

# 自動配送ロボットによる配送サービスのインタラクティブな設計・評価手法に関する一考察

村本衛一<sup>1</sup> 河本弘和<sup>1</sup> 東島勝義<sup>1</sup> 澤井薫<sup>2</sup> 篠田陽一<sup>3</sup>

**概要:** 自動配送ロボットによる配送サービスの設計には多様な選択肢がある。我々は、特に自律移動を伴う新たなモビリティのサービス設計の評価として、これまで道路設計や鉄道の設計で用いられてきた費用便益の評価に加えて、人ごみを通過する量や交通量が多い道路を横断する頻度など安全性に関わる評価も加えた安全性、経済性、利便性の評価指標の同時評価を行う手法を研究してきた。安全性の評価のため、マイクロ交通系シミュレータを短い時間粒度で動作させ衝突の危険性を評価すると計算時間が増える。モビリティサービスの決定要因としては、サービス提供領域の広さ、投入台数、カバーする配送需要の量等パラメータの数が多く、組み合わせの数が爆発するため最適解の探索には計算時間が膨大となる問題がある。安全性、経済性、利便性の評価指標の変化を同時に把握しながら、シミュレータとその利用者が対話的に操作しながら最適解を探索する方法を示す。シミュレーションを数回のバッチ単位で分割して実施し、バッチ単位で算出されたパレート最適解を安全性、経済性、利便性の指標の空間に可視化しユーザに示す。ユーザがバッチ単位のパレート最適解の中から最も良いと考える解を選択する操作を繰り返すことで、短時間で納得・説明しやすい最適解に達することができる。また、ユーザが探索の方向性を自由に選び、探索空間を閲覧しながら探索できるため最適解の選択理由を含め説明しやすい利点のみならず、安全性の指標の悪化に関して示す機構があるため、安全性の指標が悪化するシナリオの原因も探りやすい利点がある。本手法を神奈川県の特定期間での配送サービスの評価に適用し、複数ユーザで試用評価し、有用性を確認した。

**キーワード:** 自律移動モビリティ, サービス設計・評価, 交通計画, 意思決定シミュレーション

## A Study on Interactive Design and Evaluation Methods for Delivery Services Using Autonomous Delivery Robots

Eiichi MURAMOTO<sup>1</sup> Hirokazu KAWAMOTO<sup>1</sup> Masayoshi TOJIMA<sup>1</sup>  
Kaoru SAWAI<sup>2</sup> Yoichi SHINODA<sup>3</sup>

**Abstract:**

**Keywords:** Autonomous Mobility Service, Service Design and Evaluation, Transportation Planning, Decision Simulation

### 1. はじめに

自動配送ロボット（以後 ADR:(Autonomous Delivery Robot)と略記)の公道走行は、改正道路交通法（2022年4月19日に成立）が施行される2023年度以後、遠隔操作型小型車として届け出ることによって実施可能となる。このため、ADRを用いた配送サービス（以後 ADS:(Autonomous Delivery Service)と略記)の社会実装が進み、既存の配送サービスにおける人手不足の解消効果などが期待されている。

ADSの設計においては、サービス提供領域の広さ、投入するADRの種別、投入する機体の台数、カバーする配送需要の量等、様々な要因が関連するため、サービスの全体像を把握し、最適解を選定するには多くの時間を要する。

我々は、これまでにこのような新たな自動運転モビリティを用いたサービスを設計・評価する手法を研究してきている[1]。モビリティサービスを特定エリアに導入する際の

一連の工程を図1に示す。まず、当該エリアの需要、交通量の調査を行い、機体の種別や投入台数といった運行候補を複数パターン選定する。次に、配送元及び配送先ステーション配置、走行路、運行数、運行形態といった導入するモビリティサービスの仮説を立案する。その後、これらのサービスを安全に実現するための安全設計を行う。この過程で不安全な運行を排除する。例えば、機能安全設計が不十分な大型車両を歩車分離のない住宅地で降雪時に高速運行させるといったサービス仮説はこの工程で棄却する。この後、安全性、利便性、経済性の観点から妥当か計算機シミュレーションを用いた定量評価を行い、導入するモビリティサービスの仕様について意思決定を行う。

<sup>1</sup> パナソニック ホールディングス株式会社  
Panasonic Holdings Corporation

<sup>2</sup> 株式会社パナソニックシステムネットワークス開発研究所  
Panasonic System Networks R&D Lab Co. Ltd.

<sup>3</sup> 北陸先端科学技術大学院大学

Japan Advanced Institute of Science and technology

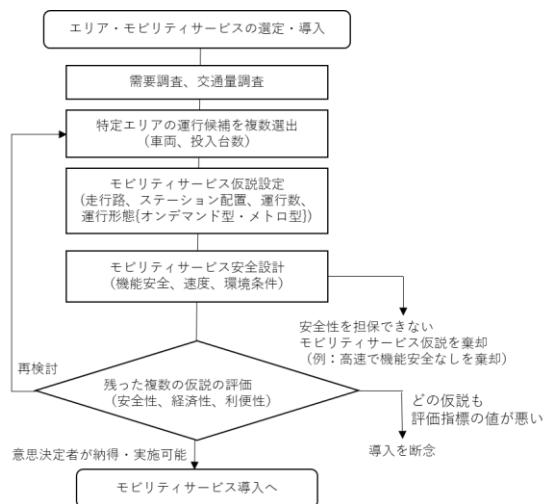


図 1 モビリティサービスの導入フロー  
 Fig.1 Mobility service introduction flow

本稿では、この手法の仮説の評価の工程を拡張し、モビリティサービスの導入の意思決定者が、シミュレータを用いてインタラクティブに最適解を選定する手法を提案する。特定地域での ADS の最適解の探索に適用し、複数の被験者による評価で提案手法の有効性を確認する。

2 章で関連研究との比較を述べ本研究の位置付けを明らかにする。3 章で ADS の設計・評価手法への要求を述べる。4 章でインタラクティブな設計・評価手法を提案し、5 章で特定地域での配送サービスを題材に本手法を適用した評価について述べ、6 章でまとめる。

## 2. 関連研究

文献[1]では、鉄道プロジェクトを対象とした費用便益分析の実用化の動向を示している。また、文献[2]では、道路の費用便益分析のガイドラインが示されている。この中では、発生する事故を減少便益として算出している。本稿では、事故につながるヒヤリハット事象の発生をシミュレーションで導出し、頻度や発生場所、時間を特定し、自由軌道である ADR の適切な走行路や運行頻度を含めた評価を可能とする。

文献[4]では、モビリティサービスの評価手法として、ワンウェイ型カーシェアリングに着目し、事業性評価と公共交通との連携性を評価する手法が提案されている。移動を再現するシミュレータを用いて、事業性評価と公共交通との連続性という複数目的に合致するサービスのパレート最適解を分析する点で本稿と類似しているが、人が運転する車両を対象としており、安全性に関する評価を加えていない点、インタラクティブな探索方法を採用していない点が本稿と異なる。

文献[5]は、複数のインタラクティブな探索ベースのソフトウェア工学の研究論文を調査し、インタラクティブの頻度、提示するソリューションの数、ユーザーに選択させる選

択肢の種別の統計値を示し体系的な分類を示した調査論文である。調査対象の論文のうち、92%の論文が、膨大なシミュレーションパラメータの組み合わせから、一定数の繰り返しのために実行結果をユーザーに提示し、42%の論文が探索の方向性をユーザーに選択させる方法を採用しているとの報告が含まれている。本稿で扱う Human in the Loop のサービス設計・評価手法は、一定数の繰り返しのたびに探索の方向性をユーザーに選択させるインタラクティブな探索ベースの手法である。

文献[6]では、ソフトウェアの次期リリースの最適解を決定する過程において、Human in the Loop でインタラクティブに探索の方向を埋め込む手法において、意思決定者の潜在的な好みを引き出す利点についても指摘している。本稿では、モビリティサービスを導入する意思決定者が、膨大なサービスの候補から最適解を探索する際に、自らが好む方向を選択し探索することで、最適解が妥当と納得できるものとなるか、をアンケートで確認する。

## 3. 自動配送ロボットによる配送サービス設計・評価への要求

ADR を用いた配送サービスの設計・評価に対する要求事項を述べる。

### 3.1 サービスの安全性

人や自転車など様々な交通参加者との混在状況の住宅地などで自由軌道を走行し、自律移動を行う ADR の運行の安全性は担保されなくてはならない。すなわち、他の交通参加者との事故を回避し、歩行者を優先し、さらには歩行者を怖がらせない安心な挙動を行うといった安全性の担保が必要となる。

ADR に高性能なセンサーを搭載し、認知・判断・操作のすべての工程において冗長化を行えば、機体の挙動の信頼度及び安全性が向上する。しかし、配送サービスを担う小型低速の ADR に高速移動する自動車と同じ冗長度を組み込めば、自動車の自動運転車両と同等のコストが必要となり経済性が悪化する。

### 3.2 サービスの事業性（経済性、利便性）

ADR の日本の公道での最高速度は時速 6km と定められている。単位面積当たりの配送需要が少ない地域では少ない台数、需要が多い地域では多数の機体を投入する必要があると想定できる。

人手による配送と異なり、ADS では、休日や夜間など人手の確保が難しい時期や時間帯でも配送サービスを実現でき、より多くの潜在需要を取り込める可能性がある。また、ADR の荷室と荷主の荷物の関係は管理されるため、配送時間を数分単位で指定できる等、エンドユーザーにとっての利便性が向上する可能性がある。利便性が高まった配送に対して、適切な配送価格を設定することで配送サービスの収益性が高まる可能性がある。

### 3.3 安全性、経済性、利便性の観点での最適解の探索

ADS の設計は、安全性、経済性、利便性のバランスで決定する必要がある。

ADR の運行場所と時間帯によって、人等との混在度合いが変わってくるのが予想される。人等との混在状況により最高速度を減速させると安全性は向上するが、配送件数が減り経済性が悪化し、オンデマンド配送の正着率が下がり利便性は悪化する可能性がある。

幅の狭い歩道の通行を回避する走行路を選択すれば、安全性は向上するが経済性が悪化する。相対速度が高い自動車が往来する幅の広い道路の横断時などセンサー能力だけでは不十分な場所で遠隔オペレータによる安全確認を行えば安全性は担保出来る。このような横断を多数発生させる配送を行えば、多くの配送需要を取り込める可能性はありエンドユーザの利便性が向上するが、遠隔オペレータの負担が増え、その分運行効率が下がり、1名の遠隔オペレータで多数の機体の監視操作を行うことができなくなり、結果として経済性が悪化する。

すなわち、ADS の設計では、安全性、経済性、利便性を左右するモビリティサービスの決定因子の多数の組み合わせの中から最適解を探索する必要がある。

### 3.4 サービス全体像の把握と選択理由の説明可能性

前述のように、ADS のサービス決定因子は複数存在し、その膨大な組み合わせがある。このため、サービスの可能性の全体像が把握しにくい。しかし、サービスの導入を行う意思決定者は、サービスの可能性の全体像を把握し、また、自らが選択するサービスの最適解の選択を説明可能とし、導入するモビリティサービスの仕様についてステークホルダと合意形成していく必要がある。

## 4. インタラクティブな設計・評価手法の提案

前章で説明した要求を満たすため、サービスの導入を行う意思決定者がマイクロ交通系シミュレータを用いたシステムで最適解を選択する手法を提案する。

### 4.1 意思決定者とのインタラクションを含む処理フロー

モビリティサービスの決定因子の組み合わせは膨大となる。シミュレーションパラメータの組み合わせのすべてを全探索すると、例えば、5章で説明するような特定地域における ADR による数時間程度の荷物の配送サービスの組み合わせをすべて実行すると 100 年以上のシミュレーション時間が必要となり、現実的な時間で最適解を探索できない。このため、システムは、最適解の候補となるシミュレーションパラメータから、いくつかのシミュレーションパラメータを変動させ、それぞれのシミュレーションを CPU のコアの数だけ並列実行する。このシミュレーションの実行単位をシミュレーションバッチと呼ぶ（以後 SB と略記）。システムが SB の実行結果のパレートフロントを安全性、経済性、利便性の評価軸上に可視化し、モビリティ

サービスの意思決定者が可視化されたパレートフロントの中から最も好ましい解を選択する。

システムは、選択された好ましい解に基づきシミュレーションパラメータセットのなかからいくつかのパラメータについて改良し、次の SB を生成する（図 2）。図中のバッチは SB を指す。

以上の操作を繰り返すことで、意思決定者の好みを反映しながら納得性の高い解を効率的に探索する。

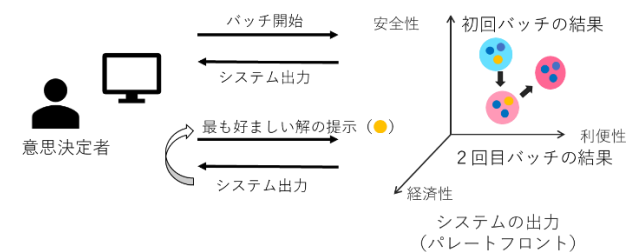


図 2 インタラクティブな設計・評価手法  
Fig.2 The Interactive Design and Evaluation Method

### 4.2 パレートフロントの提示

システムは、SB の終了毎に、安全性、経済性、利便性の評価軸でパレート最適解を抽出する。すなわち、特定のシミュレーションの結果を他のシミュレーション結果と比較し、安全性、経済性、利便性の評価指標のうち、どれかは良化している場合、パレート最適解として出力画面上に表示する。いずれも優れていない場合、パレート最適解から除外し表示しない。図 3 に出力画面の例を示す。図中の Risk, Cost, Value は、それぞれ安全性、経済性、利便性の評価軸を表しており、SB の世代(generation)は色で区別されている。

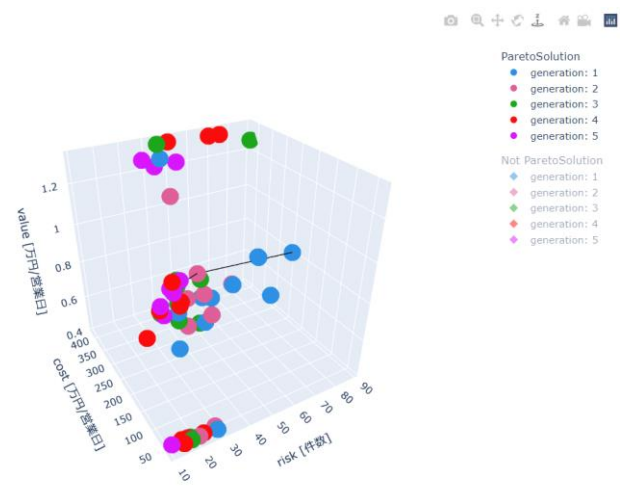


図 3 システムの出力画面（パレートフロント）  
Fig3 System Output (Showing the Pareto front)

### 4.3 シミュレーションパラメータの表示

意思決定者は、出力画面に表示されたパレートフロント上の、マウスのポインタを操作することで、それぞれのシ

シミュレーションのパラメータの値と安全性, 利便性, 経済性の評価値を確認できる. 3次元の主力画面はマウスをドラッグすることで視野角の変更できる. また, スクロール操作で拡大縮小表示できる. 図 4 は, 図 3 と同じ SB の角度を変えて拡大表示し, マウスオーバーによりシミュレーションパラメータを表示させた様子を表したものである.

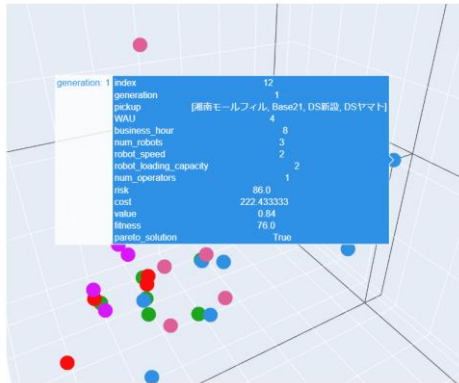


図 4 マウスオーバー時の表示画面.

Fig.4 The screen shot showing simulation parameter on mouse

#### 4.4 最も好ましい解の提示と次回バッチのシミュレーションパラメータの算出

意思決定者は, 出力画面に表示されるパレートフロントのうち, 最も好ましいと考えられる解の一つを選択し, マウスオーバーし, そのシミュレーションを示す ID を確認する. 意思決定者が, シミュレーションを示す ID をシステムに入力すると, システムは, A:選択したシミュレーションと B:評価指標が最良のシミュレーションのパラメータの差分から, 次の SB で実行するシミュレーションパラメータを生成する. 次の SB のパラメータ生成の例を図 5 に示す.  $x_1, x_2$  はシミュレーションパラメータを示す. B から A の方向に拡張した範囲を算出し, その範囲内で次世代の SB のサイズのシミュレーションパラメータの組を, 乱数を用いて生成する. 本稿では, SB のサイズは 16 を採用している. なお, 評価指標には, 安全性, 利便性, 経済性の各出力についてシミュレーションごとに比較して順位付けし, その合計値を利用している.

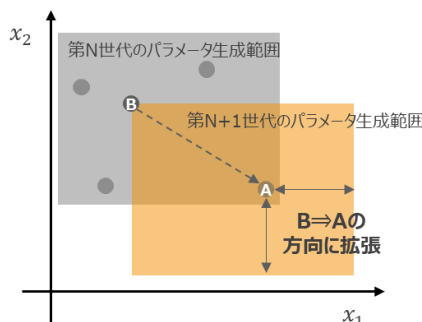


図 5 次回バッチのシミュレーションパラメータ算出方法  
Fig.5 Method for calculate simulation parameters for the next simulation batch

#### 4.5 評価の終了と選択した解のトラジェクトリの表示

意思決定者が評価の終了を入力すると, システムは各 SB において, 意思決定者が選択した好ましい解のトラジェクトリを安全性, 利便性, 経済性の軸上に表示する. 図 5 は, その画面を示した図である. この画面により, 意思決定者は自分の選択の履歴を確認できるとともに, 探索空間の全体像の把握につながる. さらに, 評価不足な項目を気づくこともでき, その場合はパラメータや探索戦略を変更し再評価することができる.

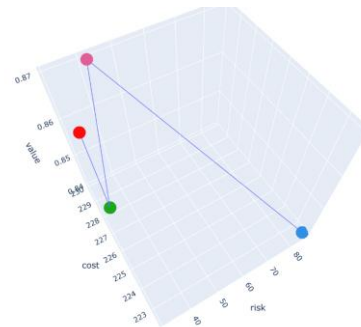


図 5 意思決定者が選択した好ましい解のトラジェクトリ  
Fig.5 The trajectory of selected preferable solution on each generation by the decision maker

#### 4.6 モビリティサービスの導入決定もしくは再評価

意思決定者は, 実行可能で十分な最適解が得られたと判断すれば選択したモビリティサービスの社会実装を進める. 前節まで説明した評価の中で, さらに詳細なシミュレーションや, シミュレーションモデルの見直しの必要性を感じた場合, 図 1 の「特定エリアの運行候補を複数選択」に戻って再評価を行う.

### 5. 特定地区での配送サービス設計を題材とした提案手法の評価

藤沢地域での ADS の設計を題材として, 4 章で説明した手法で最適解を探索する. 複数の被験者による評価により本手法の有効性を確認する.

#### 5.1 藤沢地域の ADS

藤沢 SST[7]は, 2014 年に街開きを行ったスマートシティで, JR 東海道線藤沢駅からバスで 15 分程度の場所に 19 ヘクタール 東京ドーム 5 つ分の敷地に郊外型住宅中心の複合開発が行われたエリアで約 1900 名が居住している地域である. 藤沢 SST では, 2020 年 12 月より自動配送ロボットを用いた実証実験が行われている[8].

配送サービスの異なる需要量を発生させる複数の店舗の存在を仮定し, その配送需要に応じて複数の ADR が配送を行う状況を模倣し, 安全性, 利便性, 経済性の指標で評価し, インタラクティブに最適解を探索する.



## 5.2 シミュレーションパラメータ

藤沢 SST の住民に配送すると仮定する店舗候補と配送先を図 6 に示す。図中の青丸は配送元となる店舗であり、赤色の丸が配送先である。住民が一定確率で当該店舗に対して毎週配送を依頼する、Weekly Active User (以後 WAU と略記) となると仮定する。WAU の発生確率と配送先の世帯数から 1 日当たりの配送発生件数に換算したものがシミュレーションパラメータとなる。この配送需要を ADR が稼働営業時間内で配送する。この営業時間、配送サービスに投入する ADR の台数、ADR の速度、荷室の数、投入する遠隔オペレータ数もシミュレーションパラメータである。



図 6 藤沢地域の配送元(青丸) 配送先(赤丸) 走行路  
Fig.6 The delivery source(bule) and destinations(red) in Fujisawa SST

遠隔オペレータは、ADR が走行中に経験するイベントを処理するために操作を行う。イベントの発生と遠隔オペレータの操作時間は、我々が同地域での実証の経験をベースにポアソン分布で生成する。イベントの具体例と操作時間については、駐車車両の回避等、信号のない交差点の横断時の操作、信号機がある交差点の横断時の操作であり、駐車車両の回避等については、実証で観測された遠隔オペレータの発生頻度をポアソン分布で再現し、操作時間は実証経験した平均時間(定数)とする。同地域に複数台の ADR が稼働している場合、1 台の ADR の操作に対し 1 人の遠隔オペレータが対応し、全遠隔オペレータが ADR を操作中の場合は残りの ADR は停止する。信号機のない交差点を通過する際は、遠隔オペレータが操作して交差点を横断し、その操作時間は ADR に設定された速度で交差点を移動する時間とする。信号機のある交差点を通過する際の操作時間は、信号機のサイクルの半分の値(定数:54 秒)とする。また、ADR への荷物を積み下ろしにかかる時間は、注文が入った商品をピックアップして積載する配送元側、ADR が配送先に到着して顧客が商品を取り出す配送先側とも、一定時間(定数:300 秒)とする。

シミュレーションパラメータの一覧を表 1 に示す。パラメータの組み合わせの総数は 36,288,000 通りとなる。

表 1: シミュレーションパラメータ一覧

Table1: List of Simulation parameters

分類	項目	パラメータ	候補
需要	配送元(集荷先)	{(SM, SE, JA, TS, NE, YA)の 6 拠点の組み合わせ}	63
	需要量(WAU)	{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10} % → {1, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 13, 14} 件/日	10
サービス	営業時間	{1, 2, ..., 24} 時間	24
	ロボット台数	{1, 2, 3, ..., 9, 10}	10
	ロボット時速	{1, 2, 3, 4, 5, 6} km/h	6
	ロボット荷室数	{1, 2, 3, 4}	4
	積荷積卸時間	定数 300 秒	1
	オペレータ数	{1, 2, ..., 9, 10} 人	10
	遠隔介入頻度	平均発生間隔 449 秒のポアソン分布	1
青信号点灯周期	定数 54 秒	1	

## 5.3 シミュレーション結果の評価指標

シミュレーション結果は、以下に示す、安全性、経済性、利便性の指標で評価する。これら 3 指標のパレート最適解を 3 次元グラフで可視化する。

### 5.3.1 安全性の評価指標

安全性の指標 R は、当該地域で遠隔オペレータの介入の頻度をポアソン分布で近似して発生させたリスクイベントの合計数として、次の式で示す指標を採用する。

$$R = -\left\{ \sum_{i=1}^n (W(i)) \right\}$$

$W(i)$  は、機体  $i$  が営業時間内に経験するリスクイベントの回数である。 $n$  は、ロボット台数である。

### 5.3.2 経済性評価指標

経済性の指標 C は、ADR の減価償却費用を合計したものと、遠隔オペレータを雇う費用と、店舗の初期費用の減価償却費と運営費用とを合計した値で、次の式で表すものを採用する。

$$C = -\left\{ \sum_{i=1}^n C_{adr}(i) + \sum_{j=1}^m C_{ope}(j) + \sum_{k=1}^p C_{env}(k) \right\}$$

$C_{adr}(i)$  は機体  $i$  の減価償却費(日割り)である。 $C_{ope}(j)$  は、時給で雇用される遠隔オペレータ  $j$  を営業時間分だけ雇う費用であり、 $m$  は、オペレータ数である。 $C_{env}(k)$  は、店舗の初期費用の減価償却費(日割り)と営業時間中の運営費用(日割り)の合計値である。 $k$  は配送元の拠点を示

す。例えば、配送元 SM と TS の 2 拠点の配送元からの需要を ADR が配送する ADS のシミュレーションの場合、 $p$  は 2 となる。

### 5.3.3 利便性の評価指標

利便性の指標  $V$  は、営業時間中に完了した配送数に各店舗が設定する配送料を掛けた合計金額として次の式で表すものを採用する。

$$V = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \text{Vadr}(i, j)$$

$\text{Vadr}(i, j)$  は、機体  $i$  が営業時間中に店舗  $j$  への配送を完了した数である。

### 5.4 インタラクティブな最適解の探索手法の評価

複数の被験者がインタラクティブに最適解を探索し、本システムの有効性を評価する。被験者は、ADS を導入する意思決定者であり、当該地域への ADS を 1 週間程度の時間で決定する立場であることを前提として、4 章で説明したインタラクティブな評価手法で 10 回を上限として複数バッチ回、パレート最適解を探索し、納得できる最適解が得られた時点で探索を終了する。

### 5.5 評価指標

評価指標は選択した ADS を導入する意思決定者が最適解を得る過程として適切かという観点で、以下の 5 つの質問を抽出した (表 2)。

表 2 評価アンケートの質問

Table2 Questionnaire for the Evaluation

No	項目	質問
1	実行時間	1 週間の時間を与えられ最適なサービス仕様を導出することになったとして、本手法で結果を算出する時間は実用的だったでしょうか。
2	UI	各世代において最も良いと思う解は選択しやすかったですでしょうか。
3	納得性	本手法を利用して決定した最適解は納得できるものでしたか。
4	全体把握性	本手法により十分網羅的に候補を評価できたと考えますか。
5	説明性	本手法を利用して決定した最適解についてその決定理由を説明できますか。

#### 5.5.1 最適解に到達する時間が実用的か (実行時間)

複数のバッチ回数分の最適解の探索は、実用的な時間で探索できたかどうか、を実行時間に関する指標とする。なお、実用的な時間とは、被験者が意思決定に許容される時間として概ね 1 週間の時間が与えられるとして、このシミュ

レータを用いた作業に使える時間が妥当かどうかで判断を仰いだ。

#### 5.5.2 最適解の選択しやすさ (UI 評価)

各 SB の終了時に表示される出力画面で、最適解が選択しやすかったかどうか、を UI に関する指標とする。

#### 5.5.3 最適解の納得性、全体把握性、説明性

本手法で得られる最適解は、局所最適解である可能性があるが、選んだ最適解は納得できるか、また、サービス可能な解空間の全体像が把握できたか、選択理由を他のワークフォルダに説明できるか、という評価指標をそれぞれ、納得性、全体把握性、説明性の評価指標とする。

### 5.6 評価

11 人の被験者に本手法を用いた最適解の探索を実施してもらい、前節で説明した評価指標について 5 段階評価のアンケートで確認した。最適解の納得性、全体把握性、説明性に関して答えやすくするため、被験者には、事前に評価指標を説明し本システムを用いて最適解を探索する前に直感的な最適解を決定してもらった。その後、本システムで最適解を探索してもらいアンケートに答えてもらった。各評価指標に対する 5 段階評価の内訳を図 7 に示す。5 段階評価で最も低い評価を 1、最も高い評価を 5 として、平均値を計算した。すると、1. 実行時間(平均 4.6)、5. 説明性(平均 3.9)、2. UI(平均 3.7)、3. 納得性(平均 3.6)、4. 全体把握性(平均 3.5)の順に評価が高い結果となった。本手法は、比較の実用性と説明性の点は評価が高いものの、一方で、選びやすさという点で UI 部分、被験者の選択を繰り返すことによる最適解に近づいていっているという納得感の部分、さらに、探索空間の全体把握性の部分について優先的な改善が必要である。

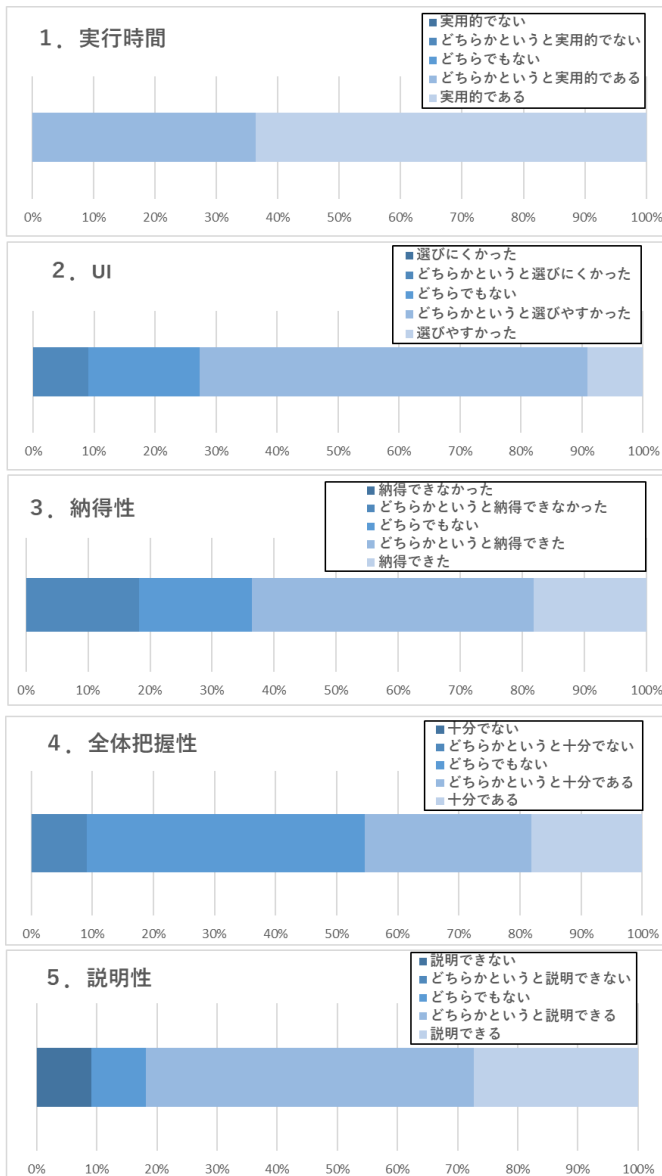


図 7 主観評価の集計結果

Fig.7 Aggregate results of the subjective evaluation

## 5.7 考察

前節での評価結果を考察する。

### 5.7.1 実行時間

本指標の評価平均値は 4.6 であり、平均的には「実用的である」という結果を得た。11 人の被験者に対し表 3 に示す仕様のマシンを使って最適解探索を行った。探索における 1 回の SB の実行に要する時間の平均値は 5.0 分、SB の実行回数の平均値は 4.6 回であった。各被験者が最適解に達するまでの時間の平均値は 80.0 分であり、そのうち、4.4 で示したユーザによる解の選択に要した思考時間の平均値は 57 分となる（ただし、本実験とは関係ない作業の時間も含まれる）。5.5.1 に示した意思決定者に与えられる 1 週間の許容時間と比較し、実用的と判断できる。

表 3 使用機材の仕様

Table3 Specifications of equipment used (1 node)

CPU	Intel(R) Xeon(R) Gold 6234 @ 3.30GHz×16
Memory	64GB×8
Storage	1TB SSD

### 5.7.2 最適解の選択しやすさ (UI 評価)

本指標の評価平均値は 3.7 であり、平均的には「どちらかという選びやすい」という結果を得た。改善点を被験者に口頭で尋ねたところ、パレートフロント上の特定 2 つの比較表示をする画面があるとよいといった、最適解の選択を支援する情報提供を要望する意見とリスク発生個所の表示する機能等シミュレーション詳細内容を表示する機能を希望する意見が聞かれた。

### 5.7.3 最適解の納得性、全体把握性、説明性

納得性の指標の評価平均値は 3.6 であり、平均的には「どちらかという納得できた」という結果、全体把握性の指標の評価平均値は 3.5 であり、平均的には「どちらかという十分である」という結果。説明性の指標の評価平均値は 3.9 であり、平均的には「どちらかという説明できる」という結果を得た。（比較的簡素な情報提示にも関わらず高い値が得られたと感じている。）これは、意思決定者自身が持つ過去の経験を引き出し可視化できたことにより好意的な印象も加わった結果ではないかと考えている。

### 5.7.4 評価のまとめ

前小節までに見てきたように、本稿で提案したインタラクティブな評価手法は概ね好評であると言える。

意思決定者は、この評価で得られた最適解の社会実装を進めてもよいし、5.7.2 で説明したような、より詳細なシミュレーションを追加実行して最適解を選択してもよい。

図 7 に文献[1]のシミュレーションで算出したリスク発生個所を表した図 7 に示す。この図のような出力を得るには、本章で説明した機体の運行に関する動作を再現させるだけではなく、他の車両や人といった交通参加者の動きも再現する必要があり、より多くのシミュレーション時間が必要となる。しかし、最適解の最終吟味等、重要な決定を下すために必要であれば、このような細粒度のシミュレーションを再実行して、最終的な最適解を決定したり、特定区間の運行速度を減速させた運行を再設計してから評価しなおしたりしてもよい。

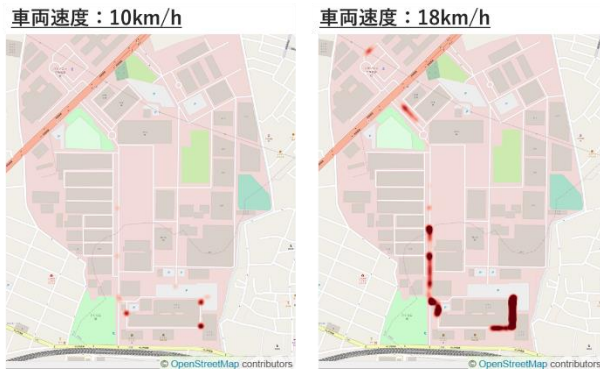


図 7 リスクの発生場所

Fig.7 Candidate location of the traffic accident

## 6. まとめ

自動配送ロボットによる配送サービスの設計には多様な選択肢がある。新たなモビリティによる新たなモビリティサービスの導入には、費用便益の評価に加えて、人ごみを通過する量や交通量が多い道路を横断する頻度など安全性に関わる評価も加えた安全性、経済性、利便性の評価指標の同時評価が必要である。モビリティサービスの決定要因の組み合わせは膨大となるため、本稿では、シミュレータをインタラクティブに用いる手法を提案評価した。提案手法の特定地域でのモビリティサービスの評価では、十分実用的な時間で最適解を探索することができたため被験者の評価は概ね好評であった。また、意思決定者の潜在的な要望が抽出できるという意見もあった。また、より詳細なリスク内容の表示等を可能とする詳細なシミュレーションを階層的に組み合わせながら評価する必要性も確認された。

既存提案手法 [1]では、安全性・経済性・利便性に関する評価指標の線形和を目的関数とし、重みを導入していた。一方で、本手法では、意思決定者の選択を反映することで探索が進んでいくため、重みを仮定する必要のないより汎用性の高い手法となっている。

今後は、より現実的な数値やモデルを用いてリアリティを増した評価や他地域のモビリティサービスの評価への適用や前述のような階層的なシミュレーション評価の手法の研究開発を進めたい。

**謝辞** 国立情報学研究所 蓮尾一郎教授、石川冬樹准教授には、パレート最適解の探索手法に関する意見交換で設計が探索の対象となり成否ではなくサービス品質の度合いを探ることの重要性に関して意見をいただき研究の励みとなっている。各位に感謝申し上げたい。

## 参考文献

- [1] 村本 衛一, 河本 弘和, 東島 勝義, 古川 量也, 澤井 薫, 知念 賢一, 篠田 陽一, 三浦,基嗣, 移動手段が選択可能な生活

- 圏における自動運転電動車両の運行のサービス設計・評価手法の提案, 情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス&システム (CDS), 2022, vol 12, 2, p1-11, 2022年5月
- [2] 岩倉 成志, 家田 仁, 鉄道プロジェクトの費用対効果分析ー実用化の系譜と課題, 運輸政策研究, 1998-1999, 1 巻, 3 号, p. 002-013
- [3] 費用便益分析マニュアル, 国土交通省 道路局, 2018年2月
- [4] 桑原 昌広, 吉岡 顕, 尾方 竜登, 西垣 友貴, Jan-Dark Schmoeker, 宇野 伸宏, 中村 俊之, 交通工学論文集, 第7巻, 第3号, pp 1-10, 2021
- [5] A. Ramirez, J. R. Romero and C. L. Simons, "A Systematic Review of Interaction in Search-Based Software Engineering," in IEEE Transactions on Software Engineering, vol. 45, no. 8, pp. 760-781
- [6] A. A. Araujo, M. Paixao, I. Yeltsin, A. Dantas, and J. Souza, "An Architecture based on interactive optimization and machine learning applied to the next release problem," Autom. Softw. Eng., vol. 24, no. 3, pp. 623-671, 2017.
- [7] FujisawaSST Home Page, <https://fujisawasst.com/JP/>
- [8] 藤沢地区での自動配送ロボット実証, <https://news.panasonic.com/jp/press/data/2020/12/jn201207-2/jn201207-2.html>