

人の生活圏での自動運転電動車両の運行のサービス設計・評価手法の一考察

村本衛一¹ 河本弘和¹ 東島勝義¹ 古川量也¹ 澤井 薫²
知念賢一³ 篠田陽一³ 三浦基嗣⁴

概要：人の活動データの分析に基づき、安全性、利便性、経済性を同時に満たすモビリティサービスを開発・改善する一手法を示す。人の移動をサイバー空間で再現し、安全性を担保しながら、利便性と経済性の均衡点を探索する。人の活動データとして企業内での構内移動データ、安全性の指標として、移動する人とEVの近接頻度から算定した事故損害額を採用し、移動時間の短縮による利便性と運用コストの均衡点を探索する。人の移動の発生頻度によりEVの利用率や安全性指標が変動するなど、モビリティサービスの設計には、多元的な要素が関係する。これらの要素をサービス因子として定義し、人の移動の再現をベースとして、サービス因子間の関係をシミュレータに実装するアプローチをとった。

キーワード：自動運転サービス、サービス設計、交通計画、意思決定シミュレーション

1. はじめに

環境にやさしい電動車両を用いたモビリティサービスは、持続可能で快適な生活には必須のサービスとして期待される。中でも安全性が担保された自動運転によるサービスは、低コストで利便性の高い運用を可能とする切り札として期待されている。

我々は、人の生活圏にフォーカスしたモビリティソリューションを通じて、“人”を元気に“コミュニティ”を元気に“地球”を元気にするサービスの創出を目標に活動を展開している。人の生活圏では、クリーンで環境にやさしい電動車両(EV)を用いた安全、便利で安価なモビリティサービスが求められている。

本稿では、モビリティサービスを特定エリアに導入する意思決定者が、人の活動データの分析に基づき、安全性、利便性、経済性を同時に満たすモビリティサービスを設計・導入・改善する手法を提案する。人の移動をサイバー空間で再現し、安全性を担保しながら、利便性と経済性の均衡点を探索する。

本稿の構成は次の通りである。2章で、モビリティサービスの要求について述べる。3章でモビリティサービスの導入・設計のアプローチ、4章でサービス設計・評価手法を述べる。5章で、サービス設計・評価手法の実装。6章で評価、7章で関連研究を述べ、8章でまとめる。

2. モビリティサービスの要求

モビリティサービスの導入及び改善を行う意思決定者は、どのようなエリアにどのような条件のモビリティサービスが導入可能か判断する必要がある。意思決定者にとつ

ては、自動運転機能を持ったモビリティを特定のエリアに導入する場合、新たなリスクと新たな利便性を特定エリアに導入することになるため、単純な費用便益の評価のみではなく、適切な判断基準・評価手法が必要となる。

人が日常生活を行うにあたり、子供を遊ばせたり、近隣の知人とのコミュニケーションを図ったりする場所であった街においても、高速で移動可能な自動車の侵入できる状況がこれまで常識とされてきた。しかしながら、我々は、日常生活を行う街では、人にやさしいモビリティのみを走行可能とし、排ガスを出し、高速移動する自動車とは分離することが望ましいと考える。ここでは、このような街を想定し、人にやさしいモビリティとしての自動運転電動車両(以下、ADEVと略記)を用いたサービスが満たすべき要求を記述する。

2.1 安全性

ADEVは、車両の外の歩行者等の人やADEVに乗車中の人に危害を加えるような走行をしてはならない。

2.2 利便性

ADEVを用いて移動することによって、人は移動時間の短縮、移動中の時間の有効活用できることで利便性を享受する。ADEVの運行は、人の移動に関し、最大限の利便性を提供する必要がある。

2.3 経済性

ADEVの安全運行には、ADEVの導入費用や維持費用の他にも、遠隔監視・制御のための費用、乗車場所の提示、ADEV運行環境であることを周知するための運行路や運行の路側の表示の設置等、安全運行に必要な環境維持のための費用が必要となる。持続可能なADEV運行の実現には、これらの費用の削減・圧縮が必要となる。

1 パナソニック株式会社

Panasonic Corporation

2 株式会社パナソニックシステムネットワーク開発研究所

Panasonic System Network R&D Lab Co. Ltd.

3 北陸先端大学院大学

Japan Advanced Institute of Science and technology

4 株式会社PTV グループジャパン

PTV Group Japan, Ltd.

3. モビリティサービスの設計・導入アプローチ

安全性, 利便性, 経済性の指標を向上させるための決定要因は互いに依存関係がある. その関係を考慮し均衡解を探索し, 妥当なサービスを決定する. 本稿では, この決定要因をサービス因子と呼ぶ. サービス因子の変化は, 安全性, 利便性, 経済性の指標に影響及ぼすため, これら状況が変化した場合を想定し, その状況に応じた均衡解を再度探索することで最適なサービスに変更する.

表 1 主要サービス因子
Table1 Key service factors

分類	サービス因子	主に影響を受ける指標
需要	移動需要 (人の流れ)	R, V
運行	コース, ステーション配置, 運行速度, 運行時間等	R, V, C
車両	乗車定員, センサー性能, ブレーキ性能, 加速性能, システム二重化実装度	R, C
オペレーション	遠隔監視, 遠隔制御による介入	V, C
交通量	交通参加者の種別, 量	R, V
環境	標識・表示, 信号等	R, C

サービス因子は, 具体的には, 表 1 で示す要素で構成される. 主に影響がある指標欄の R, V, C はそれぞれ安全性, 利便性, 経済性の指標に影響があるかどうかを示す. 例えば, 移動需要(人の流れ)が増えると利用価値が高まるため利便性の指標に影響するが, 歩行者も増えるため運行している ADEV との事故に至るリスクも増える. 他の交通参加者の交通量が増えれば安全性が低下するが乗り換え等により移動需要が増加することにつながれば利便性の指標は良化する. 運行に関するサービス因子である速度や車両性能の加減速性能は, 利用者の移動時間の短縮につながるため利便性の向上につながるが車両価格が上昇し経済性が悪化する. ブレーキやセンサーのシステムを二重化すると故障等に対する安全性は向上するが導入・維持のコストが高まるため経済性は悪化する. ADEV は, 例えば突然の走行路の封鎖等, 想定外の状況になれば停止することで安全性を担保する. このとき遠隔管制からの監視や介入(制御)することにより運行の継続性を担保する. このようなオペレーションはコスト要因であるが利便性の担保には必須となる. ADEV の運行環境では, 交通ルールを策定し, これを周囲の交通関係者である歩行者等に周知徹底する. この交通ルール策定や見直しや交通ルール徹底するための標識・表示, 信号等の設備投資が不十分であると事故のリス

スクが増大する.

ADEV を運行するサービスの設計においては, 運行する環境に応じてサービス因子を適切に設定し, 安全性を十分に担保したうえで, 利便性, 経済性のバランスを取る.

3.1 サイバー空間を用いた最適解探索

ADEV を運行するサービスの設計では, 複雑に関係したサービス因子の組合せの中から, 求める最適解を探索する必要がある. 実世界の ADEV の導入や運行を試行錯誤すると高コストになる. このため, サイバー空間で複雑に関連するサービス因子の関係を担保し, ADEV を運行する環境をシミュレートし, 移動需要に応じた最適解を探索する. 移動需要としては, 現実世界の人の流れを再現する.

3.2 大阪地区での自動運転ライドシェアサービス

企業内の MaaS のサービス実証として, 構内の社員を対象とした ADEV を用いたライドシェアサービスを展開している[1].

大阪のパナソニック株式会社の本社エリアの敷地内に乗車定員最大 4 名の小型 EV に自動運転のための装備(センサー, 認識・判断・操作を行う ECU, 機能安全系の装置, 二重系ブレーキ等)を導入し ADEV とした車両 4 台を用いた, ADEV ライドシェアサービスを 2019 年 10 月に開始した. 図 1 は, ADEV 車両の外観を示したものである. 外部をセンシングする LiDAR やカメラを複数搭載した小型の ADEV を用いたサービスであり社員であれば誰でも利用できる.

社内の敷地内で一周 2.4km の周回路を最大速度 20km の社内ルールの範囲内で運行している. 2021 年現在の運行は, 乗降を行う 3 個所のステーションで, 定期的に時刻表にしたがって運行するメトロ型運行と乗車希望に応じて出発地のステーションに迎車するオンデマンド運行の 2 つの運行形態でサービスを運用している.



図 1 大阪地区での社員向けサービスの車両
Fig. 1 Service vehicle for employees in the Osaka area

3.3 サービス更新サイクルを実現するためのデータヒュージョン・分析基盤

前節で説明した環境で得られたデータを正規化して蓄積し分析・可視化するためのツール群を整備してきている. 可視化ツールとしては, MapBox[2], OpenStreetMap[3],

Maxar[4] の出力を利用している。

図 2 は、人流可視化ツールの例である。人が建物や門から出入りする際に記録する入退室のデータから建物間の移動を集計しグループ化して色の濃さと線の幅で人流の多さを表現している。



図 2 人流量の可視化ツールの出力例

Fig.2 Output example of human flow visualization tool

グループ化することで大まかな移動の量を直観的に把握することができ、ステーションの配置の検討や、ADEVの運行ダイヤの策定に利用できる。

3.4 ミクロ交通シミュレータ (PTV Vissim)

移動要望を持った人が特定の ADEV に乗車できるかどうかは、ADEV に空席があるかといった因果関係を表現する必要がある。また、人の流れが多い運行環境で ADEV を運行すると ADEV と人(歩行者) が近接するリスクが高まる。このような因果関係の再現するシミュレータとして、ミクロ交通シミュレータである PTV Vissim[5] を採用する。

PTV Vissim はロンドンオリンピックの運用モデルとして活用された実績を持ち[6]、また自動運転車両と手動運転車両の共存を目指した欧州の研究プロジェクトに採用されるなど[7]、国内外問わず交通施策の検証や研究に広く利用されている。

4. サービス設計・評価手法の提案

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 3 に示す。移動需要、交通量の調査の後、当該エリアに導入するモビリティサービスの仮説を立案する。次に、このサービスの安全に実現するための安全設計を行った後、安全性、利便性、経済性の観点から妥当なサービスとなっているか評価を行い、モビリティサービスの導入

の意思決定を行う。

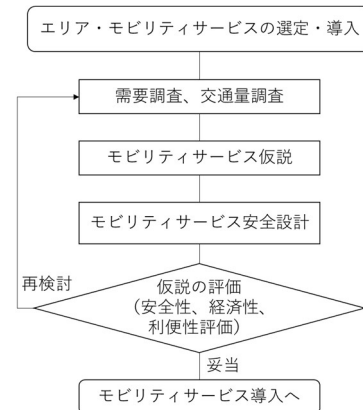


図 3 モビリティサービスの導入フロー

Fig.3 Mobility service introduction flow

式(1)は、「仮説の評価」の工程で、安全性、利便性、経済性を加味した評価指標の例である。

$$M = \alpha R + \beta V + \gamma C \quad (1)$$

$$R = \sum_{i=1}^n \left(A \left(\sum_{j=1}^m P_j(i) \right) \right) \quad (2)$$

$$V = \sum_{k=1}^t \left\{ r \left(T_{org}(k) - T_{shorten}(k) \right) \right\} \quad (3)$$

$$C = \sum_{j=1}^m C(j) + C_{ope} + C_{env} \quad (4)$$

上記の式(1)の α β γ は、安全性、利便性、経済性の指数間の重みを決める定数である。 α 、 γ には、マイナスの数値、 β をプラスの数値を設定する。 α β γ の絶対値は、意思決定者の意向により変更し繰り返し評価調整可能である。

4.1 安全性の指標

式(2) は安全性の指標であり、具体的には特定の ADEV_j と歩行者 i との間の近接回数を示す。P_j(i) は、ADEV_j と歩行者 i との距離が最高速度 V_{max}* 定数の範囲に入った回数である。図 3 の「モビリティサービス安全設計」の段階で危険な事象は排除できる車両性能、システム性能、運行条件を設計し、安全性を担保した上で ADEV の運行を計画する。「仮説の評価」の段階では、ADEV と歩行者との近接回数からヒヤリハット事象の発生回数を算出し、これをもとにハインリッヒの法則を適用し事故発生件数を算出するその事故の障害の程度から損害額に金額換算した値(円)を採用する。障害の程度は、事故時の運動エネルギーから、AIS: Abbreviated Injury Scale (簡易傷害スケール) [8]を用いて算出し、その障害の治療に必要な金額を損害額(円)として算出する。式(2)の関数 A()は、この損害金額への換算を行う関数である。

4.2 利便性の指標

式(3) は利便性の指標である。具体的には、T_{org}(k) - T_{short}(k)は、人が ADEV に乗ることで短縮できた時間(時間)であり、有効な時間が創出できたとし工数単価 r を掛け

金額に換算している。なお、本稿では r として健保等級として用いられる 4,500 円を採用した。

4.3 経済性の指標

式(4) は経済性の指標である。具体的には、 $C(j)$ は、 $ADEV_j$ の減価償却費、保守費用の費用(日割, 単位:円) $Cope$ は、 $ADEV$ を用いたライドシェアサービスのオペレーションに必要な運営費用(日割, 単位:円) である。 $Cenv$ は、同サービスを運用する環境面の維持費用(ステーション費用, 白線・ガードレール・標識等の設置費用 (日割, 単位:円)である。

4.4 評価指標を最大化する最適解の探索

意思決定者は、安全性を担保しながら、利便性と経済性の均衡点を探索する。具体的には、金額に統一された式(1)を最大化する $ADEV$ の運行サービスを策定する。安全性の担保のための方針として $\sum_{j=1}^m P_j(i)$ が一定数以下となる条件で式(1) の M を最大化するサービス因子の組合せを探索する。

5. サービス設計・評価手法の実装

本章では、3.2 節で説明した大阪地区での $ADEV$ の運行サービス対象としたサービス設計・評価手法の実装方法を説明する。

5.1 人流と乗車の再現

構内の人流データとして、構内のそれぞれの建物の入退室のデータを用いて、マイクロ交通シミュレータ PTV Vissim で人の動きを再現する。シミュレータの地図の構内の建物の出入り口に人の移動が発生する出発点や人の移動が完了する目的点を設置し、入退室データに応じた人の移動を再現する。このため、現実とシミュレータ上の人流の発生量は完全に一致し、 $ADEV$ の空席状況や構内を移動する歩行者の流れを正確に再現でき、 $ADEV$ と人の近接するリスクを評価できる。

特定の人の移動が発生した際に、図 4 に示す乗車判定アルゴリズムに従ってサービス車両に乗車すべく乗車ステーションに向かうか、目的点まで徒歩で移動するか決定する。つまり、歩行者が移動元の建物のゲート 1 から出て、目的の建物のゲート 2 に移動する入退室データをもとに、ゲート 1 から出たタイミングで乗車ステーションまで歩行し、到着する $ADEV$ を待ち、乗車して移動して降車ステーションで降車して目的の建物のゲート 2 に移動する時間の合計(図中の $A+B+C+D$) が $ADEV$ に乗車せず最短経路で歩行して移動する時間(図 4 の E) より短い場合に、人は $ADEV$ に乗車すると判定する。この乗車判定は、人が建物の出口のゲートに出たタイミングで、最短経路で歩いて移動するか、 $ADEV$ で移動するかを判断するための情報にアクセスし判断可能であることを前提としている。実際の歩

行者が $ADEV$ に乗車するかどうか判定する際には、移動時間を短縮できる量が多い場合に乗車すると判断する人や、荷物などを持っており多少移動時間が伸びても $ADEV$ に乗車すると判断する人が存在すると想定できる。このためシミュレーションでは、乗車の判断を補正する時間を設定する。

歩行者は横断歩道で車道を横断したり、歩道を歩く人数が多い場合、車道にはみ出して追い越したりするため、人の流れが多い交差点や通りでは、 $ADEV$ と近接するリスクが高まる。シミュレーションでは、図 5 に示す $risk_d$ の車両速度に比例して長くなる円形の領域に、歩行者が入る回数をヒヤリハット事象につながる件数としてカウントする。

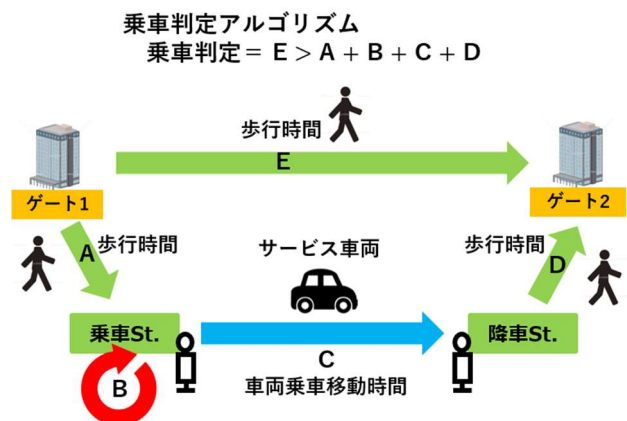


図 4 乗車判定アルゴリズム
Fig.4 Boarding judgment algorithm

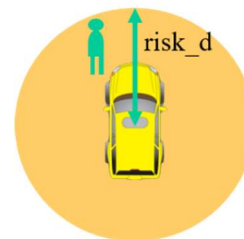


図 5 安全性の指標に用いる $ADEV$ 近傍領域
Fig.5 Area near $ADEV$ used as an index of safety

5.2 HPC(StarBED) を用いた全探索

マイクロ交通シミュレータは、マクロ交通シミュレータと比較して、 $ADEV$ 、人といった対象物の動作を細粒度で再現するため演算時間を要する。複数のサービス因子の組合せの中から、最適な解を短期間で探索するため、複数のシミュレーションの並列実行を可能とする HPC を用いる。HPC として、PTV Vissim がベースとしている Windows 系の OS を前提とした展開や並行実行の実績[9]がある StarBED[10]を採用する。並行実行の自動化環境として、HTCondor[11]を StarBED に導入し、サービス因子の組み合わせたすべてのパターンでのシミュレーションを実行し、実

行結果から最適解を特定する。

5.3 最適解の探索（焼きなまし法）

HPC による並行実行による処理能力は HPC のノード数に比例するため、HPC を用いても爆発的な組み合わせパターンを増加を吸収することはできない。つまり、複数のサービス因子に関するパラメータの評価域の全域のシミュレーションを実行すると不効率である。そこで、4 章で定義した評価指標 M を最大化するサービス因子の組合を、最適手法の焼きなまし法[12]で探索する。なお、多峰性がある最適解の探索方法としては、焼きなまし法の他に、タブー探索、ネルダーミード法等を用いることで局所最適解に陥るリスクを低減できる。

6. 評価

これまで説明した手法を用いて、大阪地区での ADEV の運行の最適解を、HPC を用いて探索した。

6.1 人流と乗車の再現

ADEV の運行を想定し、表 1 で示した関係を加味したサービス因子から、大阪地区での運行サービスに必要な要素を抽出、パラメータ化しシミュレータに実装した。具体的には、最高速度、乗車定員、車両台数とメトロ型運行とオンデマンド運行の比率、乗車の判断を補正する時間、運行経路パターンの 5 つのサービス因子をパラメータ化した。

6.1.1 評価範囲の確定

大阪地区では 20km/h に構内速度が限定されているため、最高速度は、これ以下の範囲で 6km/h, 10km/h, 14km/h, 18km/h とした。ADEV の種別は小型の 1 種類で乗車定員数は、1 名から 4 名、投入台数は 2 台から 5 台、運行形態は、メトロ型運行とオンデマンド運行の混在比を網羅的に 10 パターンとした。乗車の判断する際に希望する短縮時間は、より短縮の移動を好む人から多少移動時間が伸びても ADEV に乗車する人の判断を模倣し評価するため、-120 秒、-60 秒、0 秒、+60 秒、+120 秒の範囲とした。また、運行経路としては、移動エリアの両端を中心に乗降ステーションを配置する運行経路と移動エリアの中央に乗降ステーションを配置する運行経路の 2 通りとした。これらの 5 つのパラメータの組合せは、1600 通りとなる（表 2）

6.1.2 評価指標の重みの特定

本稿では、4 章で説明した評価指標の重みとして、相対的に経済性と利便性を重視する比率、条件① $(\alpha, \beta, \gamma) = (-1, 1, -1)$ と、相対的に安全性を重視する比率、条件② $(\alpha, \beta, \gamma) = (-3, 1, -1)$ の 2 通りの探索例を示す。

6.2 HPC の並列処理による最適解の算出（全探索）

StarBED の 30 ノードを用いて表 2 に示す 1600 通りのサービス因子の組合せのシミュレーションを並列実行した。

これらの 1600 パターンのシミュレーション実行は 1 台の PC でシーケンシャルに実行した場合、9287 時間必要と

なるが、30 ノードで 1 ノードあたり 4 プロセスの PTV Vissim を並列実行し、要した時間は、81.12 時間であった。このとき使用した機材の性能は表 3 の通りである。

表 2 サービス因子の組合せ

Table2 Combination of service factors

分類	サービス因子	パラメータ値
需要	人流データ	2019 年 9 月 9 日分
	希望短縮時間	-120, -60, 0, 60, 120
車両	最高速度(km/h)	6, 10, 14, 18
	乗車定員 (人)	1,2,3,4
運行	投入台数 (メトロ型—オンデマンド型)	2(1-1), 3(1-2), 3(2-1), 4(1-3), 4(2-2), 4(3-1), 5(1-4), 5(2-3), 5(3-2), 5(4-1)
	乗降ステーション配置 (図 6, 図 7)	中間ステーションあり, なし



図 6 中間ステーションを配置しない運行経路
 Fig.6 Operation route without intermediate stations



図 7 中間ステーションを配置する運行経路
 Fig.7 Operation route with the intermediate station

表 3 使用機材の仕様 (1 ノード)

Table3 Specifications of equipment used (1 node)

CPU	Intel Xeon E5-2683 v4 (2.1GHz/16core) × 2
Memory	32GB RDIMM (DDR4-2400/mb ECC) × 12
Storage	HDD 1.2TB × 1、SSD 1.6TB × 1
NIC	10GigE × 2、1GigE × 1

表 4 実行時間比較

Table 4 Execution time comparison

ノード数・探索手段 (条件)	実行時間
1 ノードシングルプロセス (全探索)	9287 時間
30 ノードで 120 並列 (全探索)	81.12 時間
1 ノードで焼きなまし法(条件①)	172.1 時間
1 ノードで焼きなまし法(条件②)	127.7 時間

6.3 焼きなまし法を用いた最適解の探索

6.1.1 で求めた評価指標 M を最大化するサービス因子の組合せを 6.1.2 で示した評価指標の重みを用いて焼きなまし法で探索した. それぞれの重みにおける最適解を 1 ノードを利用したとき, 条件① は 38 回の試行(172.1 時間), 条件②は 30 回の試行(127.7 時間) で探索できた(表 4). 条件①, 条件② で得られた最適解におけるサービス因子の組み合わせを表 5 に示す.

表 5 最適解の探索結果

Table 5 Optimal solution search result

サービス因子	条件①の最適解	条件②の最適解
希望短縮時間	120	60
最高速度(km/h)	10	6
乗車定員 (人)	3	2
投入台数 (メトロ型—オンデマンド型)	5(2-3)	5(3-2)
乗降ステーション配置	中間ステーションあり	中間ステーションあり

条件①及び条件②における最適解の探索過程を図 8, 図 9 に示す. (a)は評価指標である安全性(Risk)、利便性(Value)、経済性(Cost)を 3 軸にとり, 式 (1) で計算される評価指標 M の値で色付けしている. (b), (c), (d), (e)は, それぞれ探索の試行回数に対する Risk, Value, Cost, 評価指標 M の変化である.

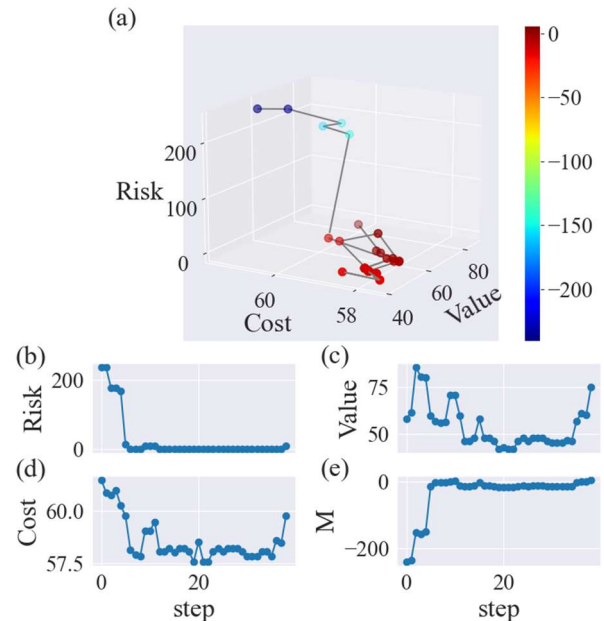


図 8 経済性と利便性を重視した条件における最適解の探索過程

Fig.8 Search process for optimal solution under conditions that emphasize economy and convenience

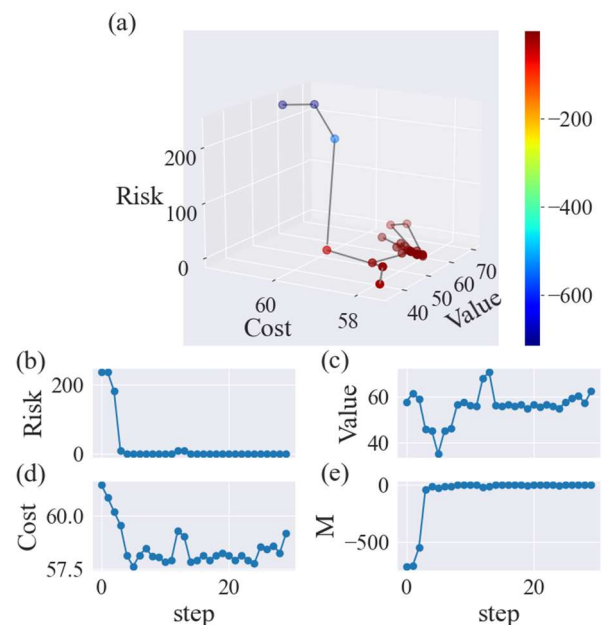


図 9 安全性を重視した条件における最適解の探索過程

Fig.9 Search process for optimal solution under conditions that emphasize safety

6.4 モビリティサービスの導入

前節で算出した最適解から実運用すべきモビリティサービスを特定する. 条件①の最適解は, 乗車定員が多い車両を投入して利便性を高める手段があることを示している. 一方条件②の最適解は, 最高速度が低いため, 直観的にも安全である. また, ヒヤリハット事象の発生頻度や発

生しやすい場所は、シミュレーション結果で確認できる。図 10 は、ヒヤリハットの発生場所を可視化したものである。

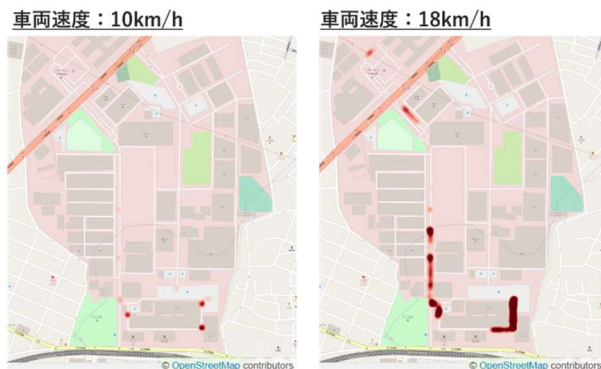


図 10 ヒヤリハットの発生場所

Fig.10 Candidate location of the traffic accident

意思決定者は、それぞれの解の安全性、経済性、利便性の指標の値やヒヤリハット事象の発生確率が高い場所の情報を参考にし、当該エリアに導入するモビリティサービスを決定する。例えば、図 10 の右図で示されるヒヤリハット発生場所の最高速度を制限した運行計画を再立案し、再びシミュレーションにより仮説の評価を行って納得できる運行計画を決定する。

7. 関連研究

人の流れ表現する方法として、洪水のように巨視的な動きとして捉える方法[13]と引力斥力で人の動きをとらえる微視的な方法[14]がある。微視的な方法では、歩道上での帯状集団の生成などが観測されることが知られており、車道へのはみだしなどリスクにつながるリアルな行動を再現できる。本稿では微視的な方法を用いている。

文献[15]では、交通シミュレータを用いた交通事故予測につながる事象の分析方法を説明している。ヒヤリハットデータベースを用いて、特定交差点でのヒヤリハット発生件数を算出している。また、交差点での車間距離の統計値に関して、シミュレータで算出した値と観測値の比較を示している。しかし、予防安全を目的とした交通事故の分析を主目的とした手法であり、特定エリアの運行ダイヤの変更によってヒヤリハット事象の発生頻度の変化、すなわち安全性の指標の変化を再現、評価しておらず、特定の交差点での現象の分析となっており、利便性や経済性の評価は含まれていない。

文献[16]は、自動運転社会下の街路空間の評価指標の作成と乗降環境を考慮した街路空間の可視化を行っている。ステーションの配置の検討のための評価指標として、遅れ時間と旅行速度を用いて、乗降場の規模が大きいほど駐車・発進挙動の車両に遭遇する回数が増加するため、遅れ時間

が増加する挙動をシミュレーションで示し、バス型ステーションと路上駐車型のステーションと比較すると路上駐車型のステーションのほうが 2 倍程度遅れ時間が増加するという評価結果を示している。利便性に関する指標を導入しシミュレータを用いてステーション配置の検討に用いている点で本稿と共通点があるが、安全性の指標に関しては考慮されておらず、経済性についても定性的な分析のみである点が異なる。

文献[17]は、自動運転車両の配車アルゴリズムをマルチエージェント上に実装し、カリフォルニアの街で 5 分以内の待ち時間にするために必要となる車両台数を評価し、ライドシェアのほうが少ない台数で需要をカバーでき、走行距離も 26%少なくなるという分析を行っている。自動運転車両同士の衝突や追従は考慮されておらず、自動運転車両の運行の安全性担保に関する考察は含まれていない。

文献[18]では、マルチモーダル検索結果等の 2 次データを用いて公共交通連携及び補完向けにワンウェイ型カーシェアリングを活用するためのステーション探索方法として、駅からの距離だけでなく、ステーション候補間のトリップ量について、スマートフォン位置情報から移動量を推定する手法を採用し、利用頻度が高くなると予測できるステーション位置を探索する方法を提案している。位置情報に関して実際の人の移動データを用いる点や利便性の指標としてステーション配置の評価に移動時間の差分を含めた指標を用いる点で類似しているが、同文献は人間が運転する一般のカーシェアリングを対象としているのに対して、本稿では、自動運転車両の運行を対象としており、安全性も評価指標に含めている点が異なる。

文献[19]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[20]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、自由軌道である自動運転車両の適切な走行路や運行頻度を扱う点が異なる。

本稿で提案する手法は、特定エリアの運行サービスによって得られる利便性と安全性と経済性の指標の変化を同時に評価する手法であり ADEV の運行サービス設計に有効である。

8. まとめ

本稿では、人の活動データの分析に基づき、安全性、利便性、経済性を同時に満たすモビリティサービスを開発・改善する手法として、企業内の建物の出入り口のデータを活用し、人の移動を再現し、自動運転車両による運行サービスを評価する方式を示した。安全性の指標としては、人

と車両の近接回数から算出した事故の損害額、経済性の指標としては、移動時間の短縮効果、経済性の指標としては車両の運行に関するコストを用いた。実際に現実に発生する人流データを再現し、これら3つの指標の同時に評価する手法は、著者の知る限りこれまで報告されていない。人の移動の再現は高コストであるため30ノードを用いた並列処理での実行時間を評価し、シングルプロセスで9287時間かかる評価を81.12時間で実行できることを確認した。焼きなまし法を用いて、1ノードを用いた処理で、安全性を重視した条件、経済性と利便性を重視した条件の最適解を探索し、それぞれ、38回の試行を174.1時間、30回の試行を127.7時間で探索できることを示した。すなわち、わずか1ノードで、数日程度の実用的な時間で探索できることを確認した。

実世界で発生する人流をサイバー空間で再現し、複雑に絡み合うサービス因子の関係性を実装したシミュレーションで安全性を担保しつつ、利便性や経済性の均衡点を解析する手法は、自動運転車両が様々なエリアに実装されていく中で重要になると考える。走行路を変更する、最高速度を上げる、新たなステーションや安全性の担保のため、専用レーンやガードレールを設置する等、実世界に実装するには、危険であったり、高コストであったりするような施策の評価は、サイバー空間での再現が容易である。

特定のエリアに対し、自動運転を含むモビリティサービスの導入を決定する意思決定者にとって、ヒヤリハット事象が発生しうる場所や発生確率は大きな関心事となる。本稿で示したサービス設計・評価手法は、費用対便益の評価に、ヒヤリハット事象の発生度合や損害額といった安全性の指標を加えて同時評価を行い、インタラクティブにサービス案を提示することで、エビデンスベースで意思決定を支援するものである。この手法は、今後、新たな自動運転機能を備えた様々なモビリティを特定のエリアに導入する際に有効である。

今後は、自走配送ロボットを用いた公道でのラストマイル配送サービスの設計と評価に本提案手法を適用し、投入するサービスやエリアに合った適切な安全性、利便性、経済性の指標や選定車両・台数、適用エリアの拡大等、サービスの段階的投入を検討できる手法に拡張していきたい。

謝辞 NICTの安田真悟氏には、OSの複製方法等に関し助言をいただいた。北陸StarBED技術センター各位には、StarBEDでの検証実験にサポートをいただいた。パナソニック株式会社モビリティ事業戦略室及びA Iソリューションセンターの関係メンバには、大阪地区の企業内エリアにおける実証のデータ提供や運行実証において、協力をいただいた。各位に感謝申し上げたい。

参考文献

- [1] 本田義雅, 東島 勝義, 自働運転サービス開発と当社構内でのサービス実証, *Panasonic Technical Journal* Vol. 67, No.1, May 2021
- [2] MapBox, <https://www.mapbox.com/>
- [3] OpenStreetMap, <https://www.openstreetmap.org/>
- [4] Maxar, <http://www.digitalglobe.com/>
- [5] PTV Vissim Home Page, <https://www.ptvgroup.com/en/solutions/products/ptv-vissim/>
- [6] Dosunmu, Bayo Delivering London 2012: Transport demand forecasting, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport*, Vol 165, 4, 2012, pp. 257-266
- [7] CoEXist, <https://www.h2020-coexist.eu/>
- [8] AIS, <https://www.aaam.org/abbreviated-injury-scale-ais/>
- [9] 太田 悟史, 安田 真悟, 湯村 翼, 高野 祐輝(2016), 次世代サイバー演習環境に向けて, 分散協調とモバイルシンポジウム2016 論文集, pp. 1776 - 1782
- [10] Toshiyuki Miyachi, Ken-ichi Chinen and Yoichi Shinoda(2006), StarBED and SpringOS large-scale general purpose network testbed and supporting software, *International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools (Valuetools)*, ACM Press, ISBN 1-59593-504-5, Pisa, Italy, Oct.2006.
- [11] HTcondor home page, <https://research.cs.wisc.edu/htcondor/>
- [12] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr., M. P. Vecchi, Optimization by Simulated Annealing, *Science*, 13 May 1983, Vol. 220, Issue 4598, pp. 671-680
- [13] Henderson, L. F. The Statistics of Crowd Fluids. *Nature*, Vol. 229, 1971, pp. 381-383 Henderson, L. F. The Statistics of Crowd Fluids. *Nature*, Vol. 229, 1971, pp. 381-383
- [14] Helbing, D., and P. Molnar. Social Force Model for Pedestrian Dynamics. *Physical Review E*, Vol. 51, 1995, pp. 4282-4286
- [15] 交通事故予測シミュレーション検定検討委員会, 交通事故予測シミュレーションシステム検証マニュアル, <https://www.jsae.or.jp/tops/topics/1040/1040-1A.pdf>, 2013年4月発行
- [16] 岡野 舜, 高山 宇宙, 三浦 清洋, 森本 章倫, レベル4の自動運転車導入における乗降環境を考慮した街路空間に関する研究, 第39回交通工学研究発表会論文集, 2020年6巻2号 p. A_105-A_112
- [17] 山本 真之, 梶 大介, 金森 亮, 落合 純一, 都市部における自動運転ライドシェアのシミュレーション分析, *Denso technical review* Denso technical review 24, 36-41, 2019
- [18] 桑原 昌広, 吉岡 顕, 松本 浩和, 早田 敏也, 公共交通連携向けワンウェイ型カーシェアリングのステーション候補探索手法提案・検証, 第39回交通工学研究発表会論文集, 2020年6巻2号 p.B_11-B_18
- [19] 岩倉 成志, 家田 仁, 鉄道プロジェクトの費用対効果分析—実用化の系譜と課題, 運輸政策研究, 1998-1999, 1巻, 3号, p. 002-013
- [20] 費用便益分析マニュアル, 国土交通省 道路局, 2018年2月