

# サイバーフィジカルシステムにおけるモビリティ最適化エンジンの開発

九州大学 マス・フォア・インダストリ研究所

教授 藤澤 克樹



## 1. サイバーフィジカルシステム (CPS) とモビリティ最適化

近年、最新技術の組合せや融合によって、安心、安全、便利ないわゆる超スマート社会 (Society 5.0など) を実現するためのさまざまな取り組みが世界中で推進されている。近年の ICT (Information and Communication Technology) の向上により、実社会で起きている現象を、計算機上で事前にモデル化し、さらに環境変化に対するシミュレーションや最適化を実施することで、ビジネスモデルとしてのサイバーフィジカルシステム (第1図) を実現することができるようになった[1][2]。

CPSにおいては、実社会のデータ (ヒト・モノ・カネ・情報などのモビリティ) から、サイバー空間での最適化

やシミュレーションを行うことによって、新しい産業の創出、コストや廃棄物排出の削減、最適スケジュールの算出に寄与することなどが、多くの産業界 (社会インフラ、製造業、小売り系など) から大きな期待を集めている。実世界におけるモビリティはUber<sup>(注1)</sup>などが先行し、巨大プラットフォームGAFA<sup>(注2)</sup>ですら十分に取込みしていない領域とされている[3][4]。

現在、九州大学や (国研) 産業技術総合研究所はパナソニック (株) などと共同で、CPSを対象として大量の

(注1) Uber Technologies, Inc.の登録商標。

(注2) Google LLC, Apple Inc., Facebook, Inc., Amazon.com, Inc. 4社の頭文字による。



HPC : High Performance computing    EMS : Energy Management System  
FCV/EV : Fuel Cell Vehicle / Electric    ETC : Electronic Toll Collection

第1図 サイバーフィジカルシステムの構成要素

センサデータ（ヒト・モノの移動など）やオープンデータ（Wi-Fi<sup>(注3)</sup>などの移動履歴）などを用いて、サイバー空間での最適化やシミュレーションを行うCPSモビリティ最適化エンジン（CPS-MOE）の開発を行っており、新しい産業の創出、コストや廃棄物の削減、交通機関の最適制御スケジュールの算出に寄与するサービスの集合体を構築して、利用者が“作業”、“生活”、“娯楽”、“安全”を行うための、最適な時間・空間を提供することを目的としている。

さらに、CPS-MOEの実現のために特に以下の3つのモビリティを表現、予測、最適化および制御するための数理・情報の新技術の提案・開発を推進している（第2図）。



第2図 CPSモビリティ最適化エンジンの機能

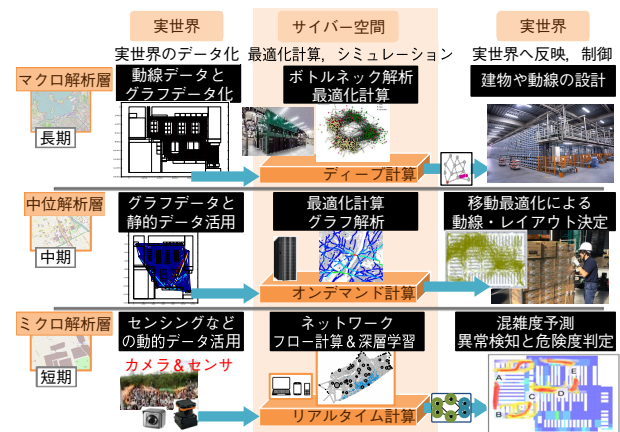
- 情報（ヒトの興味、意思）のモビリティ：Webアクセス移動データおよびユーザーの潜在的興味度を用いたユーザークラスタリング
- ヒト・モノのモビリティ：位置情報検出と追跡（深層学習）、混雑検知や流れの最適化および可視化
- 交通（最適自動運転）のモビリティ：地域内自動運転（路車協調）+最適運転（パワーユニット&パワートレインシミュレータによる燃料消費量最小化）

## 2. CPS-MOEが備えるべき機能と応用例

IoT（Internet of Things）が急速に発展し、CPSの実現によって社会システムのあらゆるものがデジタル化され、サイ

(注3) Wi-Fi Allianceの登録商標。

バー空間のなかで現実空間の予測、制御、最適化を行うことが可能な時代に突入している。しかしながら、CPSの開発プロジェクトにおいては、具体的な産業応用を検討しなければ、その効果を検証することは難しい[5]。現在推進中の研究課題では配送業や小売り系、製造業などを対象として、ヒト・モノの移動に関する最新の数理モデルによる現象の表現・再現・予測を目指し、現在の機械学習などが苦手とする見えないデータ・過去のデータにない現象への対応を進めている。昨今話題になっているようにインターネット商圏の拡大が、配送物流業界の荷物取扱量を激増させており、交通渋滞や遅配、不達さらに労働環境の悪化などの深刻な問題を引き起こしている。一方で特に日本の製造業ではヒト・モノの動きに関するムダ・ムリ・ムラなどの検知と改善技術が飛躍的に進んでおり、以下のようなモビリティ最適化技術のサプライ・チェーン全体への適用が望まれている（第3図）。



第3図 CPSモビリティ最適化エンジンの機能

- 建物や動線の設計（全体の移動最適化を考慮）
- ムダ・ムリ・ムラの特特定（動線分析などによる作業改善提案）
- カメラセンシングと動線分析によるヒト・モノのフローの最適化
- 混雑度予測（異常検知と危険度判定）：深層学習や機械学習の適用

また“仮想店舗”、“仮想工場”、“仮想倉庫”などの再現と解析を想定した場合には、CPS-MOEには以下の機能が組み込まれる予定である。

- システム構成：ヒト・モノのモビリティの現象を予測、再現、制御、シミュレーションあるいは最適化などを可能とするサービスの集合体
- データ変動への対応：データを変動度合いにより3つに分類する（交通計画などの長期視点で扱われる静的データ、リアルタイムに変化する動的データ、イベント

単位で変動する中間データ)

- ヒト・モノ・情報の移動のなかで各地点の魅力度や重要度を推定：ユーザーIDに紐（ひも）付いた移動履歴のデータを対象とする(遠隔データアクセスやビーコンなどの移動データ)ある地点に達したフロー（ヒト・モノの流れ）を通過分（そこへ来たのが本来の目的ではない）と到達分（本来の目的）に分離可能
- モビリティ最適化機能：ヒト・モノ・情報の移動データから変化の兆候、渋滞や輻輳（ふくそう）の原因の探知と移動最適化

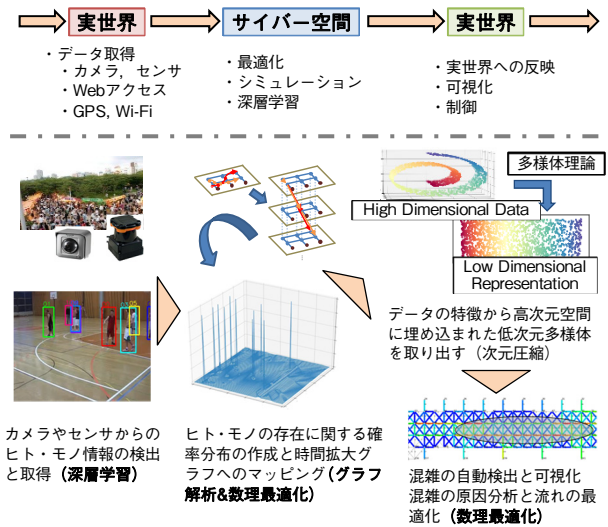
### 3. 今後開発&注目すべき技術

CPS関連の技術は新規ビジネスアプリケーションの開拓を通じてSDGs（持続可能な開発目標）の特に目標9（産業・技術革新・社会基盤）および目標11（持続可能なまちづくり）の推進に大きく寄与することが期待できる。また全ての人に自由で安全な空間の移動を確保する社会を構築することを可能にする。また経済的には次のような新サービスを提供する産業の創出が期待できるため、参画する民間企業と技術を移転する形で推進を加速していく。

- 経路探索サービスに交通手段予約サービスを組み合わせ、効率的な移動手段を提示
- 利用者の過去の運転履歴・寄り道履歴や検索履歴などから最適なメディア、コンテンツなどの情報を選定して提供

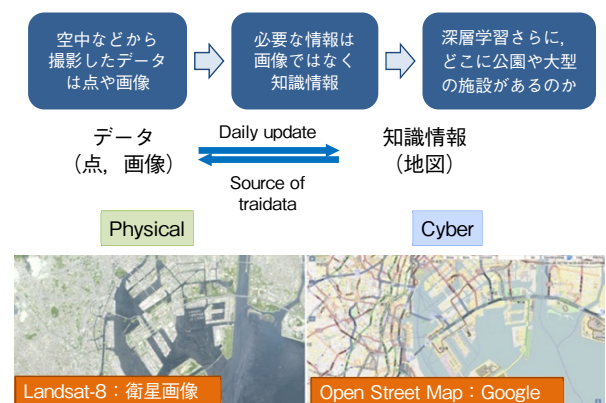
今回、開発を行うCPS-MOEの新基軸とその結果として創出される新しい科学技術の分野は以下を想定しており、基礎研究から先端分野開拓まで以下のような新しい科学技術分野の創出を目指す。

- 大規模高次元データからの有用情報抽出と可視化：実世界から得られるビッグデータは単にデータ量が多いだけでなく、多様な大規模高次元データになることが多い。そのため高次元のデータ内の低次元の構造を抽出する次元圧縮（多様体学習）およびクラスタリング技術（数理最適化手法）の獲得を目指す。具体的には高次元のデータは低次元の多様体からの写像の集合と考え、高次元データの特徴から低次元多様体を推測し、高次元空間に埋め込まれた低次元多様体を取り出すことを目的とする。さらにCPS上でのヒト・モノ・情報の移動データから変化の兆候、渋滞や輻輳の原因の探知と移動最適化：モビリティ（移動）に関する数理モデル開発（ヒト・モノの存在に関する確率分布の作成と時間拡大グラフへのマッピング）も同時に行い、以下の動線解析・最適化システムの構築（第4図）を推進する[6][7]。



第4図 CPS上での動線解析・最適化システム

- 画像、信号およびセンサ情報（画像、点情報）からの知識情報の構築方法の確立（第5図）：4次元（位置+時間）地理情報空間システム（4D-GIS）の構築とVR（Virtual Reality）+AR（Augmented Reality）技術による可視化。3次元モデルの自動構成では、カメラやLiDAR（Light Detection and Ranging）などで取得された多種多様かつ大量の3次元データから、深層学習などを活用することで、収集された画像や点群データに意味付け人間・ロボット・自動運転者といった自律エージェントの効率的な行動計画策定に必須の知識情報の構築を目指す。



第5図 点・画像データから知識情報の構築

- 大規模データクラウド接続と超分散並列処理（ブロックチェーン）による2025年頃に実現可能な新サービスを探求（第6図）：2025年には5G高速通信（20 Gbit/s〜）&クラウド経由で 20~30テラフロップス（TFlops）の計算能力を常時携帯可能と想定されている[8]。これら

の通信・計算能力の増大から、より精密、リアルタイムかつ全体最適に近い CPSアプリケーションの提案が可能になることが期待できる。すでにサイバー空間上では人間ではなく巨大な計算能力を用いたアルゴリズムが人間の評価を自動的に決定しており[9]、今後は行政や交通などの社会システムのデジタル化が急激に進むことが予想されている[3][10]。

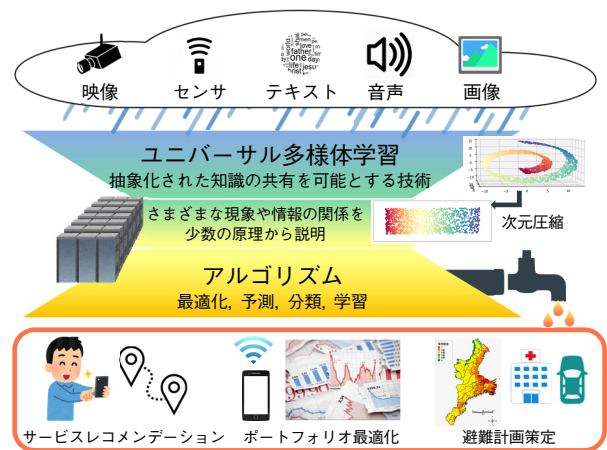


第6図 スパコン上での2025年シミュレータ

#### 4. より汎用性を目指して：ユニバーサル多様体学習

CPS-MOEを支えるコア技術の1つとして、集積されてくる雑多な入力から意味のある情報を抽出する仕組みが必要である。種類も精度も異なる大量の情報を処理することは困難であるが、今後は多様体学習を通じてこの課題を目指していく。多様体学習とは、機械学習の一手法であり、情報の圧縮・低次元の表現を幾何学を用いて獲得する手法である。知識とは、さまざまな現象や情報の関係を少数の原理から説明することであり、多様体学習により圧縮された情報はまさに知識そのものと言える。獲得された低次元表現は、常に更新を続ける超マルチタスク学習済みモデルとして利用者に提供される。多様体学習は古くから研究されている分野であるが、本研究で扱われるような多様な入力は想定されておらず、全く新しい手法を開発する必要がある。

深層学習をはじめとする機械学習手法の発達により、目的に応じた特徴量をテイラーメイドで構築する必要性は軽減された。しかし、このようなデータ駆動型の手法を実施するためには、目的に応じて大量のデータを収集・整理し、学習を行う必要がある。本研究が目指すユニバーサル多様体学習 (第7図) は、さまざまな情報を抽象化し、いわば中間コードの形で共有資源化する。アプリケーション開発者は、データ収集のことを考える必要がなく、この中間コ



第7図 ユニバーサル多様体学習の概念図

ードから目的に応じた出力を得る部分のみ設計すればよい。かつて活版印刷やインターネットが情報の解放と循環を促進したように、ユニバーサル多様体学習は、抽象化された知識の共有を可能とする基盤技術を目指す。具体的には、以下の項目が課題となる。

- 数値・テキスト・画像・音声・時系列データなどヘテロな形式を入力とする多様体学習法
- 大規模かつ高次元で精度や確度の異なる入力を扱い、それらをアプリケーション別にユーザーが理解できる形で出力する
- 常時流入する新しいデータに合わせ、オンラインでアップデートされる学習法
- 個人情報や企業秘密が漏洩 (ろうえい) することなく、知識のみが共有・提供される仕組み、抽象化され共有された知識データから、個別の生データの情報がどれくらい復元されるかの評価法の確立
- 学習された知識から、目的・クエリに合わせて高速に出力を得る計算法
- 生データを収集しシステムへ提供するインセンティブを与えるエコシステムの設計
- 局所的 (時間・空間) ナビゲーションと人間の直感による選択のフィードバックを考慮したシステム設計 (レコメンデーションなど)

これらを解決し、開発者が生のデータを意識することなく、抽象化された知識を用いて直接サービスを構築できるフレームワーク作りを行う。

#### 5. 今後の産学連携の展開

本稿で解説した項目の産学連携による共同開発においては基礎的な研究開発と同様に産学連携のためプラットフォーム構築が重要である。具体的には産学連携のためオープ

んなAIプラットフォーム上でシームレスかつ同時並行的な以下の研究開発を遂行できる環境を目指す。

- 大学や国立研究所などの研究機関は提案するアルゴリズムとソフトウェアを持ち込む。
- 参画する民間企業は可能な範囲でデータを持ち込む（セキュリティ上安全なデータ転送手段は産学連携で開発する）。
- オープンなAIプラットフォーム上でデータなどを共有し、産学連携で性能評価を行う（KPI（Key Performance Indicator）やPoC（Proof of Concept）検証を含む）。
- 企業側はこれらの成果を元に自社運用あるいは汎用クラウドサービス上でビジネスアプリケーションの開発を行う。さらにこれらの結果をフィードバックする。

### 参考文献

- [1] Katsuki Fujisawa et al., “Advanced Computing & Optimization Infrastructure for Extremely Large- Scale Graphs on Post Peta-Scale Supercomputers,” Proceedings of the Advanced Software Technologies for Post-Peta Scale Computing, The Japanese Post-Peta CREST Research Project, Springer, pp. 207-226, 2019.
- [2] Katsuki Fujisawa, “Cyber-physical System and Industrial Applications of Large-Scale Graph Analysis and Optimization Problem,” The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis 2017 (SC17), Invited Talk, 2017, <https://sc17.supercomputing.org/2017/09/08/invited-talk-spotlight-cyber-physical-system-and-industrial-applications-of-large-scale-graph-analysis-and-optimization-problem/>, 参照 Apr. 19, 2019.
- [3] 日高 洋祐 他, MaaS モビリティ革命の先にある全産業のゲームチェンジ, 日経BP社, 2018.
- [4] スコット・ギャロウェイ, the four GAFA 四騎士が創り変えた世界, 東洋経済新報社, 2018.
- [5] (一社) リテールAI研究会, リアル店舗の逆襲~対アマゾンのAI戦略~, 日経BP社, 2018.
- [6] Nozomi Hata et al., “Mobility Optimization on Cyber Physical System via Multiple Object Tracking and Mathematical Programming,” the Fifth International Workshop on High Performance Big Graph Data Management, Analysis, and Mining (BigGraphs 2018), Seattle, WA, USA, Dec. 2018.
- [7] Koji Ueno et al., “Efficient Breadth-First Search on Massively Parallel and Distributed Memory Machines,” Data Science and Engineering, Springer, Mar. 2017, vol. 2, issue 1, pp 22-35.
- [8] ブレット・キング, 拡張の世紀, 東洋経済新報社, 2018.
- [9] ジョン・チェニー=リップOLD, WE ARE DATA アルゴリズムが「私」を決める, 日経BP社, 2018.
- [10] 小島 健志, ブロックチェーン, AIで先を行くエストニアで見つけた つまらなくない未来, ダイアモンド社, 2018.

### 《プロフィール》

藤澤 克樹 (ふじさわ かつき)

1993	早稲田大学理工学部卒業
1995	早稲田大学大学院理工学研究科 修士課程修了
1998	東京工業大学大学院情報理工学研究科 博士課程修了 博士 (理学)
1998-2002	京都大学大学院工学研究科建築学専攻 助手
2002-2007	東京電機大学理工学部数理科学科 助教授
2007-2011	中央大学理工学部経営システム工学科 准教授
2012-2014	中央大学理工学部経営システム工学科 教授
2014-現在	九州大学 マス・フォア・インダストリ研究所 教授
2019-現在	(国研) 産業技術総合研究所 人工知能研究センター クロスアポイントメントフェロー

専門技術分野：

数理最適化, 高性能計算, グラフ解析

主な著書：

応用に役立つ50の最適化問題 (朝倉書店, 2009)

Excelで学ぶOR (オーム社, 2011)

主な編書：

Optimization in the Real World (Springer, 2015)