

デジタルによるモビリティサービスの設計

Digitalization for the Design of a Mobility Service

河本 弘和
Hirokazu Kawamoto

澤井 薫
Kaoru Sawai

村本 衛一
Eiichi Muramoto

東島 勝義
Masayoshi Tojima

要 旨

自動運転技術をモビリティサービスとして提供するうえでは、安全性だけでなく、経済合理性と利便性を考慮する必要がある。しかし、安全性・経済合理性・利便性は、互いに相反する関係になり得、顧客ひいてはステークホルダーによって重視する項目も異なってくる。そこで、バランスのとれた最適なサービス仕様の導出とステークホルダーとの合意形成を目的とし、モビリティサービスの設計をCPS (Cyber Physical System) の一環としてデジタル空間上で実現する手法を開発した。本手法では、データを可視化し、モビリティサービスをシミュレーションすることによって安全性・経済合理性・利便性を同時に評価することができ最適化を図ることができる。本稿では、自動運転構内ライドシェアサービスといった具体的な事例に対する適用内容についても紹介する。

Abstract

“Risk”, “Cost”, and “Value” need to be considered when providing Autonomous Driving technology as a mobility service. However, these are incompatible with each other, and items of importance vary among stakeholders and customers. Therefore, we developed a method to digitalize the design of a mobility service to form a consensus as a Cyber Physical System (CPS). In this method, “Risk”, “Cost”, and “Value” are simultaneously evaluated by simulating a mobility service with data visualization. In this paper, we introduce an example from our company premises.

1. はじめに

CASE (Connected, Autonomous, Shared & Service, Electric) やMaaS (Mobility as a Service) という言葉に集約されるようにヒト・モノ・コトの移動に大きな変化が起こりつつある。こういったモビリティの分野において、新たなサービス事業を創出すべく、筆者らは自動運転ライドシェアサービスや自動宅配ロボットサービスに取り組んでいる。

モビリティサービスでは、構成する要素は多岐にわたり、要素の組合せは膨大な数に及ぶ。さらに、構成要素の状態は依存し合いながら遷移するような複雑さを持っているため、単純に結果を予測することは困難となる。また、モビリティサービスでは複数のステークホルダーが関係するため、エビデンスベースで仕様を客観的に評価した結果を提示し合意形成することが望ましい。モビリティサービスの評価について、これまで経済合理性や利便性という観点からの報告はある [1]。しかし、自動運転で重要となる安全性を加えて同時に評価する手法については確立されていない。

そこで、サイバー空間を活用し安全性・経済合理性・利便性を同時に評価する手法を提案する。この評価を繰り返すことで最適な仕様の導出につながる。これにより、モビリティサービスの導入を短期化し、さらに確度が高まるため手戻りを抑えられ低コスト化を実現する手法の確立に取り組んでいる。

本稿では、2章でモビリティサービスの評価軸について安全性・経済合理性・利便性の観点から説明する。3章で、サイバー空間を活用したサービス設計手法について説明する。

4章で、自動運転ライドシェアサービスへ本手法を適用した事例について紹介する。最後に、5章でまとめとともに今後の展望について述べる。

2. モビリティサービスの評価軸

モビリティサービスでは、立場の異なる複数のステークホルダーが関わり、それぞれ重視する内容が違う。モビリティの運行管理者は、安全性に対し責任を負う。サービスの導入や改善の意思決定者は、経済合理性が最終判断の材料となる。そして、サービスの利用者は、使いやすさや体験価値の高さという点で利便性に主眼を置く。以下では、安全性・経済合理性・利便性それぞれについて、説明する。

2.1 安全性

安全性とは、モビリティの運行において歩行者といった交通参加者へ危害を与えないことである。事前のリスクアセスメント時にも、衝突危険性を最重要視する。加えて、モビリティ自体の機能安全性や故障率などの品質も安全性に関わる要素である。なお、自律移動型モビリティの安全性に関する国際的な規格としてUL4600 [2]、ISO21448 [3]やISO21434 [4]がある。

2.2 経済合理性

経済合理性とは、モビリティサービスの初期費用と運用費用を合計した費用に対し、十分な収益が見込めるのかという観点の評価軸である。遠隔からの監視や操作を必要と

する自律移動型モビリティでは、オペレータの人件費についても考慮する。

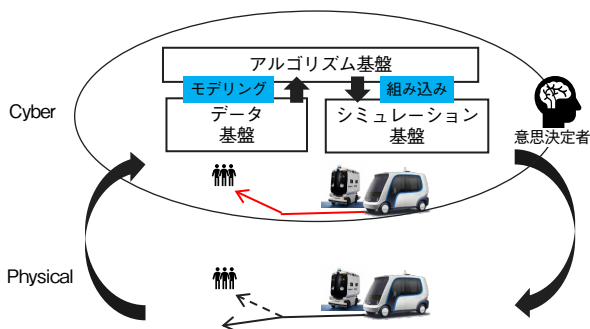
2.3 利便性

利便性とは、ヒトの輸送であれば、待ち時間なく乗れるかや、既存の交通手段に比べどれくらい移動時間が短縮されたかが鍵になる。また、モノの輸送であれば、受取時刻や再配達柔軟性が1つの要素で、事業者観点では輸送量に着目することになる。

3. サービス設計のデジタル化

3.1 サイバー空間の活用

サービス設計をデジタル化するため、サイバー空間の基本的な活用方法について説明する。第1図に示すように、フィジカル空間における人や車の流れといった交通環境をサイバー空間にデータをモデリングし組み込むことで再現する。その際、パラメータ探索や配車などにおいてアルゴリズムを利用することで、より効率的で実効性の高いサービス設計につながる。その後、モビリティの台数を変更するなど施策を仮想的に反映し、サイバー空間においてシミュレーションすることで効果検証を行う。この結果を意思決定者が判断することによりフィジカル空間に取り入れられる。この時の意思決定基準がサービスの評価軸となる。第1図では、例として、サイバー空間で導出した最適な経路をフィジカル空間に反映することを模式的に示している。これら一連の流れを実現するため、データ基盤・シミュレーション基盤・アルゴリズム基盤が必要となり、以下でそれぞれ説明する。



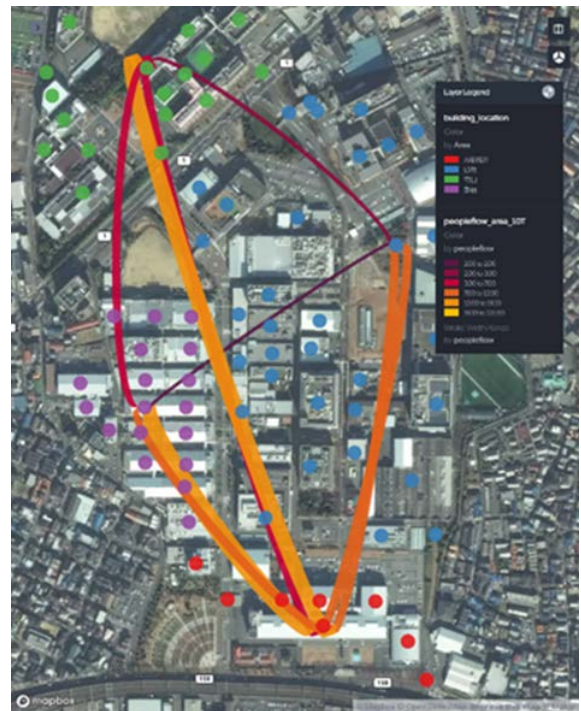
第1図 サイバーフィジカルシステムの模式図
Fig. 1 Schematic diagram of a cyber physical system

3.2 データ基盤

データ基盤では、サービス仮説を立案するのに必要なデータの収集・分析・可視化が機能要件となる。また、人や車の移動データだけでなく、サービスシステムのログデー

タや想定顧客に対するアンケートデータも対象となる。

一例として、本社地区における人流データの可視化結果を第2図に示す。可視化には、MapBox^(注1)、OpenStreetMap^(注2)、Maxar^(注3)を利用している。色の濃さや線の太さが人流量を表しており、どの建物からどの建物へいつ移動したか分かる。このデータからどこに停留所を設置しどういう運行ダイヤでどういうモビリティを運行すれば良いかというサービス仮説を立てることができる。



第2図 人流データの可視化例
Fig. 2 Example of the viewer for people flow

3.3 アルゴリズム基盤

アルゴリズム基盤では、安全性・経済合理性・利便性が均衡する仕様を導出するのに必要な一連のアルゴリズムが機能要件となる。さまざまな部分で利用可能なものが蓄積されていく。例えば、膨大なパラメータ空間から効率的に最適解を探索するアルゴリズムや、複数台のモビリティを効率的に配車するアルゴリズムなどがある。

3.4 シミュレーション基盤

シミュレーション基盤では、モビリティやヒトの移動挙動を再現することが機能要件となる。より詳細には、サー

(注1) Mapbox, Inc.の登録商標または商標。
(注2) OpenStreetMap Foundationの登録商標または商標。
(注3) Maxar Technologies Holdings Inc.の登録商標または商標。

ビス仮説として設定したシナリオを入力する機能、あらかじめ設定したモデルに応じ人や車の挙動をシミュレーションする機能、さらに、アニメーションやグラフとして出力する機能が必要となる。

4. 自動運転ライドシェアサービスの事例

4.1 自動運転ライドシェアサービス

大阪にある本社地区において、企業構内向けモビリティサービスの実証として自動運転技術を活用したライドシェアサービスを2019年10月から開始している。

乗車定員最大4名の小型電気自動車をベースに、センシング用のLiDAR (Light Detection and Ranging) やカメラ、検知・判断・制御を司(つかさど)るECU (Electronic Control Unit)、緊急自動ブレーキであるAEB (Autonomous Emergency Braking)、機能安全を担保するモジュールなどを導入し自動運転が実現されている。また、あらゆる事態に対し柔軟に対応するため、遠隔での監視・操作機能も備えている。本稿では、この小型電気自動車のことをサービス車両と呼ぶ。

第3図に示すような一周2.4 kmの周回路を最大時速20 kmの構内速度制限下で運行している。2019年12月時点では、乗降を行う4か所のステーションを設け、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。なお、2021年4月現在、コロナウイルス感染拡大の影響から限定的な条件下で消毒などの対策を行いながら運行を継続している。



第3図 自動運転ライドシェアサービスの案内資料

Fig. 3 Leaflet of the autonomous ridesharing service

4.2 ミクロ交通シミュレータ (PTV Vissim)

このようなライドシェアサービスのシミュレーションを行う際のシミュレータへの要件について説明する。人や車の流れについて時々刻々と変化するなか、サービス車両の乗車状況について、シミュレータの内部で状態を管理できる必要がある。つまり、時系列的に因果関係を表現できるのが1つの要件であり、例えば、満員であれば需要があっても乗車できないといった挙動の再現が必要となる。次に、安全性を評価するために、歩行者とサービス車両の挙動を地図上に再現し、距離的な近接状態を管理しリスク判定ができることである。以上のような要件を満たすシミュレータとして、交通工学の分野で用いられるミクロ交通シミュレータであるPTV Vissim[5]を採用した。

なお、ミクロシミュレータでは、モビリティやヒト個々の挙動レベルまで微細に再現するものであるのに対し、マクロシミュレータでは、モビリティやヒトの群を流体として粗視化し表現する。

4.3 評価指標

安全性・経済合理性・利便性を同時に評価する指標Mを導入する。

$$M = \alpha \text{Risk} + \beta \text{Cost} + \gamma \text{Value} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{Risk} = \sum_{i,j} P_j(i) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{Cost} = \sum_i C(i) + C_{\text{ope}} + C_{\text{env}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{Value} = \sum_k \{ (T_{\text{org}}(k) - T_{\text{shorter}}(k)) + \omega V(k) \} \quad (4)$$

ここで、 α 、 β 、 γ は、安全性・経済合理性・利便性に対し線形和をとる際の重みで、 α 、 β は負の実数、 γ は正の実数をとることとする。 α 、 β 、 γ の値は、オーダーを揃(そろ)えるためそれぞれの指標の値の平均値の逆数をベースとして正規化したうえでの比率を採用した。簡素に線形和としてモデリングすることによって、この α 、 β 、 γ にステークホルダーが考える意思決定基準が反映されることになる。なお、現実へ適用する場合は、意思決定者の考えを取り入れながら正規化の方法含め設定する必要がある。

Riskは安全性の指標であり、本シミュレーションではヒヤリハット事象を想定し、歩行者とサービス車両との近接した総数として設定した。 $P_j(i)$ はある一定距離の範囲内に入った回数を表している。なお、歩行者の移動に関するシミュレータ内部の処理としては、3.2節で紹介した人流データを利用し出発地点から到着地点まで最短経路で歩行するように歩行者の移動挙動を再現した。

Costは経済合理性の指標で、自動運転ライドシェアサービスでは従業員向けということもあり料金を徴収していな

いため、収益を除き費用のみ考える。C(j)はサービス車両の減価償却費、C_{ope}は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・標識などの設置費用、日割、単位：円）である。

Valueは利便性の指標であり、T_{org}(k)-T_{shorter}(k)はヒトkがサービス車両に乗ることで短縮できた時間（秒）である。V(k)は移動中に業務を行うなどで有効活用できた時間に従業員の工数単価を加味して金額換算した値（円）で、ωは補正の定数である。ただ、利便性を時間に揃えるか金額に揃えるか、あるいは、別の表現を行うかは意思決定者の意向など現実に即すのが望ましい。本稿では構内での実証実験ということもあり上記にて設定した。なお、歩行者のサービス車両への乗車ロジックは、実際の歩行時間とサービス車両に乗車した場合の移動時間を比較し希望短縮時間より小さくなれば乗車させるよう実装した。

以上により、RiskとCostを小さくしValueを大きくするために、α、βを負の実数、γを正の実数の範囲で定義することで指標Mを最大化する問題に帰着される。なお、大規模な人流データを読み込みモビリティ含め移動挙動を詳細に再現することでCostやValueだけでなくRiskも同時に評価でき、本手法の特長となっている。

4.4 HPCによる並列計算

ミクロ交通シミュレータは、事象を詳細に再現するためマクロ交通シミュレータと比べ計算処理負荷が大きい。そこで、最適解の探索高速化のため複数シミュレーションの並列実行を可能にするため、HPC（High Performance Computer）を利用することにした。HPCとして、PTV VissimがベースとしているWindows^(注4)系のOSを前提とした展開や並行実行の実績[6]があるStarBED[7]を採用した。並行実行の自動化環境として、HTCondor[8]をStarBEDに導入した。

4.5 評価範囲

探索空間にあたる評価範囲を、第1表のように定めた。なお、希望短縮時間とは、人流データからサービス車両への乗車の判定をする際に希望する短縮時間のことである。また、運行ルートについても中央保安のステーション有無でバリエーションを持たせた。多少移動時間が延びても乗車するようなケースを考慮し、-120秒、-60秒、0秒、+60秒、+120秒の範囲とした。これらのパラメータの組合せの数だけでも、1600通りある。

(注4) Microsoft Corp.の米国およびその他の国における商標または登録商標。

第1表 評価範囲の一覧

Table 1 Evaluation range for each item

分類	サービス構成要素	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	最大時速 [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)
	乗降ステーション位置	中央保安でのステーション有無

4.6 最適解の探索

StarBEDの30ノードを用い1600通りのサービスシナリオについてシミュレーションを並列実行した。1ノードあたりのスペックを第2表に示す。なお、重み(α, β, γ)によっても導出される最適解が異なるため、実状に合わせて変えながら評価と考察を行うことになる。計算実験では、(α, β, γ) = (-2, -1, 4), (-1, -1, 4)の2つセットについて評価を行ったが、本稿では2つのなかで相対的に安全性を重視した重みである(α, β, γ) = (-2, -1, 4)とした場合の結果について紹介する。

1600通りのシミュレーションをシークエンシャルに実行すると9287時間必要となるが、1ノードあたり4プロセス30ノードの並列実行することで要した時間は81.12時間に短縮された。

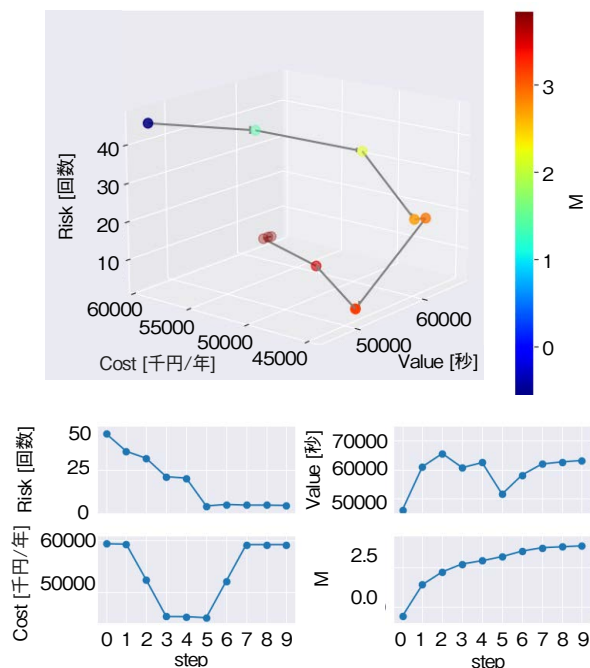
第2表 StarBED 1ノードの仕様

Table 2 Specification for the computation (StarBED)

CPU	Intel Xeon ^(注5) E5-2683 v4 (2.1 GHz/16Core)×2
Memory	32GB RDIMM (DDR4-2400/Multi-bit ECC)×12
Storage	HDD 1.2TB×1, SSD1.6TB×1
NIC	10GigE×2, 1GigE×1

次に、評価指標Mを最大化する最適なサービス仕様を、3ノードに絞り探索することにした。今回は探索方法として山登り法を用い第4図で示すような探索過程を経た。その結果、10回の試行（58.04時間）で最適解を見つけ出すことに成功した。ここで、最適解であることを保証するため第1表の評価範囲の組合せ1600通りすべてのサービス仕様に対して指標Mを計算し最大であることを確認した。なお、最適解の内容としては、希望短縮時間0秒、最高速度10 km/h、乗車定員4人、投入台数（メトロ型-オンデマンド型）は5(3-2)で、中央保安にステーションがあった。このような形で最適なサービス仕様が導出される。以上により、3ノードを利用することで数日あれば千を超えるような膨大

(注5) Intel Corp.の米国およびその他の国における商標または登録商標。



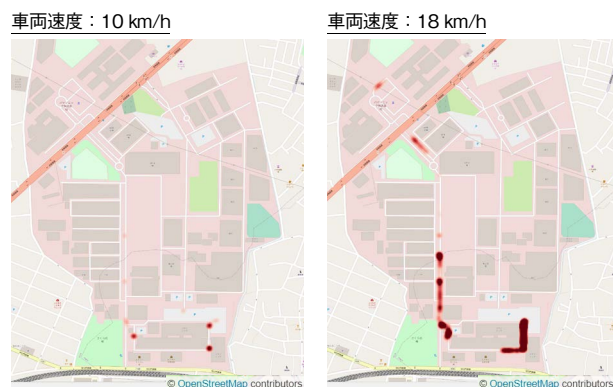
第4図 最適解の探索過程

Fig. 4 Search process for the optimal solution

なサービスシナリオを評価できることが示せた。

4.7 リスクの可視化

最後に、本手法によって安全性の評価ができていていることを示す。サイバー空間にて車両や歩行者の移動の挙動を再現しているため、本稿にて定義したRiskであるサービス車両と歩行者が近接した位置を緯度経度情報として内部的に管理できている。そこで、第5図で示すように歩行者との近接した際のサービス車両の位置情報を集計し地図上にヒートマップの形で可視化した。可視化には、OpenStreetMapを利用している。なお、サービス車両の速度を変更し、他



第5図 シミュレーション結果から作成したリスクマップ

Fig. 5 Risk map made of simulation results

は典型的なパラメータセットを利用している。その結果、サービス車両の速度が大きいと、リスクの発生箇所とその数自体も多くなっていることがわかる。また、門と建屋間や横断歩道など人流量が多くサービス車両との接触リスクが多いと考えられる場所がリスク発生箇所となっており定性的には妥当な結果となっている。ただ、今後は定量的な観点から検証は必要である。

5. まとめ

本稿では、モビリティサービスで重要となる安全性・経済合理性・利便性という評価軸を導入し、これら3つをサイバー空間で同時に評価することで最適なサービス仕様を導出する手法について導入した。さらに、自動運転ライドシェアサービスへの適用事例として、人流データを活用しミクロ交通シミュレータをHPC上で30ノード並列実行し計算時間が約1/100になることを確認した。また、山登り法を用いた探索により、ノード数を3に減らしたものの、さらに30%ほど計算時間を短縮でき、網羅的な評価より効率的に最適解を導出できることを示した。以上の結果からビジネスでのユースケースを考えた場合、シミュレーションするシナリオを設定できれば数日の営業日で計算でき導入案および改善案を1週間ほどで提示できることになる。さらに、シミュレーションによって算出したリスクマップを活用することで、どこでどれぐらいのリスクが発生するかあらかじめ把握したうえで運行形態を決定できる。

本評価手法により、自動運転を含めたモビリティサービスの導入や改善を検討している人々に対し、インタラクティブにサービス案を提示することが可能になる。このようなことから一種のコミュニケーションツールとしての役割も果たし、エビデンスベースで意思決定を支援することにつながる。具体例として、会津若松市におけるスーパーシティの取り組みでは、市・商店街振興組合・商店主・連携企業・地元企業・住民といった複数のステークホルダーがいるなか、本手法を活用しながら仕様を客観的に提示しながら合意形成を進めている。また、このようなサービス設計手法のデジタル化により、要望を主張する側と要望を受け開発する側のコミュニケーションも円滑化すると考えられる。本稿では適用事例として人の搬送をテーマに紹介したが、コロナ禍による巣ごもりや非接触ニーズの高まりを受け無人受取を実現する自動宅配ロボットサービスを題材としたサービス設計についても取り組みを進めている。宅配というサービスに形態が変わったとしても、安全性・経済合理性・利便性の同時評価という基本的な考え方は変わらないため、本手法の基盤は使いまわすことができ展開性のあるソフトウェアとして構成されている。そのなかで、

利便性について、ヒトの搬送特有である移動時間の短縮や待ち時間の短縮から、モノの搬送特有の評価項目となる配達完了率や再配達率などの部分について追加対応するだけで本手法は適用可能である。

(株) PTV グループジャパンの三浦基嗣氏にはシミュレーションソフトウェアの活用にご助言をいただいた。北陸先端科学技術大学院大学の篠田陽一氏と知念賢一氏とは本稿の内容が深める議論をさせていただいた。(国研) 情報通信研究機構の安田真悟氏には、OSの複製方法など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、各位に感謝いたします。

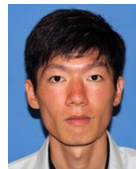
参考文献

- [1] 山本真之 他, “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, Nov. 2019.
- [2] “UL4600,” Edge Case Research, <https://edge-case-research.com/ul4600/>,参照 Oct. 20, 2021.
- [3] “ISO/PAS 21448:2019,” <https://www.iso.org/standard/70939.html>, 参照 Oct. 20, 2021.
- [4] “ISO/SAE 21434 Road vehicles - Cybersecurity engineering,” <https://www.iso.org/standard/70918.html>, 参照 Oct. 20, 2021.
- [5] “Traffic Simulation Software,” PTV Group, <https://www.ptvgroup.com/en/solutions/products/ptv-vissim/>, 参照 Oct. 20, 2021
- [6] 太田悟史 他, “次世代サイバー演習環境に向けて,” マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム2016 論文集, pp. 1776-1782, July 2016.
- [7] “StarBED4プロジェクト,” (国研) 情報通信研究機構 総合テストベッド研究開発推進センター, <http://starbed.nict.go.jp/>,参照 Oct. 20, 2021.
- [8] “HTCondor home page,” HTCondor Team, <https://research.cs.wisc.edu/htcondor/>, 参照 Oct. 20, 2021.

執筆者紹介



河本 弘和 Hirokazu Kawamoto
テクノロジー本部 デジタル・AI技術センター
Digital & AI Technology Center, Technology Div.
博士 (理学)



澤井 薫 Kaoru Sawai
(株) 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.



村本 衛一 Eiichi Muramoto
テクノロジー本部 デジタル・AI技術センター
Digital & AI Technology Center, Technology Div.



東島 勝義 Masayoshi Tojima
テクノロジー本部 デジタル・AI技術センター
Digital & AI Technology Center, Technology Div.