

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：32612
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：20H02155
研究課題名（和文）ダイナミックサイバーフィジカルシステムを利用したエージェント協調制御技術の研究

研究課題名（英文）Research on cooperated agents control technology using dynamic cyber-physical system

研究代表者
山中 直明（Yamanaka, Naoaki）
慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：80383983
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：サイバーフィジカルを利用し、リアルタイムで高度な協調制御を行う、時空間同期デジタルツインの実現に成功した。5Gによりリアルタイム性が向上し、フィジカル空間での位置と時間の情報を高速でネットワークから収集できる。その結果、両空間の同期（時空間）が可能となり、サイバー上で分散協調制御を行った。空間的なセンサーやマシンの情報をネットワークで収集し、サイバー上で協調動作する。その時に未来（約30秒）を予想するが、自動運転のようなプログラムされているものと自転車のように、確率として計算できるものが存在する。また、遠隔コントロールができないものもあり、それらを考慮して、制御アルゴリズムを決定する。

研究成果の学術的意義や社会的意義
自動運転に代表されるスマート社会における制御技術実現に重要な一歩となった。物理レイヤとしては、超低遅延技術を追求し、リアルタイムでIoTやセンサーの情報の収集が可能なシステムを実施した。また、サイバー空間にリアル空間のエージェントを備え、エージェント間の協調動作を行った。未来予想デジタルツインを世界に先駆けて提案し、最適な未来を計算することにより、高度なコントロールを実現している。さらにPoCシステムとして、実際の自動運転車でデモする等、実用的にも社会インパクトを狙うことができた。このことにより、より効率が高く、安全なサイバーフィジカル制御が行えることを実証した。

研究成果の概要（英文）：Digital twin that uses cyber-physical and performs advanced cooperative control in real time. 5G improves real-time performance and enables high-speed collection of position and time information in physical space from the network. As a result, synchronization of both layer (space-time) became possible, and distributed cooperative control was performed on the cyber.

Spatial sensor and machine information is collected from the network and cooperatively operated on the cyber. At that time, the future (about 30 seconds) is predicted. There are some things that are programmed, such as automatic driving, and others that can be calculated as probabilities, such as bicycles. There are also those that cannot be remotely controlled, and the control algorithm is determined taking these into account.

研究分野：フォトリックネットワーク

キーワード：M2M P2P マッチング エージェントシステム 自動運転 ソサイエティ5.0

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

- (1) デジタルツインは、工場内のモニター、制御技術として考えられており、効率の良い運用技術として、利用を目指されていた
- (2) メタバースは、画像やコンピュータビジョンの技術として、リアルなアバターやサイバー空間に、自分のアバターを置く、VR (ヴァーチャルリアリティ) が盛んに研究されていた

2. 研究の目的

研究の大きな目的は3点ある。

- (1) まず、サイバー空間にフィジカル (リアル) 空間の情報を正確、かつ低遅延で上げる (収集する) 技術を確立する
- (2) 収集した情報をベースにサイバー空間にデジタルツインを構成する。そのツインにフィジカルのエージェントを同期させておく
- (3) エージェント間の協調、さらにはエージェントの未来の動きを予想して、より高度な協調制御を目指す。これを未来予想型デジタルツインといい、30秒 (0~30秒) 先の未来を仮想空間で決めることを目的とし、その実証を本研究で行う

3. 研究の方法

- (1) 各種IoTをフィジカル空間でセンシングする (自己センシングを含む) それらのデータをツイン上で可能な限りリアルタイムで集積する
- (2) 時間 (リアルタイム) と空間を正確に収集したサイバー空間を、時空間同期デジタルツインと呼ぶ。これは、例えば自動運転のように空間的に移動が伴うものもあり、一方で遠隔監視のように、広帯域なサービスも存在している
- (3) 時空間同期デジタルツインでは、自律的にクラスターを形成し、情報の送受が必要である。その際には、1つのエージェント (IoT) が複数のクラスターに所属することがある。エージェントはセンサー/アクチュエータであるために、矛盾制御が生じるので、アイソレーション型の制御を確立した
- (4) スタティックなクラスター構成技術と並行して、P2Pを利用したダイナミッククラスター化技術を研究した。これは、IPv6アドレスを利用し、前半の64ビットで位置を表している。例えば、ADVの場合道路/始点からの距離/車線で構成させ (応用としてはスピードベクトルを入れる)、交差的に対して、これらのアドレスに対して、クエリーをフラッティングして通信を行う
- (5) これらの時空間同期デジタルツインを用いて、X秒後 (例えば30秒) の未来を予想し、繰り返しシミュレーションにより、最適な未来を構成し、それを実現するためにリアルワールドをバックワード制御する技術を開発した。これらの技術は、多くの国際会議等で発表し、PoC (プロトタイプ) を作り、国際会議、国内エキシビション等でデモをした。また、制御技術の一部はグリーン電力制御として評価を受け、現在、企業へのライセンスとスタートアップの準備を行っている

4. 研究成果

- (1) 図1に、本研究によって検討した時空間同期型デジタルツインネットワーク構成を示す (Ref1)。5Gネットワークを始めとする、URLLC技術は、低遅延のアクセスネットワークを実現する。フィジカル (リアル) の状況 (位置) をリアルタイムでツイン上に上げ、また、点ではなく、隣接するマシンとも同期させている。基地局には、エッジコンピュータがあり、エッジコンピュータ間は、低遅延ファイバー (Ref2) で接続する分散コンピューティングの技術である。エリアスペースコンピューティングにより、このメトロアクセス空間のリソースを協調させて、利用する (リソースプール)。図1の右にあるので、時空間同期と未来予想、さらに最適化未来のデジタルツインである
- (2) 上記、未来予想型時空間同期デジタルツインの成果の一例を示す。自動運転 (スケジューリングされたエージェント) と自転車 (予想・確立を用いるエージェント) の交差点のコントロールであり、図2のように各デバイスの行動予想と衝突確立により、計算を行う。具体的には、新川崎タウンキャンパスを用いて、実実験まで成功させた。図3は、その実験システムの構成である
- (3) 本デジタルツインの応用として、グリーン電力制御を行った。図4に基本的構成を示す。スマートグリッドでの発電 (グリーン電力) がある際に、その位置 (Location) と時間

をブロックチェーンのスマートコントラクトに入れるユーザー側(例えばEV)も同様に、要求するブロックチェーン(スマートコントラクト)を作り、マッチングする。図5が、その構成であり、周囲の発電源のうち、最も安い電源を分散で選択する。送電コストも考慮しており、

$$C_{\text{request}} = C + C \times C_{\text{length}} \quad (1)$$

で、送電コスト、つまり、グリッドに対する負荷削減できるようになっている。実験結果の例を図6に示す。送電距離を大幅に減らすことに成功した。

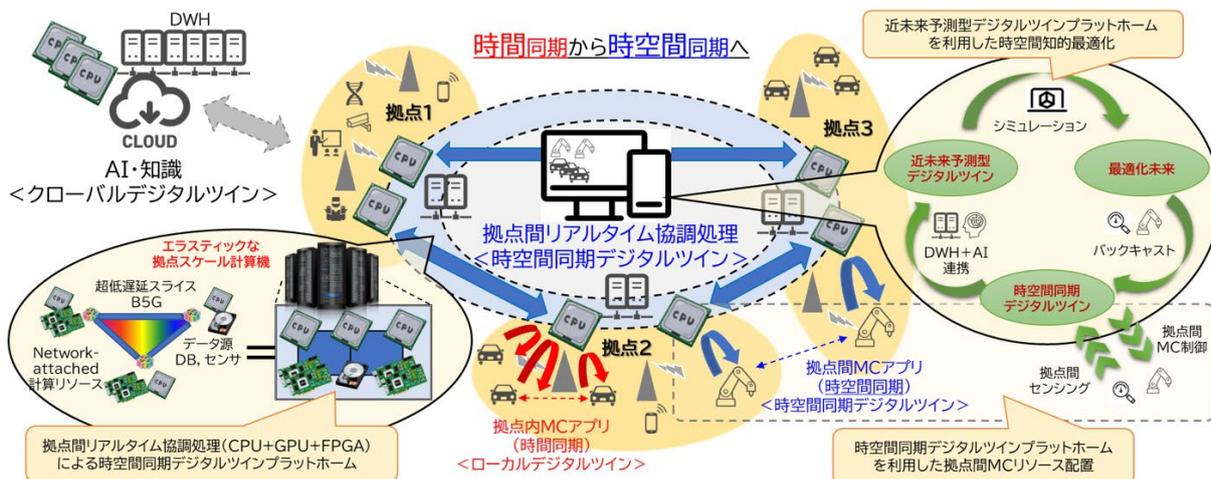


図 1. 時空間同期型デジタルツイン構成法

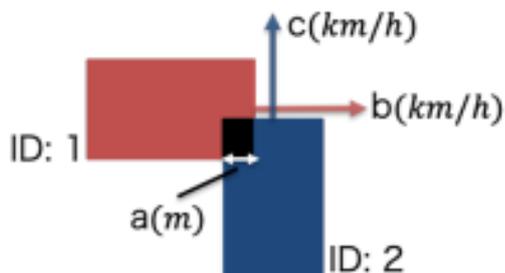


図 2. ヒートマップを用いた衝突予測の例

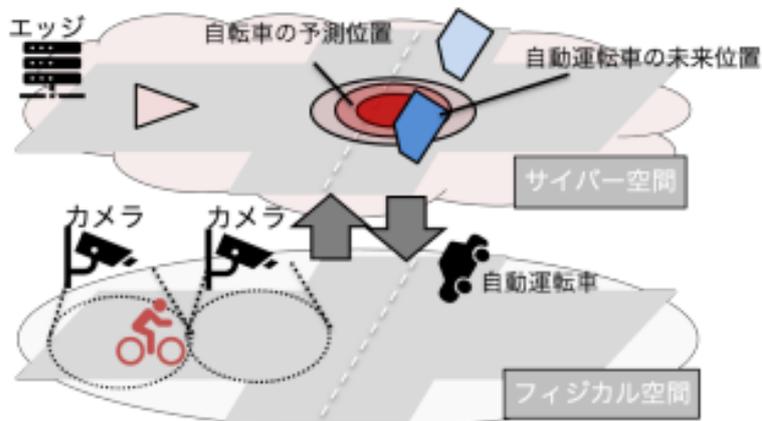


図 3. CPS を用いた衝突防止手法の概要

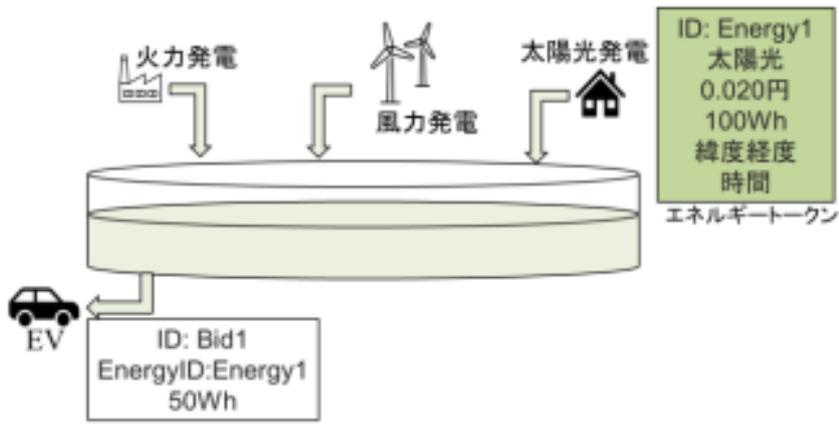


図 4. 提案方式の概念

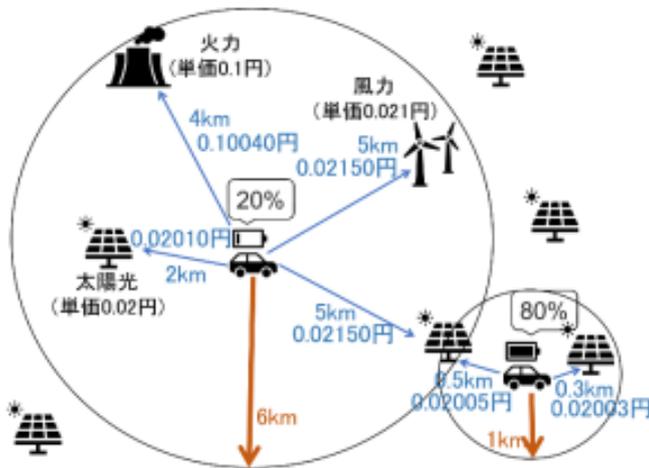


図 5. 提案方式における電力検索

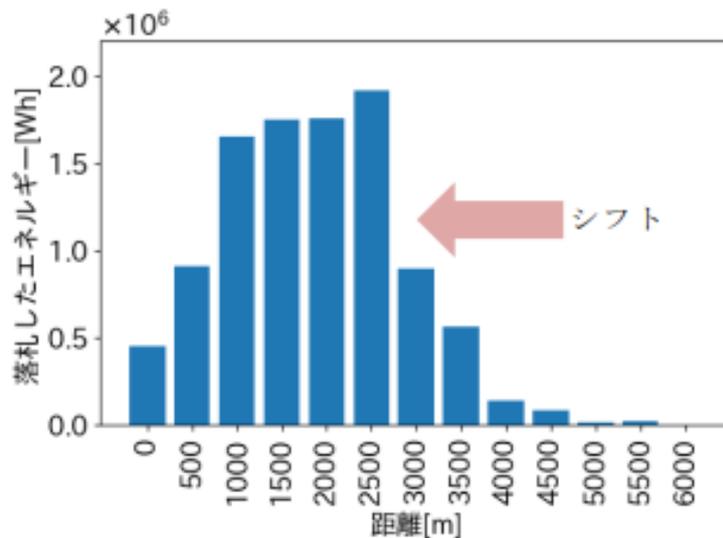


図 6. エネルギー伝送コストが 1m あたり 1×10^4 円の場合の距離に対する落札されたエネルギーの量

[Ref]

- (1) N.Yamanaka, "Time-space synchronized digital twin for B5G managed network", ICNC2023, Invited Short Talk (2023)
- (2) B. Zhu et al., "First Demonstration of Hollow-Core-Fiber Cable for Low Latency Data Transmission", OFC2020, Th4B.3 (2020)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kyosuke Sugiura, Masaki Murakami, Yoshihiko Uematsu, Satoru Okamoto, Naoaki Yamanaka	4. 巻 Vol. 11, No. 2
2. 論文標題 Lane alignment characteristics in massively parallel Ethernet-based transmission systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express (ComEx)	6. 最初と最後の頁 80-85
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2021XBL0192	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ryota Kawase, Taichi Okumura, Masaki Murakami, Yoshihiko Uematsu, Takashi Kurimoto, Satoru Okamoto, Naoaki Yamanaka	4. 巻 Vol. 10, No. 8
2. 論文標題 Assessing service survivability under failure conditions in reliable multipath network testbed	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express (ComEX)	6. 最初と最後の頁 422-427
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2021ETL0010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kyosuke Sugiura, Masaki Murakami, Yoshihiko Uematsu, Satoru Okamoto, Naoaki Yamanaka	4. 巻 Vol. 10, No. 5
2. 論文標題 Hierarchical round-robin mapper emulator for evaluating massively parallel Ethernet physical layer developing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express (ComEX)	6. 最初と最後の頁 248-253
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2021XBL0003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 1件/うち国際学会 8件）

1. 発表者名 岡本聡, 石井大耀, 村上正樹, 山中直明
2. 発表標題 ダイナミックMACエミュレータを利用した部分故障回復実験
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会, No. B-12-9, March 2022.
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 釣谷剛宏, 吉兼昇, 角田聖也, 神野正彦, 小玉崇宏, 石井大耀, 村上正樹, 岡本聡, 山中直明
2. 発表標題 超並列光ネットワーク基盤技術
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会, No. BI-7-4, March 2022.
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yutaka Nasu, Takashi Kurimoto, Satoru Okamoto, Naoaki Yamanaka
2. 発表標題 Packet-by-packet priority control for few microseconds order jitter application
3. 学会等名 2021 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC2021), No. C2-3, December 2021. (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taichi Okumura, Masaki Murakami, Yoshihiko Uematsu, Satoru Okamoto, and Naoaki Yamanaka
2. 発表標題 Multi-Path-based Routing Method Applicable to Networks Consisting of Devices with High Failure Rates
3. 学会等名 2021 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC2021), No. C3-2, December 2021. (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Murakami, Kyosuke Sugiura, Yoshihiko Uematsu, Satoru Okamoto, Naoaki Yamanaka
2. 発表標題 Experimental Evaluation of Skew Handling over Massively Parallel Optical Channel for the Dynamic MAC
3. 学会等名 17th International Conference on IP+Optical Network (iPOP 2021), No. TP6, September 2021. (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本聡, 石井大耀, 村上正樹, 山中直明
2. 発表標題 ダイナミックMACにおける部分故障救済手法
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会, No. B-12-1, September 2021.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石井大耀, 村上正樹, 植松芳彦, 岡本聡, 山中直明
2. 発表標題 超並列伝送における部分故障に対応した縮退運転手法および実験系における評価
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告 フォトニックネットワーク研究会, Vol. 121, No. 165, PN2021-14, pp. 15-20, August 2021.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 那須 豊, 栗本 崇, 岡本 聡, 山中 直明
2. 発表標題 End-to-end転送時間揺らぎ値をmsオーダーで保証するキュー読み出し制御手法の評価実験
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会, Vol. 121, No. 166, PN2021-13, pp. 7-14, August 2021.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Murakami, Nicolas Dubrana, Yoshihiko Uematsu, Satoru Okamoto, and Naoaki Yamanaka
2. 発表標題 Kalman Filter-based Heavy Hadoop Job Detection Method for Energy Efficient Hybrid Electro-Optical Intra-Data Center Networks
3. 学会等名 The 26th OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2021), No. M4A.6, July 2021. (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke Hirota, Shinya Nakamura, Kohei Shiimoto, Hidetsugu Sugiyama, Noboru Yoshikane, Satoru Okamoto, Masaki Murakami, Takahiro Hirayama, Satoshi Yamanoi
2. 発表標題 End-to-End Management of All Optical Disaggregated Network and Applications with Cloud Native Environment for the Smart World Network Infrastructure
3. 学会等名 The 26th OptElectronics and Communications Conference (OECC2021), No. M4A.4, July 2021. (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥村泰地, 村上正樹, 植松芳彦, 岡本聡, 山中直明
2. 発表標題 高確率で故障するネットワーク条件下における耐障害性マルチパスルーティング
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会, Vol. 121, No. 76, PN2021-10, pp. 33-39, June 2021.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山中直明
2. 発表標題 リアルタイムなデータを活用した5G時代のエッジコンピューティング～自動運転にみるダイナミックビッグデータビジネス～
3. 学会等名 電波技術協会報 FORN, Vol. 5, No. 340, pp. 10-13, May 2021.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 那須 豊, 栗本 崇, 岡本 聡, 山中 直明
2. 発表標題 URLLCの実現を目指したパケット制御技術の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会学生ワークショップ, March 2021.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白井涼祐、山本剛毅、村上正樹、岡本聡、山中直明
2. 発表標題 CPS を利用したカメラ間連携による自転車/自動運転車間事故削減のための自転車位置推定手法
3. 学会等名 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川瀬涼太、村上正樹、植松芳彦、岡本聡、山中直明
2. 発表標題 特定人物検索におけるエッジ間連携による人物追跡手法
3. 学会等名 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前田紗永子、那須豊、岡本聡、山中直明
2. 発表標題 フレームメタ情報に基づく動的カメラクラスタリング手法を用いたリアルタイム多視点映像配信手法
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yu Nishio, Masaki Murakami, Satoru Okamoto, Naoaki Yamanaka
2. 発表標題 Automatic Camera Selection and Broadcast Method Based on Dynamic Optical Path among Edge Computers
3. 学会等名 16th International Conference on IP+Optical Network (iPOP 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryosuke Shirai, Satoru Okamoto, Naoaki Yamanaka
2. 発表標題 Proposal to predict location information for unconnected vehicle and control autonomous driving vehicle at intersections using optical network
3. 学会等名 16th International Conference on IP+Optical Network (iPOP 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naoaki Yamanaka, Goki Yamamoto, Satoru Okamoto, Andrea Fumagalli
2. 発表標題 Cyber-Physical System for Autonomous Driving Vehicle considering with Social Welfare
3. 学会等名 International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 山中 直明 編著、中村 武宏 著、崔 真淑 著	4. 発行年 2022年
2. 出版社 慶應義塾大学出版会	5. 総ページ数 212
3. 書名 ビヨンド5Gが描く未来 2030年の技術・暮らし・ビジネス	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	岡本 聡 (OKAMOTO SATORU) (10449027)	慶應義塾大学・理工学研究科(矢上)・講師 (32612)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山口 正泰 (YAMAGUCHI MASAYASU) (60509967)	慶應義塾大学・理工学研究科(矢上)・特任教授 (32612)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関