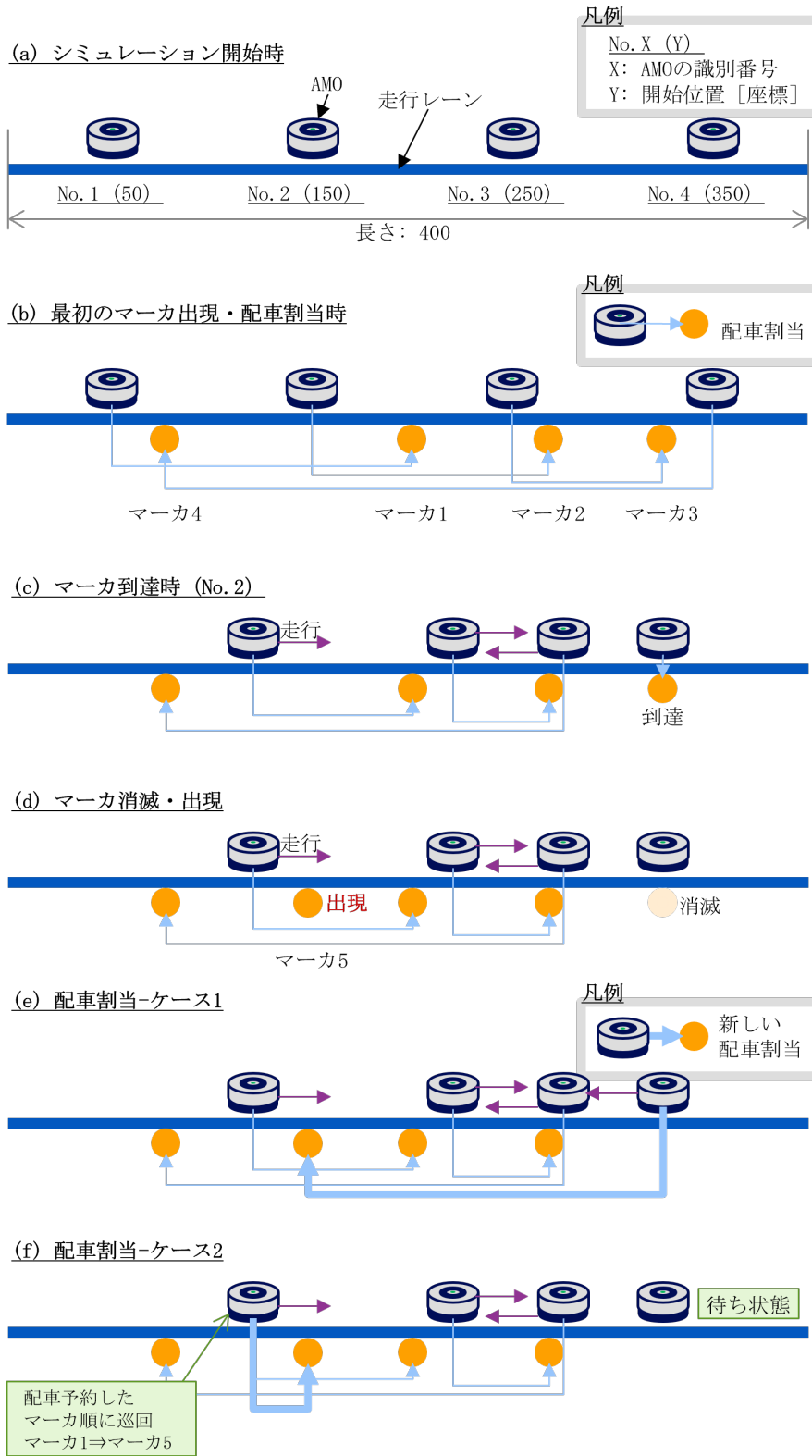


図 2. シミュレーション動作

このシステムでは、マーカ出現時における配車する AMO 決定のみが制御対象である。また、このジョブの目的は、シミュレーション期間中に 4 つの AMO で出来るだけ多くの得点を獲得することである。この 4 つの AMO で獲得した得点の合計（総得点）で配車する AMO の決定の方法（配車法）を評価する。

本シミュレーションでは、以下の 3 つの配車法を評価対象とする。

順次配車（SEQ） マーカに到達した AMO を、そのマーカ消滅に伴い出現するマーカに配車する。（IoT データ活用サイクルに依らず、）AMO の自律動作のみによる制御のケースである。

固定配車（FIX） 各 AMO が担当する区域を（0～100）、（100～200）、（200～300）、（300～400）と定める、マーカが発生した地点の区域を担当する AMO に配車する。AMO に局所的に定めた区域とマーカが発生地点のみによる単純な仕組みで制御する“Object Real-Time Control”のケースである。

最短到着配車（OPT） マーカが出現した時点で、各 AMO がそのマーカに到達する時間を評価する（既にマーカへの配車が予約されている場合は、予約されたマーカ経由での到達時間を評価）。4 つの AMO のうち、この到達時間が最も短い AMO に配車する。システム全体の動作状況を分析し制御する、“Object Engineering”のケースである。

これら配車法を離散事象型シミュレーションによる数値実験で評価した。図3は、シミュレーション期間を 1,000 とした場合の AMO の動作を示す。異なる色で表示するグラフの各データ系列は AMO に対応し、各 AMO の時系列での座標位置を示す。なお、3 つの配車法の評価では、出現するマーカの地点は同じ乱数列で決定している（各 AMO で最初に配車されるマーカが同じであるため、シミュレーション開始から最初のマーカ到達までの動作は 3 つの評価で同じになる）。図に示す AMO の動作から、各配車法の特徴が確認できる（SEQ はマーカが出現した地点に応じて AMO が大きく移動する、FIX では AMO は同じ区域での動作に留まっている等）。

次に、表2で、シミュレーション時間を 10,000 とした場合のシミュレーション動作の結果を示す。やはり、マーカが出現する地点は全ての評価で同じ乱数列で決定している。なお、表中の「平均走行距離」は、1 回のマーカ到達に要する走行距離の平均値を示す（合計欄は、全 AMO における平均値）。まず、総得点は、OPT(776 点)、FIX(656 点)、SEQ(287 点)の順に高いことが分かる。SEQ は、マーカに到達し得点を獲得した AMO が、それに伴い出現するマーカへ配車するという、走行効率を考慮しない配車法であるため、AMO の平均走行距離が長くなる（138.9）。この結果、到達できるマーカの数が少なくなる。これに対し、OPT・FIX は、それぞれの方法で走行距離を短くするように配車する AMO を決めるため、SEQ と比べて平均走行距離が劇的に短縮（OPT：35.1、FIX：35.3）され、結果、SEQ より総得点を大幅に増やすことができた。

OPT と FIX の総得点の違いは、AMO の待ち時間の長さに基づくことが評価から確認できる。FIX では、担当区域にマーカが出現するまで AMO が待ち状態になる（逆に、担当区域にマーカが多く出現した AMO は、多数のマーカからの配車が予約される）。他方、



図 3. AMO 動作例

OPT では到達が最短時間となる AMO に配車するため、配車されていない AMO（待ち状態の地点から直接マーカに移動できる）が選ばれる傾向にある。このように、システム全体での AMO の状況に応じた制御を行うことで、ジョブの達成度が向上していることが分かる。

非常に限られた数値評価ではあるが、これら 3 つの手法の比較より、“Object Real-Time Control” や “Object Engineering” の IoT データ活用サイクルにより、ジョブを改善する可能性のあること、システム全体の最適化を狙う “Object Engineering” は、“Object Real-Time Control” より、さらにジョブを効率化する可能性があることが示せた。

表 2. 評価結果

AMO No.	得点	総走行距離	平均走行距離	総待ち時間
0	69	9,992	144.8	0
1	76	9,929	130.6	0
2	65	9,946	153.0	0
3	77	9,998	129.8	0
合計	287	39,865	138.9	0

SEQの評価結果

AMO No.	得点	総走行距離	平均走行距離	総待ち時間
0	167	5,786	34.6	4,214
1	175	5,869	33.5	3,943
2	152	5,690	37.4	4,104
3	162	5,798	35.8	4,188
合計	656	23,143	35.3	16,449

FIXの評価結果

AMO No.	得点	総走行距離	平均走行距離	総待ち時間
0	210	7,747	36.9	2,223
1	181	6,026	33.3	3,597
2	205	7,269	35.5	2,673
3	180	6,205	34.5	3,772
合計	776	27,247	35.1	12,265

OPTの評価結果

3.2 実機によるシステム構築

本研究での構想の動作評価のため、実機による小規模な実験システムの構築を目指している。クラウド・エッジによる制御・管理システムに先駆け、まずは、ロボット掃除機を活用した管理対象のデバイスの製作を進めている。具体的には、以下に示す機能を製作した（図 4 参照）。

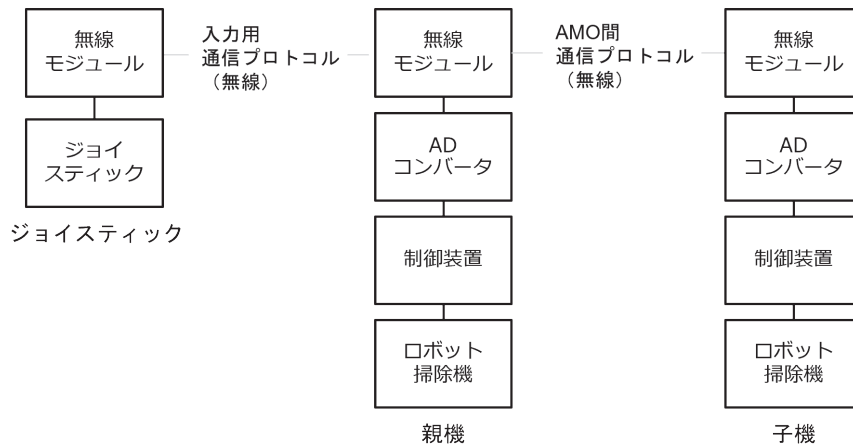


図 4. 実験システムの機能構成

ロボット掃除機制御 マイコンによる制御装置上のプログラムより、API を介してロボット掃除機の動作制御を行う。

通信システム ロボット掃除機に備え付けの無線モジュールを用いて遠隔の装置との通信を行う。本実験で使用する無線モジュールは、アナログ電圧を送受信する仕様となっている。送信側の無線モジュールはジョイスティックが生成したアナログ電圧信号を受け取って送信する。受信側の無線モジュールは受け取った信号を PWM で再現するため、これを AD コンバータを介して制御装置に取り込み、デジタル処理を行う。

通信プロトコル AMO 間の連携のための AMO 間通信プロトコル、及び、ヒトが HDO を操作するための操作装置との入力用通信プロトコルを定め、それに基づき装置間で通信する。

実験システム構築において使用した主なハードウェアは、表 3 に示す通りである。

表 3. 実験システムで使用したハードウェア

装置	ハードウェア名
ロボット掃除機	ルンバ (iRobot Create 2 Programmable Robot)
制御装置	raspberry pi 3
無線モジュール	TWELITE DIP
AD コンバータ	MCP3208
入力装置 (ジョイスティック)	KKHMF 製ジョイスティックモジュール

この機能を用いて、以下の AMO 間連携、ヒトによる HDO 操作の基本動作が行えることを確認した。

ロボット掃除機の連携動作親機・子機のロボット掃除機間での通信により、親機の動作を子機が追従するような制御プログラミングを実装し、親機のタッチセンサ接触に伴う方向転換を子機が追従することを確認した (図 5 参照)。

ロボット掃除機のヒトによる遠隔操作ジョイスティックを操作装置とし、レバーの傾き

によりロボット掃除機の走行速度・回転速度をヒトが遠隔より操作できることを確認した。
なお、この際実施した無線通信確認の実験の様子を図6で示す。

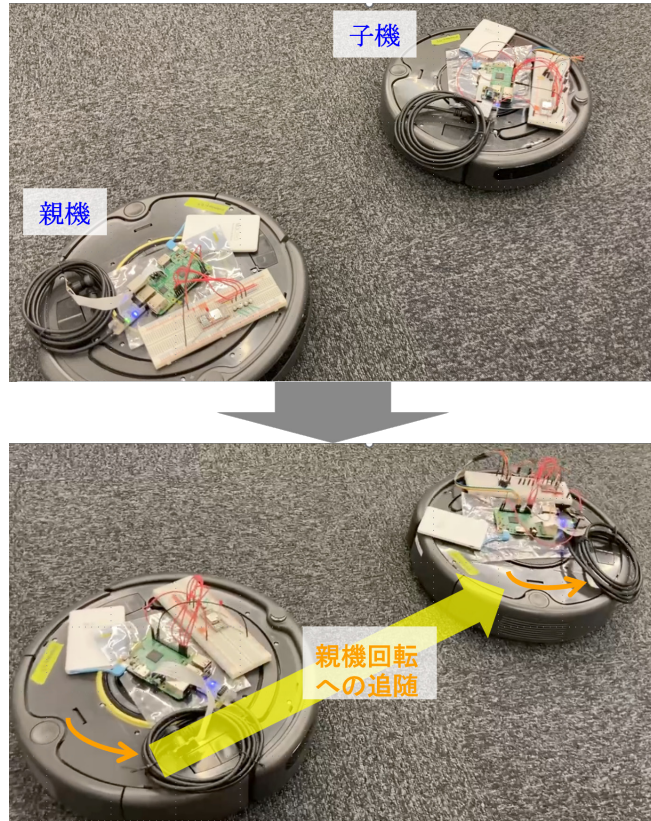


図 5. ロボット掃除機の連携動作

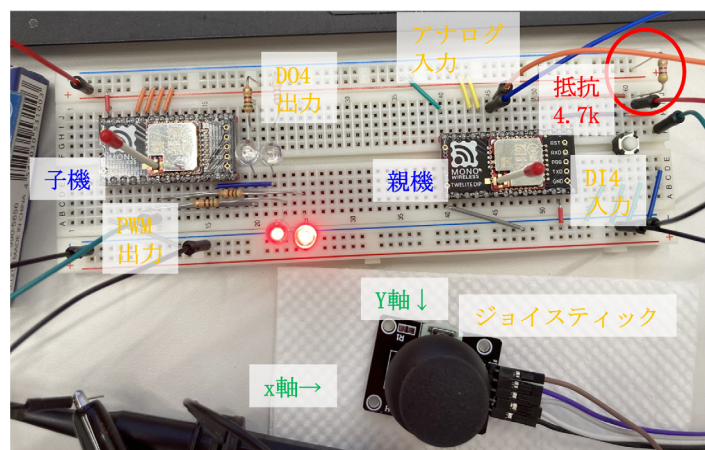


図 6. 遠隔操作回路の実験

3.3 他課題への対応状況

中長期的な研究課題として取り組む必要があると考える「ヒトへの行動変容を実現する手段」について、可能性があると思われるトピックについて文献調査を開始した(表4参照)。

表4. 中長期課題に対する文献調査

項目	内容	関連文献
インセンティブ設計	報酬や罰則等のヒトに与えるインセンティブを設計し、インセンティブを受けたヒトが自分に有利になるよう選択する行動が、社会全体での最適化に繋がるように導く。	[4]
動的価格調整	時間や需給状況に応じて商品・サービスの価格を変更させる戦略である。この仕組みをヒトの行動変容に繋げるインセンティブの価値設定に活用する。	[5]
ゲーミフィケーション	ゲーム技術を活用して、ビジネスや教育などの業務や学習をより効率的かつ楽しいものにすることを目的としている。ゲーミフィケーションを通じて、楽しみをヒトに提供しながらヒトの行動変容を図ることで、ヒトとモノとがさらに高いレベルで効率性に繋がるよう協調する可能性を考える。	[6]
行動変容デザイン	行動経済学による知見を活用し、ヒトの行動を変えるようなプロダクトのデザイン手法を考える。	[7]

4 おわりに

本稿では、ヒトと自律的に移動するモノが協調し、社会全体での効率化を図る「ヒト・モノ協調型のスマートモビリティ社会」を構想し、それに向けた研究の企画状況として、有効性検証のための、トイモデルシミュレーションでの検討状況・実機による実験システムの構築状況等について説明した。本格的に研究を進めるために、まだ、多くの課題を解決する必要があるが、今後とも随時の数値シミュレーションによる定量的検証、実験システムによる動作確認・概念検証を重ね、骨太の研究に結実したいと考える。

参考文献

- [1] 内閣府, Society 5.0
https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html (2023年2月24日閲覧)
- [2] R. Kurzweil, The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology, The Viking Press, 2005.
- [3] X. Wang, L. T. Yang, X. Xie, J. Jin, M. J. Deen, A Cloud-Edge Computing Framework for Cyber-Physical-Social Services, IEEE Communications Magazine, Vol. 55, Issue: 11, pp.80-85, 2017.
- [4] 石田潤一郎, 玉田康成, 情報とインセンティブの経済学, 有斐閣, 2020.
- [5] S. Saharan, S. Bawa, N. Kumar, Dynamic Pricing Techniques for Intelligent Transportation System in Smart Cities: A Systematic Review, Computer Communications, Vol. 150, pp.603-625, 2020.
- [6] S. Deterding, D. Dixon, R. Khaled, L. Nacke, From Game Design Elements to Gamefulness: Defining "Gamification," MindTrek '11, pp. 9-15, 2011.

- [7] S. Wendel, 行動を変えるデザイン—心理学と行動経済学をプロダクトデザインに活用する, オライリージャパン, 2020.

辻野雅之	東京国際工科専門職大学	工科学部	情報工学科	教授
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
根岸 豊	東京国際工科専門職大学	工科学部	デジタルエンタテインメント学科	教授
二村 忍	東京国際工科専門職大学	工科学部	デジタルエンタテインメント学科	教授