

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：13101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K22026

研究課題名（和文）流路健全性の保全・回復を目的とするデータ駆動型の河道能動制御法

研究課題名（英文）Data-driven Active River Channel Control for Maintenance and Recovery of Stream Integrity

研究代表者

村松 正吾（Muramatsu, Shogo）

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：30295472

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、河川流路の健全性の保全と回復を実現する河道能動制御法を提案した。河川流路変動を制御するためのサイバー・フィジカル・システム(CPS)を構想し、その構築に役立つ技術として、データ駆動による河床変動の時間発展式の導出と流路変動の推定アルゴリズムを開発した。また、水系全体の水位分布の予測に関する手法も提案した。流路を健全な状態に保つため、水制の最適配置制御を行うプロトタイプCPSを構築し、センシングからアクチュエーションまでの一連の処理を実現し、その評価と課題の整理を行った。研究成果として、国内学会にて7件、国際会議にて2件の発表を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、大規模な河川災害が頻発し、人命と社会資産の損失が繰り返され、既存の治水技術の効力不足を露呈している。現時点では、洪水流の偏心の発生機構が未解明なため、沿川のインフラや集落の保護工法も予兆検出も技術を確立できていない。勘と経験に頼る対策ではなく、デジタル化による河川の状態予測と治水の機能拡張が求められている。

CPSの構築には、技術分野を横断する複合現象モデルの開発、検証が求められる。モデリングの拠り所となる河川物理が十分に解明されていない現在、異分野融合体制で新たな価値を創出した本研究は、挑戦的でさらなる研究展開の礎となり学術的にも社会的にも意義があった。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed a river channel active control method to maintain and restore river channel integrity. A cyber-physical system (CPS) for controlling river channel dynamics is proposed, and a data-driven algorithm for deriving the time evolution equation of river bed movement and estimating the channel dynamics is developed as a useful technique for the CPS construction. We also proposed a method for predicting the water level distribution in the whole river system.

A prototype CPS was constructed to control the optimal placement of groynes to maintain a healthy channel, and a series of processes from sensing to actuation was realized.

We made 7 presentations at domestic conferences and 2 presentations at international conferences as research results.

研究分野：防災工学

キーワード：サイバー・フィジカル・システム 流路変動 河道制御 データ駆動 強化学習

1. 研究開始当初の背景

大規模な河川災害により人命と社会資産の損失が繰り返されている。機械施工による現代治水が開始されて以来、100年程が過ぎているが、堤防の完成率は約半数に留まる。20世紀中は一定幅の直線的な流路への人工改修が水害抑制に大きく貢献してきたが、近年の水害の頻発は、これまでの治水の実効性に疑問を投げかけ、全く発想の異なる方法での被害抑制の必要性を示唆していた。人工改修による直線流路は、洪水流を直線的な流路形状に沿わせて迅速かつ安全に海域に排出することを期待している。しかし、洪水流は現実には直進せず、河川に沿う道路や橋梁の流出、沿川集落の消失など想像しがたい被害を誘因し続けている。

モノのインターネット (IoT) 技術の発展に伴い、現実世界のビッグデータの蓄積が可能となっている。人工知能 (AI) を駆使してそれらの情報を即座に解析し、現実世界にフィードバックするサイバー・フィジカル・システム (CPS) の社会実装への期待も内閣府第5期科学技術基本計画に盛り込まれるなど高まっていた。研究開始当初にも、IoT 技術を駆使する洪水予測システムの構想は存在していた。しかしながら、流路変動の物理が不明瞭で、計測データも限られ、制御アルゴリズムも確立されておらず、河川流路の適応的制御は不可能であった。

2. 研究の目的

発災時の避難経路の確保と発災後の早期復興のためには交通網など重要インフラの被害を最小化する必要がある。一方、河道の多くは、土砂堆積により水流が偏心しやすく、樹木の繁茂と相まって不要な破堤や氾濫を誘因しかねない状況にある。治水の最善策は氾濫の予防である。そこで本研究では、流路健全性の保全と回復のための河道能動制御法を提案し、そのプロトタイプシステムを構築し、提案法を評価することを目的とした。同システムではCPSの枠組みを採用することとした(図1)。

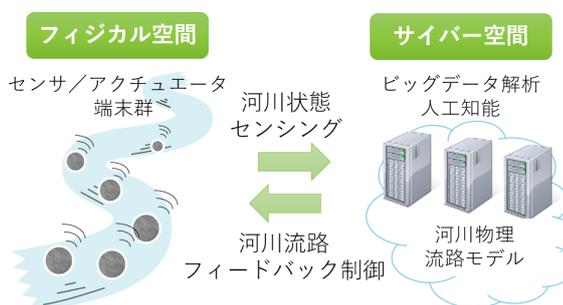


図1: 洪水被害を未然に防ぎ、氾濫時にも被害を最小限に抑えるサイバー・フィジカル・システム (CPS) を提案。プロトタイプによる評価を目的とした。

平常時から河川の偏心を抑え、水流抵抗を軽減し、樹林化を防ぐ技術を確立し、将来の河川防災・減災CPSの社会実装に役立つ発展的研究への礎を築くことを目指した。

3. 研究の方法

本研究の遂行に必要な情報科学、河川工学、地盤工学、物理学の異分野融合研究体制を組織し、河川災害予防のためのデータ解析を行い、システムを構想した。

自律的に生じる河川流路の偏心を抑えるために、

- 河川を観測し、その状態を推定すること、および、
- 河川の状態を健全に保つよう流路を制御すること

が重要であった。そこで本研究では、

- データ駆動による河床変動の時間発展式の構築と流路変動推定アルゴリズムの開発
- 流路を健全な状態に保つための水制の最適配置制御を行うプロトタイプCPSの構築

を行った。2019年度から2020年度までの2年間での取り組みを以下にまとめる。

2019年度 主として、データ駆動による河川状態の時間発展式の構築と同式を適用した流路変動推定法、流路を健全に維持する保全・回復のための動的制御法について検討を進めた。屋内流水実験装置(河川模型)を利用したプロトタイプCPS構築のための設備を整えた。

2020年度 主として、データ駆動による河川状態の時間発展式の洗練化と流路制御CPSで利用する水制配置制御の強化学習シミュレーション、および、流路制御プロトタイプCPSの実装を行った。

(1) 流路変動推定

実験には屋内流水実験装置および水表面と水底面の起伏を同時計測可能なストリームトモグラフィ(ST)を採用した^[1]。ST装置は、稼働台に設置されたシートレーザとカメラから構成される。流路変動の数式モデルの構築には、データ駆動により高次元力学系の時間発展式を導出可能な動的モード分解(DMD)を採用した^[2]。

また、水底面が不可視である状況も考慮し、先の時間発展式から流路変動の予測を試みた。拡縮流路^[3]を構成する水制構造物を実験模型に固定した場合と水制のない場合について ST 装置によりデータを取得し、DMD の性能評価とその課題を整理した。

(2) 流路変動制御

流路を健全に維持する保全・回復のための制御法について検討した。観測可能な画像情報から流路の健全性を算出し、これを報酬とする強化学習を制御に取り入れた。GPGPU 計算機、数値計算ソフトウェア、屋内流水実験装置に装備するためのセンサ、ネットワーク、アクチュエータなどの機材、IoT クラウドサービスライセンスを購入し、以下の手順で流路制御 CPS のプロトタイプ構築を進めた(図 2)。

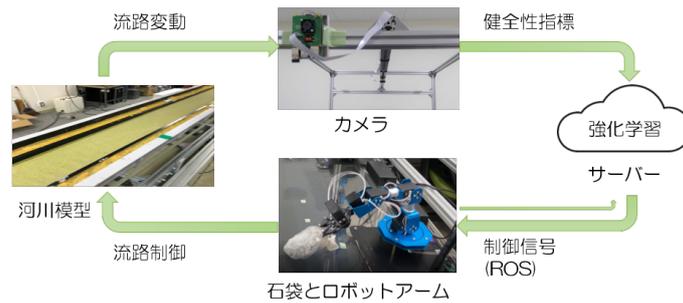


図 2: 流路制御プロトタイプ CPS の構成

- ① 仮想モデルによる強化学習 (モデル・イン・ザ・ループシミュレーション)
- ② 半仮想プロトタイプ CPS 構築 (ハードウェア・イン・ザ・ループシミュレーション)
- ③ 河川模型プロトタイプ CPS 構築 (コンポーネント・イン・ザ・ループシミュレーション)

本システムの開発には MATLAB/Simulink によるモデルベース開発手法を採用した。また、センサ、サーバー、アクチュエータの間の通信に IoT クラウドサービス ThingSpeak を、アクチュエータの制御にロボット用ソフトウェアプラットフォーム Robot Operating System (ROS) を利用し、各構成要素の独立性を高めて将来の拡張に備えた。

4. 研究成果

流路変動推定に関しては、時間発展式の導出に DMD を採用し、水面の起伏からの底面の起伏の推定を試みた。また、流路変動制御に関しては、仮想モデルにより水制構造物の最適配置シミュレーションを実施し、強化学習の有効性を確認した。さらに、プロトタイプ CPS を構築し、河川模型による実験を開始した。COVID-19 の影響により、当初の計画から進捗が遅れ、期間内に実験結果をまとめることができなかった。引き続き実験を継続する。

(1) 流路変動推定の成果

流路変動推定に関する主な研究成果を以下にまとめる。

- ① 金子侑平, 村松 正吾, 安田浩保, 早坂圭司, 大竹雄, 小野峻佑, 湯川正裕, “波動現象を考慮した畳み込みスパース符号化動的モード分解による河床状態推定”, 第 34 回信号処理シンポジウム予稿集, 2019 年 11 月 (査読なし)
- ② 新井裕介, 金子侑平, 村松 正吾, 安田浩保, 早坂圭司, 大竹雄, “水制の模型実験による畳み込みスパース符号化動的モード分解の性能評価”, 信学技報, vol. 119, no. 440, SIP2019-156, pp. 307-312, 2020 年 3 月 (査読なし)

後者の成果について概説する。河川模型への流水開始 10 分後から 100 分後までの 10 分間隔の ST 計測値を DMD の訓練データとして、流水開始 110 分後から 170 分後までの ST 計測値を底面推定のテストデータとして用いた。長さ: 12m, 幅: 0.45m, 水路勾配 1/200, 流量: 2.0ℓ/sec の河川模型を利用した。水制としてネットに詰めた小石を河川模型の上流側、両岸に対になるよう 3 個ずつ計 6 個設置した。水面の訓練データをもとに流水開始 110 分後から 170 分後までの底面の状態を DMD と信号復元手法を組み合わせ推定した。流水開始 110 分後から 170 分後までの底面推定を行い、実際に観測した底面計測データとの誤差を評価したところ、10%内外の平方根平均二乗誤差 (RMSE) で推定できることを確認した。

(2) 流路変動制御の成果

流路変動制御に関する主な研究成果を以下にまとめる。

【強化学習】

- ① D. Liu, Y. Naito, C. Zhang, S. Muramatsu, H. Yasuda, K. Hayasaka and Y. Otake, “River Flow Path Control with Reinforcement Learning,” *Proc. of IEEE International Conference on Autonomous Systems (ICAS2021)*, Aug. 2021 (査読あり)

本成果では、流路制御 CPS のための強化学習法を提案した。蛇行成長のメカニズムやその抑制のための水制の最適制御は不明である。そこで、データ駆動手法を用いた流路制御システムを提案した。提案したシステムは、流路の健全性に依りて水制を適応的に移動させることで蛇行を抑制する。河川モデルを用いたシミュレーション実験により提案法の有効性を確認した。

【プロトタイプ CPS 構築】

- ① 内藤勇鷹, 村松 正吾, 安田浩保, 早坂圭司, 大竹雄, “河川流路変動の解明と制御のためのサイバーフィジカルプロトタイプシステム構築”, 映情学技報, vol. 44, no. 20, ME2020-92, pp. 15-16, 2020 年 9 月 (査読なし)
- ② C. Zhang, 内藤勇鷹, 村松 正吾, 安田浩保, 早坂圭司, 大竹雄, “河道能動制御システムのプロトタイプ構築”, 信学総大予稿集, A-18-3, 2021 年 3 月 (査読なし)

本成果では、流路制御 CPS を提案し、そのプロトタイプシステムにおける水制アクチュエーションの実装と水制配置実験の評価を行った。

図 3 に流路制御 CPS の半仮想プロトタイプシステムを示す。実河川の代わりに横たえたモニタに河川シミュレーションの状態を表示し、カメラによる観測から流路の健全性指標を算出した。この指標を報酬としてサーバーに送り、アクチュエータ制御のための強化学習を行った。アクチュエータとしてロボットアームを採用し、サーバーから送出される制御信号により水制の配置制御を行った。水制としてネットに詰めた小石を利用した。河川シミュレーションの表示を更新することで、報酬が上がるように水制の配置も自動的に更新されることを確認した。

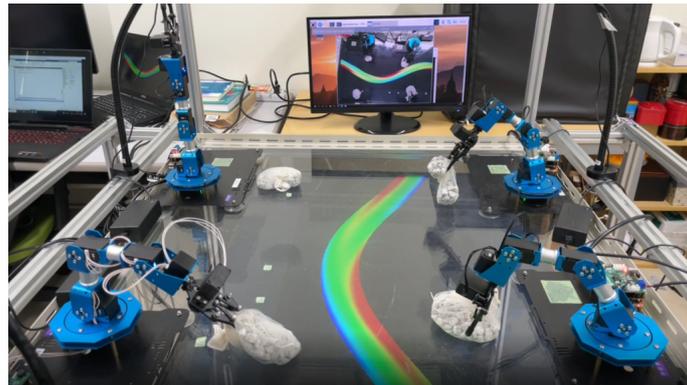


図 3: 半仮想プロトタイプ CPS 実験

(3) 国内外における位置づけとインパクト

近年日本では、大規模な河川災害が頻発し、人命と社会資産の損失が繰り返され、既存の治水技術の効力不足を露呈している。加えて、土木技術者の年齢構成の偏りが、熟練者から若手への技術と知識の継承を困難にしている。現時点では、洪水流の偏心の発生機構が未解明なため、沿川のインフラや集落の保護工法も予兆検出も技術を確立できていない。一方、国土交通省では気候変動による水災害に備えるための対策を急いでいる。このような背景から、勘と経験に頼る非効率で場当たりの対策ではなくデジタル化による河川の状態予測と治水の機能拡張が求められている。ICT 技術により、都市や地域における治水のデジタル化を進めることは、内閣府と関係省庁が一体となって推進するスマートシティの構想にも合致する。

本提案については、自律システムに関する国際会議 (IEEE ICAS2021) に採択された。同会議の採択率は 40% と厳しく、本提案の価値が国際的にも認められた結果である。

CPS の構築には、現実世界で起こる現象を仮想空間で再現するデジタルツインが求められる。その根幹では、技術分野を横断する複合現象モデルの開発、検証が求められる。モデリングの拠り所となるべき河川物理が十分に解明されていない現在、異分野融合により新たな価値を創出した本研究は、挑戦的で価値があり、さらなる研究展開の礎となった。

(4) 今後の展望

まず、研究開始当初に計画されていた屋内流水実験装置 (河川模型) による流路制御の実験結果をまとめる。さまざまな条件下でのデータ駆動による水制の最適配置を観察し、流路変動メカニズムの解明を進める。

将来は図 4 に示すよう、河道内の流路制御を実河川に配備するための課題に取り組まなければならない。克服すべき課題を以下にまとめる。

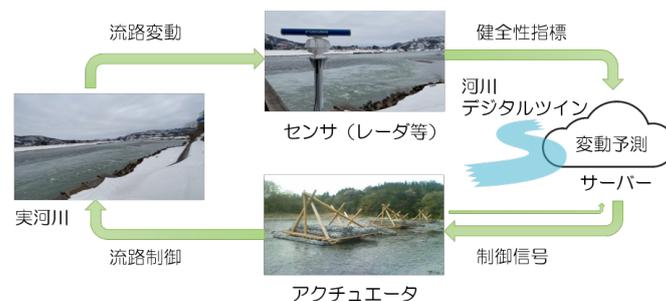


図 4: 流路制御 CPS の実河川配備

① 流路変動のセンシング

昼夜を問わず天候などの環境に左右されず、安定的で広範囲にわたる実河川の水面形状の測定が必要となる。なお、2020年度より挑戦的研究(開拓)20K20543“Xバンドレーダとデータ駆動の融合による高分解能かつ多元的な洪水モニタリングの創出”(代表:安田浩保)として、信濃川小千谷にマイクロ波レーダ計測装置を設置し、河川モニタリングの実証実験を開始している^[4]。水位計による点計測から面計測へと展開している。

② 河川デジタルツインの構築

河道の流路変動メカニズムをサイバー空間で再現する河川デジタルツインの構築が必要となる。なお、2021年度より基盤研究(A)21H04596“自然法則に基づく安定性河道とデータ駆動型の河道の予知保全法による河川の多重性向上”(代表:安田浩保)として、実河川の河床状態の時間発展を予測する計算手法の開発を開始している。モデル駆動とデータ駆動を融合した解析と河道の予知保全へと展開している。

③ 水制のアクチュエーション

構想する流路制御CPSでは、アクチュエータとしての動的な水制が必要となる。実河川への実装において、経済的な面からも困難な課題である。水制構造物のネットワーク化や効率的な配備の問題に加えて、重機や水制自体の自律ロボット化による移動や変形の実現が求められる。河川模型プロトタイプCPSを活用した事前の検討によりその効果を十分に検証しなければならない。

本研究では河道内の局所的な流路変動を対象としたが、対象とする地点への入水量が河床変動に与える影響は小さくない。そこで、水系上に点在する水位観測所の位置情報と河川の接続情報、水位の時系列データからグラフ信号^[5]を構成し、DMDと融合して水位分布の時間発展をデータ駆動により導出する手法も提案した。導出される時間発展式は、制御理論での解析が可能な状態空間モデルである。以下に研究成果をまとめる。

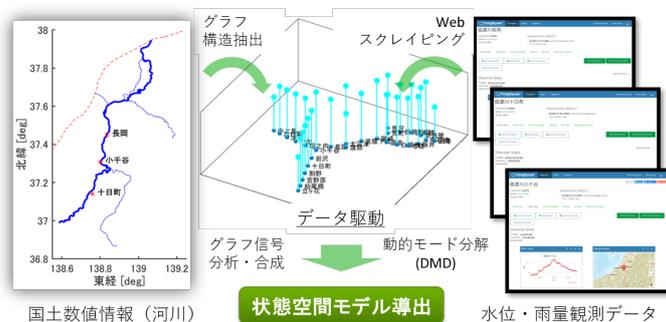


図 5: 多地点河川水位の解析と予測

- ① 新井裕介, 村松正吾, 安田浩保, 早坂圭司, 大竹雄, “グラフ動的モード分解による多地点河川水位の解析と予測”, 第35回信号処理シンポジウム, 2020年11月(査読なし)
- ② Y. Arai, S. Muramatsu, H. Yasuda, K. Hayasaka, Y. Otake: Sparse-Coded Dynamic Mode Decomposition on Graph for Prediction of River Water Level Distribution, *Proc. of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP2021)*, pp. 3225–3229, June 2021 (査読あり)

将来、これらの研究成果は排水・放水によって水系全体の水位分布を制御する流域治水CPSの構築へ展開できると考えている。

<引用文献>

- [1] 星野剛, 安田浩保, 倉橋将幸, “交互砂州の形成機構の解明に向けた水面と底面の同時計測手法の開発”, 河川技術論文集, 第74巻, 1号, pp.63–74, 2018年
- [2] Steven L. Brunton and J. Nathan Kutz, “Data-Driven Science and Engineering,” Cambridge University Press, Feb. 2019
- [3] 梅木康太郎, 安田浩保, 小野伊佐緒, 保坂裕, 清水一浩, 黒石和宏, “早出川における拡張流路が有する治水機能と環境機能の実証”, 河川技術論文集, 第27巻, pp.141–146, 2021年6月
- [4] 茂木大知, 安田浩保, 大竹雄, 村松正吾, 早坂圭司, 他2名, “マイクロ波レーダによる河川モニタリングの概念実証”, 第38回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, 2020年11月
- [5] 田中雄一, “グラフ信号処理のすゝめ”, 電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, 8巻, 1号, pp. 15–29, 2014年7月

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 新井裕介, 金子侑平, 村松正吾, 安田浩保, 早坂圭司, 大竹 雄
2. 発表標題 〔ポスター講演〕水制の模型実験による畳み込みスパース符号化動的モード分解の性能評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信号処理研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金子 侑平, 村松 正吾, 安田 浩保, 早坂 圭司, 大竹 雄, 小野 峻佑, 湯川 正裕
2. 発表標題 波動現象を考慮した畳み込みスパース符号化動的モード分解による河床状態推定
3. 学会等名 電子情報通信学会第34回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 茂木大知, 安田浩保, 早坂圭司, 村松正吾
2. 発表標題 Optical-Flowを用いた表面流速測定手法の開発と移動床における適用性の検証
3. 学会等名 第37回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石原道秀, 安田浩保, 村松正吾, 早坂圭司
2. 発表標題 河床波の伝播速度の時空間分布の理論的な評価
3. 学会等名 第37回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ZHANG CHEN, 内藤 勇鷹, 村松 正吾, 安田 浩保, 早坂 圭司, 大竹 雄
2. 発表標題 河道能動制御システムのプロトタイプ構築
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内藤勇鷹, 村松正吾, 安田浩保, 早坂圭司, 大竹雄
2. 発表標題 河川流路変動の解明と制御のためのサイバーフィジカルプロトタイプシステム構築
3. 学会等名 映像情報メディア学会メディア工学研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新井裕介, 村松正吾, 安田浩保, 早坂圭司, 大竹雄
2. 発表標題 グラフ動的モード分解による多地点河川水位の解析と予測
3. 学会等名 電子情報通信学会第35回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yusuke Arai, Shogo Muramatsu, Hiroyasu Yasuda, Kiyoshi Hayasaka, Yu Otake
2. 発表標題 Sparse-Coded Dynamic Mode Decomposition on Graph for Prediction of River Water Level Distribution
3. 学会等名 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Dongqi Liu, Yutaka Naito, Chen Zhang, Shogo Muramatsu, Hiroyasu Yasuda, Kiyoshi Hayasaka, Yu Otake
2. 発表標題 River Flow Path Control with Reinforcement Learning
3. 学会等名 IEEE International Conference on Autonomous Systems (ICAS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔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	安田 浩保 (Yasuda Hiroyasu) (00399354)	新潟大学・災害・復興科学研究所・准教授 (13101)	
研究分担者	早坂 圭司 (Hayasaka Kiyoshi) (40377966)	新潟大学・自然科学系・研究教授 (13101)	
研究分担者	大竹 雄 (Otake Yu) (90598822)	東北大学・工学研究科・准教授 (11301)	

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
---------	---------