

コンシューマ・サービス論文

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

村本 衛^{1,2,a)} 河本 弘和¹ 東島 勝義¹ 古川 量也¹
澤井 薫³ 知念 賢一^{2,4} 篠田 陽一² 三浦 基嗣⁵

受付日 2021年10月10日, 採録日 2022年2月10日

概要: 人の生活圏への新たなモビリティサービスの導入・維持には、人混在環境での運用が求められるため、これまで鉄道や道路の計画・導入・維持の評価に用いられてきた費用便益分析による評価では、事故発生のある場所や頻度や事故の重篤度が特定できず、安全性の評価の観点で不十分である。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の設計・評価手法を提案する。人の移動の発生頻度により車両の利用率や安全性指標が変動する等、人やモノを運ぶモビリティサービスの設計には、多面的な要素が関係する。これらの指標に関与する人や車両の移動と乗車行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。具体的には、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、移動する人と車両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。企業構内の自動運転ライドシェアサービスを題材に最適解探索を行った結果、現実にヒヤリハット事象が多く発生する場所が算出され、最適解としては、乗車定員最大の車両を投入しない解が最適解として抽出された。

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

Proposal of Service Design/Evaluation Method for the Operation of Self-driving Electric Vehicles in the Living Area where the Means of Transportation Can be Selected

EIICHI MURAMOTO^{1,2,a)} HIROKAZU KAWAMOTO¹ MASAYOSHI TOJIMA¹ KAZUYA FURUKAWA¹
KAORU SAWAI³ KEN-ICHI CHINEN^{2,4} YOICHI SHINODA² MOTOTSUGU MIURA⁵

Received: October 10, 2021, Accepted: February 10, 2022

Abstract: Since the introduction and maintenance of new mobility services in the living area of people requires operation in a mixed environment, the cost-benefit analysis that has been used to evaluate the planning, introduction and maintenance of railways and roads is insufficient, because it cannot identify the location and frequency of possible accidents and the severity of the accident. We propose a method for developing and improving mobility services that simultaneously satisfy safety, convenience, and economy. There are multiple factors involved and affect each other in the design of mobility services that carry people and goods, for example convenience factor of vehicle utilization is improved depending on the frequency movement of people and safety indicators is declined also depending on it. We reproduce the movement and riding behavior of people and vehicles involved in these indicators in cyberspace and search the equilibrium point between convenience and economy while ensuring safety. Specifically, we adopt the premises movement data within the company as human activity data, and the accident damage amount calculated from the proximity frequency of the moving person and the vehicle as a safety index, and we search for an equilibrium between convenience of shorten the travel time and its operating costs. As a result of searching for the optimum solution of the automatic driving ride sharing service in the premises of the company, the place where many near miss accident events occur in real space was calculated, and the optimum solution that does not put in the vehicle with the maximum passenger capacity was extracted.

Keywords: self-driving service, service design, transportation planning, decision simulation

1. はじめに

環境にやさしい電動車両を用いて人やモノを運ぶ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 [1]。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。

人の生活圏への新たなモビリティサービスの導入・維持には、人混在環境での運用が求められるため、これまで鉄道や道路の計画・導入・維持の評価に用いられてきた費用便益分析による評価では、事故発生の可能性がある場所や頻度や事故の重篤度が特定できず、安全性の評価の観点で不十分である。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の設計・評価手法を提案する。

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

2. 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とらえる方法 [2] と引力斥力で人の動きをとらえる微視的な方法 [3] がある。微視的な方法では、歩道上での帯状集団の生成等が観測されることが知られており、車道へのはみだし等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 [4] 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るヒヤリハット事象の発生頻度の変化は評価しておらず、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 [5] 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を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、経済性に関して定性的な分析のみである点が異なる。

文献 [6] 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。自動運転車両どうし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 [7] 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および補完向けにワンウェイ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 [8] 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 [9] 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。

¹ パナソニック株式会社

Panasonic Corporation, Kadoma, Osaka 571-8501, Japan

² 北陸先端科学技術大学院大学

Japan Advanced Institute of Science and Technology, Nomi, Ishikawa 923-1292, Japan

³ 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., Sendai, Miyagi 981-3206, Japan

⁴ 東京都立産業技術高等専門学校

Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, Shinagawa, Tokyo 140-0011, Japan

⁵ 株式会社 PTV グループジャパン

PTV Group Japan, Ltd., Setagaya, Tokyo 156-0057, Japan

a) muramoto.eiichi@jp.panasonic.com

本稿では、人の混在環境で自由軌道を走行する自動運転電動車両（以下、ADEV と略記）の運行サービス設計・評価に有効な手法として、費用便益分析を拡張し、計算機の能力を活用し、人や車両の動きを再現することで安全性視点を強化し、運行サービスの設計において安全性、経済性、利便性を定量的に把握しながら意思決定することを実現する。

3. モビリティサービスの要求

モビリティサービスの導入およ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。意思決定者にとっては、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 [10]。しかしながら、我々は、日常生活を行う街では、人の存在に適応し低速で走行することで人混在環境でも人に恐怖心を与えない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、ADEV を用いたサービスが満たすべき要求を記述する。

3.1 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。

3.2 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、移動中の時間を有効に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。

3.3 経済性

ADEV の安全運行には、ADEV の導入費用や維持費用のほかにも、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。

4. 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

表 1 主要サービス因子

Table 1 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

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、これらの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。

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 3.1, 3.2, 3.3 節で示した安全性、利便性、経済性の指標に影響があるかどうかを示す。たとえば、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。運行に関係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、たと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・見直しや交通ルールを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、安全性を十分担保したうえで、利便性、経済性のバランスをとる。



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.

4.1 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。

4.2 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 [11]。

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、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 1 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 カ所のステーションで、定期的な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。

4.3 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 [12], OpenStreetMap [13], Maxar [14] の出力を利用している。

図 2 は、人流量可視化ツールの例である。人が建物や門

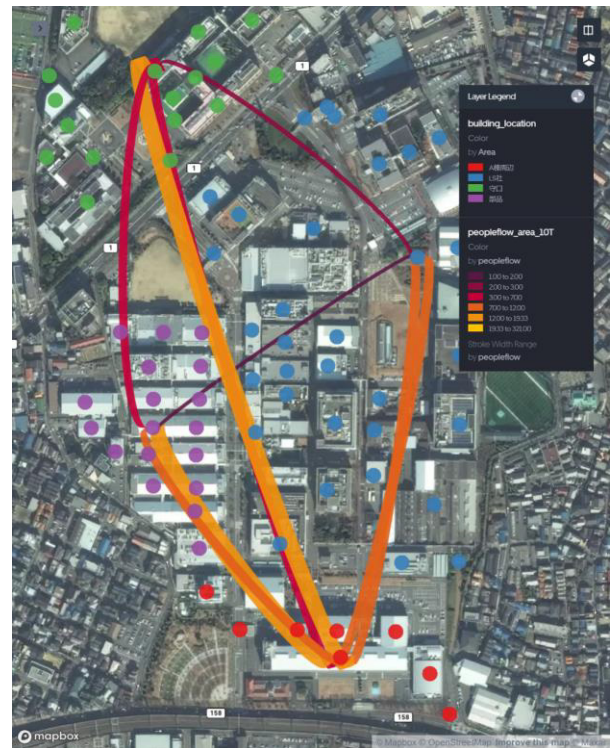


図 2 人流量の可視化ツールの出力例

Fig. 2 Output example of human flow visualization tool.

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。

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。

4.4 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を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 [15] 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 [16], 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等 [17], 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。

5. 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。まず、当該エリアの移動需要、交通量の調査を行い、車両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、ステーション配置、走行路、運行

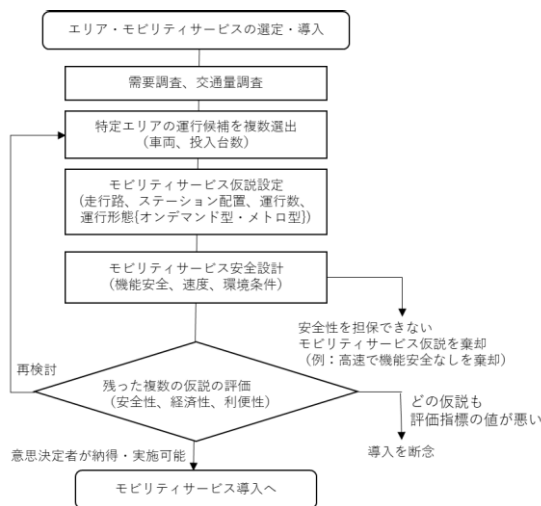


図 3 モビリティサービスの導入フロー

Fig. 3 Mobility service introduction flow.

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。たとえば、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、モビリティサービス導入の意思決定を行う。

式 (1) で M 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。

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

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

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

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

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 は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。

5.1 安全性の指標

式 (2) で定義する R 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、安全性を担保したう

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) [18] 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。

5.2 利便性の指標

式 (3) で定義する V は利便性の指標である。具体的には、 $T_{org}(k) - T_{shorten}(k)$ 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 として代表的な従業員の健保等級として用いられる 4,500 円を採用した。

5.3 経済性の指標

式 (4) で定義する C 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、保守の費用 (日割、単位: 円) C_{ope} 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。 C_{env} 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。

5.4 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。

6. サービス設計・評価手法の実装

本章では、4.2 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。

6.1 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、ミ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

乗車判定アルゴリズム
乗車判定 = $E > A + B + C + D$

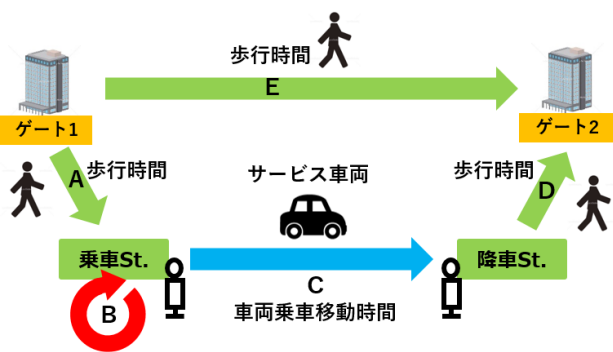


図 4 乗車判定アルゴリズム
Fig. 4 Boarding judgment algorithm.

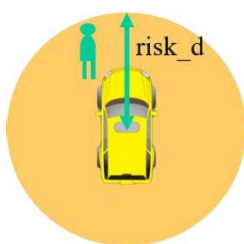


図 5 安全性の指標に用いる ADEV 近傍領域
Fig. 5 Area near ADEV used as an index of safety.

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を決定する。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、降車ステーションで降車し、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。また、この乗車判定のアルゴリズムは、身体的理由により歩行が困難である人や乗車のコストを支払う団体に所属しない人等、行動制約がある場合には、このアルゴリズムの対象外となる。

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。

6.2 HPC (StarBED) を用いた全探索

ミ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 [19] がある StarBED [20] を採用する。並行実行の自動化環境として、HTCondor [21] を StarBED に導入し、サービス因子を組み合わせたすべてのパターン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。

6.3 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合せパターンの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、5 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せを、最適化手法の焼きなまし法 [22] 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、焼きなまし法のほかに、タブー探索、ネルダーミッ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。

7. 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。

7.1 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 (希望短縮時間)、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。

7.1.1 評価範囲の確定

大阪地区では 20 km/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 6 km/h, 10 km/h, 14 km/h, 18 km/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。乗車を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

表 2 サービス因子の組合せ
Table 2 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	

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、1,600通りとなる(表2)。

7.1.2 評価指標の重みの特定

本稿では、5章で説明した評価指標の重みとして、金額換算した指標をその通りの重みで評価するバランス型 $(\alpha, \beta, \gamma) = (-1, 1, -1)$ と、それぞれ相対的に安全性、利便性、経済性を3倍重視する条件の合計4条件の探索例を示す。

7.2 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1,600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1,600パターンのシミュレーション実行は1台のPCでシケンシャルに実行した場合、9,287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仕様は表3のとおりである。

7.3 焼きなまし法を用いた最適解の探索

7.1.1項で求めた評価指標Mを最大化するサービス因子の組合せを7.1.2項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。実行時間を表4に、それぞれの最適解におけるサービス因子の組合せを表5に示す。表5の投入台数欄は、 $x(y-z)$ の形式で示しており、xは合計台数で、そのうちy, zはそれぞれメトロ型、オンデマンド型の台数である。参考のため最適解の探索過程を付録に付す。

7.4 モビリティサービスの導入に向けた最適解の吟味

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。バランス型の最適解は、最大4名の乗車定員ではなく、3名の車両を投入する解である。単純な費



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.

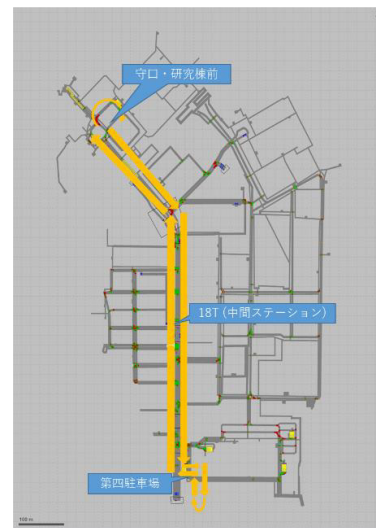


図7 中間ステーションを配置する運行経路
Fig. 7 Operation route with the intermediate station.

表3 使用機材の仕様(1ノード)

Table 3 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

用便益計算では、最大定員での運行の便益が高いと判断しがちであるが、乗車定員を増やすと車両が大型化し総重量が増え、安全性の指標が悪化するにもかかわらず空席で走らせることが多くなり利便性の指標が良化しないため、3名の乗車定員の車両の運行が最適であると判定している。安全性重視の最適解は、最高速度が低く小型であるため、安全である。利便性重視の最適解は、バランス型と比較して希望短縮時間を小さくする解となっている。すなわち乗車判定時に徒歩で移動するのと同様もしくは少しでも短縮で

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(バランス型)	172.1 時間
1 ノードで焼きなまし法(安全性重視)	127.7 時間
1 ノードで焼きなまし法(利便性重視)	127.7 時間
1 ノードで焼きなまし法(経済性重視)	121.9 時間

表 5 最適解の探索結果

Table 5 Optimal solution search result.

条件	バラン ス型	安全性 重視	利便性 重視	経済性 重視
(α, β, γ)	(-1,1,-1)	(-3,1,-1)	(-1,3,-1)	(-1,1,-3)
希望短縮 時間(s)	120	60	0	120
最高速度 (km/h)	10	6	10	10
乗車定員 (人)	3	2	4	4
投入台数	5(2-3)	5(3-2)	5(3-2)	5(2-3)
中間ステ ーション	あり	あり	あり	あり
M の値	6.16	-0.66	165.5	-114.2

きる人が乗車する解が最適となる。これは現実世界では、予約システムで積極的に空車を提示して乗車を促し、利用者に乗車のメリットを訴求することで実現を目指すことになる。これに対し経済性重視の最適解では、希望短縮時間は、バランス型と同等だが乗車定員は4名の比較的大きな車両を投入すべきという結論となっている。表5で示したMの値が正の値となるのは利便性重視の運行である。このとき意思決定者は、利便性重視の運行を行ってよいか、安全性の指標を確認し、リスク発生場所を特定し追加対策することで、より好ましい運行が探索できないか検討する。

図8は、ヒヤリハットの発生場所を可視化したものである。図8の左(最大速度10km/h運行時)のヒヤリハット発生地点は、交通量と道路状況を勘案したリスク箇所として現場での感覚と一致している。

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や利用促進策を決定する。

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。たとえば、図8

車両速度：10km/h



車両速度：18km/h



図8 ヒヤリハットの発生場所

Fig. 8 Location candidate of the traffic accident.

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。

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手法を示した。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つの指標を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9,287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、バランス型と安全性、利便性、経済性を重視した条件で最適解を探索し、1ノードを用いた処理で、174.1時間から121.9時間で探索できることを示した。すなわち、わずか数並列で週末程度の実用的な時間で探索できることを確認した。

シミュレーションで抽出された最適解は、安全性の指標を考慮しているため、単純な投資対便益分析では選定されない解となっている。シミュレーション結果で明らかになったヒヤリハット発生場所は、現実の運用での観測とかなり一致している。

本稿で示した手法は、費用便益の分析に加え、計算機能力を用いて人や車両の動きを再現することで安全性視点を強化し、車両の空車走行による非効率性等、経済性の評価を含めたサービスの全体像を把握、評価する手法である。

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。大型車両を導入する、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への拡張やマルチモーダルな交通の乗り換えへの適用を通じて、ひな形化、一般化を推進したい。

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およびAI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] 東島勝義：コミュニティを支える次世代モビリティサービス，都市計画 353号，Vol.7, No.6, pp.74-75 (2021).
- [2] Henderson, L.F.: The Statistics of Crowd Fluids, *Nature*, Vol.229, pp.381-383 (1971).
- [3] Helbing, D. and Molnar, P.: Social Force Model for Pedestrian Dynamics, *Physical Review E*, Vol.51, pp.4282-4286 (1995).
- [4] 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 (2013), 入手先 (<https://www.jsae.or.jp/tops/topics/1040/1040-1A.pdf>)
- [5] 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，Vol.6, No.2, pp.A.105-A.112 (2020).
- [6] 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*, Vol.24, pp.36-41 (2019).
- [7] 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，Vol.6, No.2, pp.B.11-B.18 (2020).
- [8] 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，Vol.1, No.3, pp.2-13 (1999).
 - [9] 国土交通省道路局：費用便益分析マニュアル (2018).
 - [10] 国土交通省総合政策局：生活道路の交通安全確保に関する地方自治体等の施策の実態調査報告書 (2017).
 - [11] 本田義雅, 東島勝義：自動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 (2021).
 - [12] MapBox, available from (<https://www.mapbox.com/>)
 - [13] OpenStreetMap, available from (<https://www.openstreetmap.org/>)
 - [14] Maxar, available from (<http://www.digitalglobe.com/>)
 - [15] PTV Vissim Home Page, available from (<https://www.ptvgroup.com/en/solutions/products/ptv-vissim/>)
 - [16] Dosunmu, Bayo Delivering London 2012: Transport demand forecasting, *Proc. Institution of Civil Engineers – Transport*, Vol.165, No.4, pp.257-266 (2012).
 - [17] CoEXist, available from (<https://www.h2020-coexist.eu/>)
 - [18] AIS, available from (<https://www.aaam.org/abbreviated-injury-scale-ais/>)
 - [19] 太田悟史, 安田真悟, 湯村 翼, 高野祐輝：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 (2016).
 - [20] Miyachi, T., Chinen, K. and Shinoda, Y.: 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 (2006).
 - [21] HTcondor home page, available from (<https://research.cs.wisc.edu/htcondor/>)
 - [22] Kirkpatrick, S., Gelatt Jr. C.D., Vecchi, M.P.: Optimization by Simulated Annealing, *Science*, Vol.220, No.4598, pp.671-680 (1983).

付 録

焼きなまし法による最適解探索と安全性、利便性、経済性および評価指標 M の値の変遷の様子を図 A-1, 図 A-2, 図 A-3, 図 A-4 に示す。

図 A-1 から順にバランス型、安全性重視、利便性重視、経済性重視の際の探索の様子である。

図中の (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に対する Risk, Value, Cost, 評価指標 M の変化である。

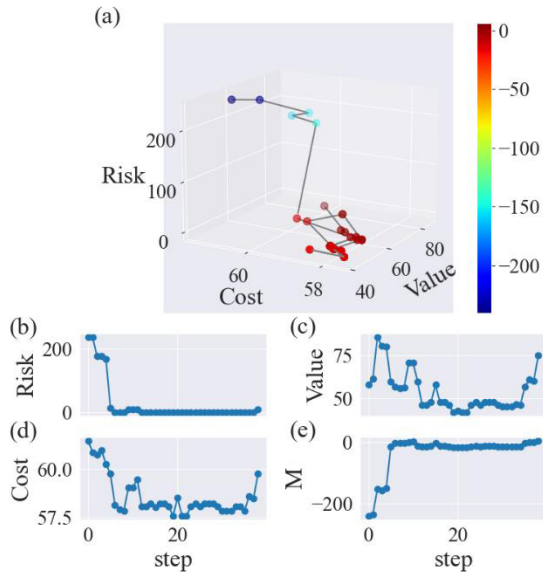


図 A-1 バランス型条件における最適解の探索過程

Fig. A-1 Search process for optimal solution under balanced conditions.

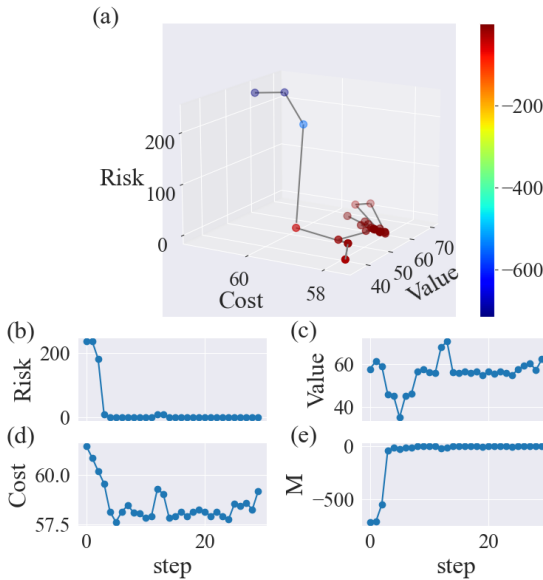


図 A-2 安全性重視条件における最適解の探索過程

Fig. A-2 Search process for optimal solution under safety-oriented conditions.

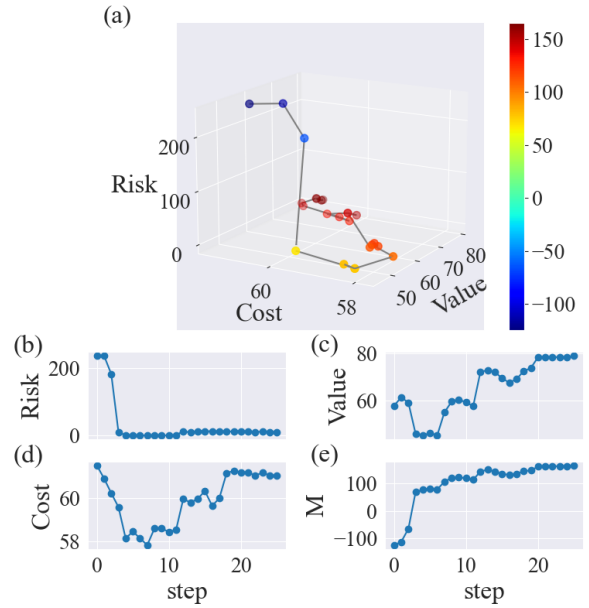


図 A-3 利便性重視条件における最適解の探索過程

Fig. A-3 Search process for optimal solution under value-oriented conditions.

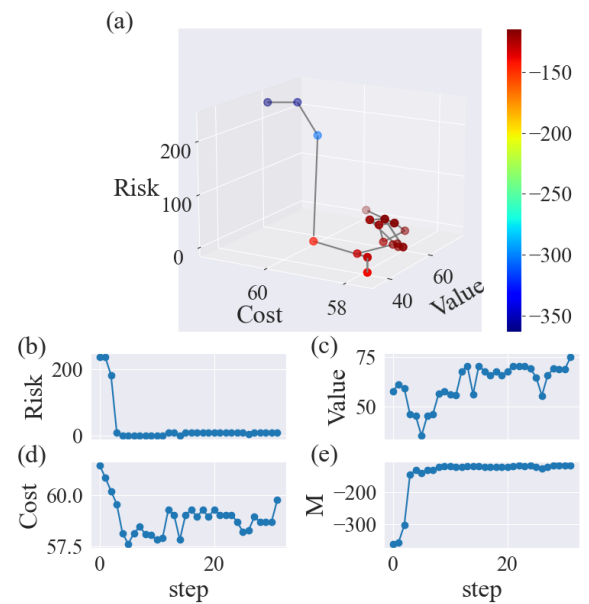
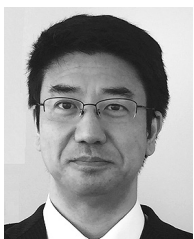


図 A-4 経済性重視条件における最適解の探索過程

Fig. A-4 Search process for optimal solution under cost-oriented conditions.



村本 衛一 (正会員)

1991年松下電器産業株式会社(現、パナソニック株式会社)入社。2001年北陸先端科学技術大学院大学修士課程修了(企業派遣)。通信分野の研究開発。テレビ会議システム開発を経て、現在、モビリティソリューション・サービスの開発に従事。電子情報通信学会、交通工学研究会各会員。

サービスの開発に従事。電子情報通信学会、交通工学研究会各会員。



河本 弘和

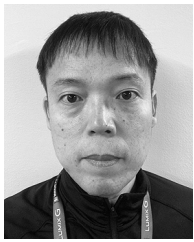
パナソニック株式会社テクノロジー本部デジタル・AI技術センター所属。2012年京都大学理学部物理学科修了。2017年東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻博士後期課程修了。2017年パナソニック株式会社入社。入社以来、数理最適化やマルチエージェントシミュレーション、データ解析技術を活用した新規事業における研究開発に従事。博士(理学)。

入社以来、数理最適化やマルチエージェントシミュレーション、データ解析技術を活用した新規事業における研究開発に従事。博士(理学)。



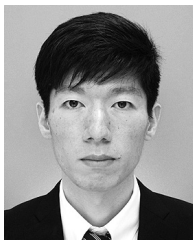
東島 勝義

1992年松下電器産業株式会社(現、パナソニック株式会社)入社。低消費電力MPEG-4コーデックLSI研究開発、デジタルテレビ、ブルーレイレコーダのシステムLSI開発に従事。車載向けAIセンシング技術研究開発を経て、最近、自動走行モビリティソリューションおよびサービス事業開発に従事。ロボットデリバリー協会理事。



古川 量也

1998年大阪大学基礎工学部卒業。同年よりパナソニック株式会社でAV用システムLSI開発に従事。2014年現職のAM社開発本部でADAS開発に携わり、仮想環境シミュレータを使った評価システム開発に従事。



澤井 薫

2014年金沢大学電子情報学類卒業。2016年同大学院自然科学研究科電子情報科学専攻修士課程修了。同年(株)パナソニックシステムネットワーク開発研究所入社。機械学習によるシステム最適化に関する開発に従事。



知念 賢一 (正会員)

1998年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年同研究科助手、2003年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手・助教・特任助教授。2021年より東京都立産業技術高等専門学校ものづくり工学科教授。WWWサーバやキャッシュ、ネットワークテストベッドの研究や運用に従事。各種の自動構築技術を開発しており、最近ではサイバーレンジに興味を持つ。博士(工学)、電子情報通信学会、日本ソフトウェア科学会各会員。



篠田 陽一

1988年東京工業大学大学院理工学研究博士後期課程修了。1988年同大学工学部助手。1991年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授。2001年同大学情報科学センター教授および同大学インターネット研究センタープロジェクトリーダー。2006年情報通信研究機構北陸リサーチセンタープロジェクトリーダー。2006年同機構情報通信セキュリティ研究センター長。情報環境、ネットワーク分散情報システム、ソフトウェア開発環境の研究に従事。工学博士。



三浦 基嗣

2013年慶應義塾大学電子工学科を卒業。同年よりマツダ株式会社にて、AWD制御技術の研究開発や商品戦略の企画業務に従事。2018年現職の株式会社PTVグループジャパンにて、国内自動車業界や電機メーカーへの交通シミュレータの販売から製品サポート、プロジェクト推進を一貫して担当。自動車技術会会員。