

協調運転制御システム「T-iCraft[®]」を 南摩ダム本体建設工事に導入

佐野 和幸・佐藤 将・中村 凌

建設作業の少人化、省力化を目指し開発を行ってきた建設作業用ロボット「T-iROBO[®]シリーズ」（以下、本建設作業用ロボットという）に、新たなラインナップ、ダム建設用大型自動建機を加えた。また開発した自動建機に協調運転制御システム「T-iCraft[®]」（以下、本システムという）を適用し、「敷均し」、「転圧」の施工を制御し、堤体盛立に係る一連の作業の協調運転を行った。

今回は、(独)水資源機構が栃木県鹿沼市で建設を進めている南摩ダムをフィールドとして堤体盛立工事の自動化施工を行った。

本稿では本システムの特徴と南摩ダム堤体盛立工事の自動化施工について報告する。

キーワード：少人化、省力化、自動化、建設作業用ロボット、生産性向上、協調運転制御、デジタルツイン

1. はじめに

建設機械の自動化は、将来的に労働人口減少が進むことによる人手不足対応や生産性向上、働き方改革を実現するため、建設現場で早期に望まれる技術の一つである。国土交通省では、2020年12月に「国土強靱化に関する施策のデジタル化」の中で、2025年度までに建設機械の自律制御・走行技術の確立を掲げている。また2022年3月に建設機械施工の普及に向け、業界・省庁横断的な組織である「建設機械施工の自動化・自律化協議会」を設立した。業界内外、産官学を含めた組織横断的な取り組みが示され、自動化建設機械の実現場への導入に向けた取り組みが加速してきている。

2013年より建設作業の少人化、省力化を目指し、様々な本建設作業用ロボットの開発を行ってきた。2021年にはこれらの建設作業用ロボットを複数機種、複数台数を組み合わせ協調運転させる本システムを開発し、更なる生産性向上を図ってきた。この度、現場導入した本システムおよび本建設作業用ロボットは、施工現場におけるDX（デジタルトランスフォーメーション）を担う技術である。

今回の導入では、ダム建設用に開発した大型のブルドーザ2台、振動ローラ2台の合計4台の自動建機を、本システムを用いて、ダム堤体盛立に係る一連の作業の協調運転を実用化した。

写真一に自動建機による施工状況、写真二に自動建機オペレーションルーム（取材時）を示す。



写真一 自動建機による施工状況



写真二 自動建機オペレーションルーム（取材時）

2. 本システムの特徴

(1) 特徴① 様々な機種種の自動建機の協調運転を制御
各自動建機には、全地球測位衛星システム (GNSS) と自動運転プログラムが搭載されており、設定された施工シナリオをそれぞれが自動で実行する。本システムが司令塔となり、各自動建機の位置と作業進捗を監視しながら、自動運転の実行および停止を指示し、全体の協調運転を制御する。

本システムは、大きく分けるとホスト(司令部)、エッジ(自動建機群)で構成される。それぞれの通信プロトコルはあらかじめ定めてあり、各機とも共通のメッセージで通信できるシステムである。ホストへは、位置情報と作業の進捗情報、車両情報が送信される。ホストは受信した情報から、全体の稼働状況を把握し、エッジ側建機群の自動運転の再生、休止や緊急停止の指示を行う。図一1にシステム構成図を示す。

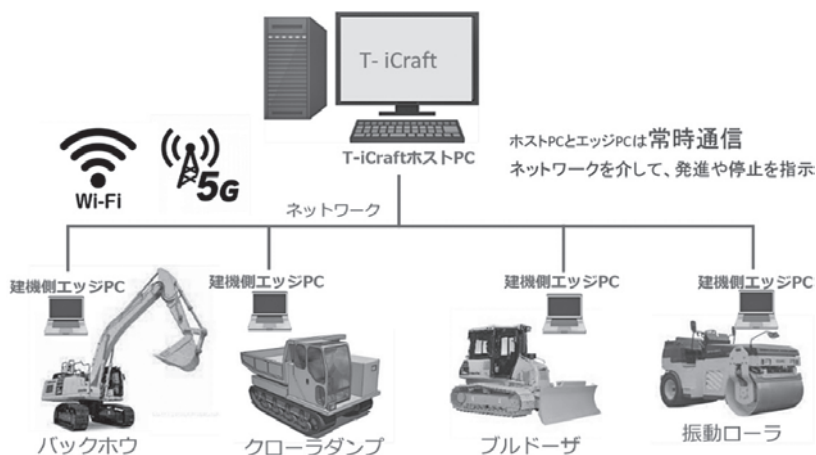
本システムは、自動建機の協調制御を行うために、タスクプランニング技術を活用している。この技術は、物流システムやライン工場で実績のあるシステムであり、建設建機用にカスタマイズした。また、建設機械

の選択の自由度を高めるため、自社で開発した自動建機だけでなく、メーカーが開発した自動建機など様々な建設機械に対応できるシステムとした。これは、今後増えてくることが予想されるメーカー開発の自動建機もシステムに取り込むことを想定している。ここで、タスクプランニング技術について説明する(図一2)。

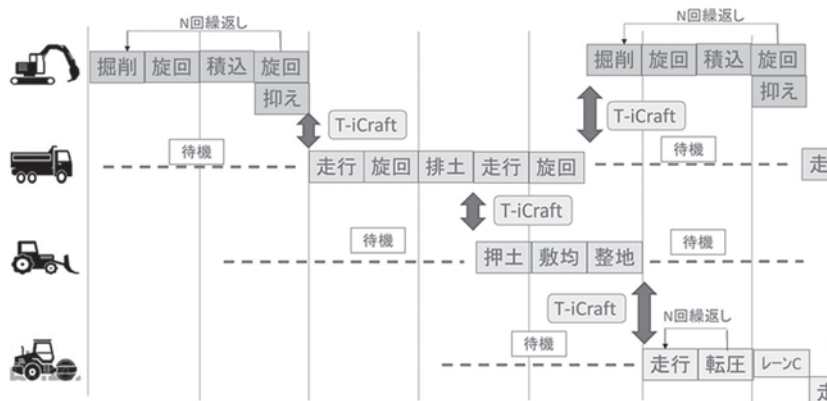
- ①自動建機には作業毎の単位「タスク」が定義されている。
- ②「タスク」の積み重ねからなる「シナリオ」が設定されており、実行すると一連の自動運転を行う。
- ③自動建機それぞれのシナリオを施工順序に並び替え、組み合わせたものを「施工シナリオ」と呼んでいる。本システムが建機同士の連携を図る際に、エッジ側からの位置情報と作業の進捗情報をもとに双方の自動建機に司令を送信する。

(2) 特徴② 有人建機との協働が可能

有人建機のオペレータがタブレットを用いて本システムと通信する HOG (Human Operating Guidance) システムを使用することで、自動建機との協調運転が可能となる。有人建機はシナリオを人間が判断し実行



図一1 本システム構成図



図一2 タスクプランニング技術のイメージ

するため、本システム側では、どのタスクまで終了しているか判断できない。タブレットに表示される指示に従い、オペレータがその指示を実行する。作業ごとに「開始」「終了」を画面操作で本システムに報告することで、自動建機との連携を可能とする。この技術により、有人バックホウと複数台の自動運転ダンプが協働すれば、一人のオペレータで大量の土砂運搬作業が実現可能となる。写真—3に運転席のタブレットを示す。

(3) 特徴③ デジタルツイン技術による接触防止

自動機械で施工を行う場合の安全対策として、デジタルツイン技術による接触防止システムを開発した。この技術は、VR（仮想空間）に施工現場を再現し、再現された現場は実際の座標系と一致させる。実機に搭載したGNSS方位計の情報から、3Dモデルの建設機械の方向と位置情報を再現する。このVR上で建機同士の位置をリアルタイムで計測し、設定した距離を超えて近接した場合に、現実世界の実機を停止させるシステムである。このシステムは、建設機械対人間に

も有効で、作業員がGNSSデバイスを携帯することで、建設機械に近接した時点で停止させることができる。図—3にデジタルツイン接触防止システムを示す。写真—4に現実世界、図—4に同じ場所の仮想現実上の状況を示す。

3. 南摩ダム実施工への導入

(1) 導入した自動建機

ロックフィルダム堤体の盛立を、本システムで振動ローラ、ブルドーザの各2機を協調制御して行った。一般に市販されている建設機械をベースに、操作レバーにはアクチュエータを取り付け、また、建機状態



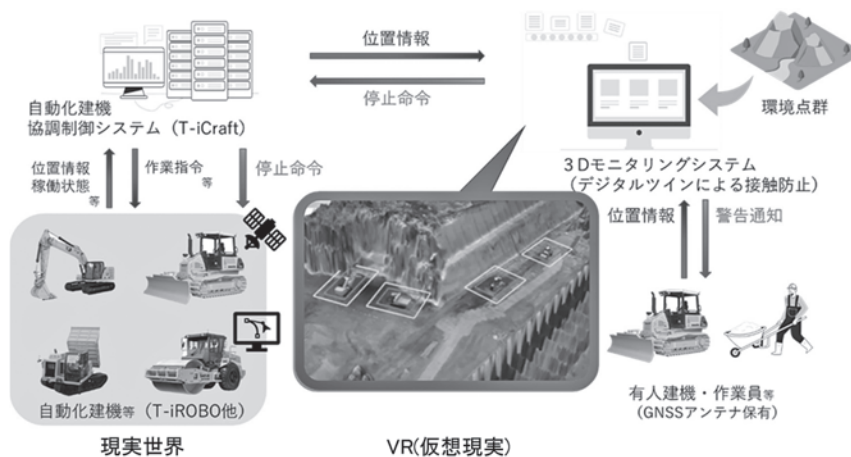
写真—3 運転席のタブレット



写真—4 現実世界



図—4 VR (仮想現実)



図—3 デジタルツイン接触防止システム

の通信用アンテナ, RTK-GNSS 方位計, 障害物センサー, T-iFinder (2022年に開発したAIを用いた人体検知センサー), 制御用PCを取り付け自動建機に改造している。図一5に自動化振動ローラ, 図一6に自動化ブルドーザの搭載機器を示す。

(2) ロックフィルダムへの導入

ロック材は, 堤体から約2.0kmの距離にある原石山から重ダンプを使って運搬する。重ダンプ用の工事用道路は, 一部で一般車との交差, 堤体近傍では一般車両と共用となり, 安全上の配慮から有人のリジットダンプを使用した。写真一5に堤体と上流側に配置した工事用道路(重ダンプ, 一般車両共用)の状況を示す。

今回は有人リジットダンプで「運搬」, 自動化ブルドーザで「敷均し」, 自動化振動ローラで「転圧」の組み合わせで施工を進めた。着岩部, 埋設計器周りの一部の作業等は, 別途有人建機で施工を行った。労働基

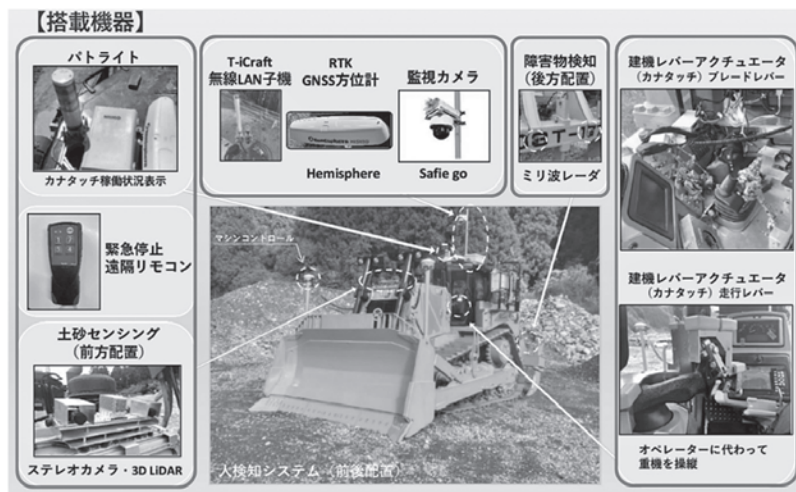
準監督署からの指導もあり, 自動化施工エリアと有人施工エリアは区画して作業を進めた(写真一6)。ロック材は, 自動化施工区画内に有人リジットダンプで先行置きし, 自動化施工区画を閉じてから自動建機で施工した。自動建機を動かすときは, エリア内を無人に



写真一5 堤体と上流側工事用道路



図一5 自動化振動ローラ:(酒井重工業 SV900 18t級 ERC仕様)



図一6 自動化ブルドーザ:(CAT D8 32t級 カナタッチ仕様)

するとともに緊急停止リモコンを持った監視者をエリア外に配置した。図一七に自動化施工状況を示す。

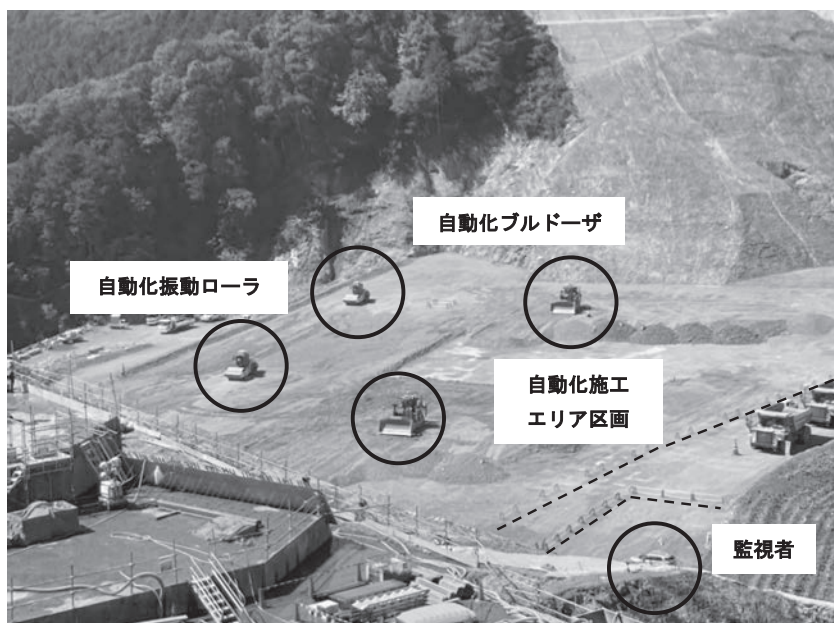
またシステム開発者や特定の人だけが操作できるシステムでは今後の様々な作業へ展開するのは難しい。自動化施工の経験が浅い専門工事業でも使えるシステムを目指し、操作性、GUIを充実させた。操作性、ビジュアルを意識したシステムとすることは、今後の自動化施工の普及に貢献できるものとする。

今回の施工例は、自動建機と有人建機の混在作業のモデルケースのひとつと考えられる。別のケースとして、安全装置を担保したうえで自動建機、有人建機の区画を撤廃して施工を進めることが考えられるが、今回は、労働基準監督署の指導もあったため、前者での施工を選定した。

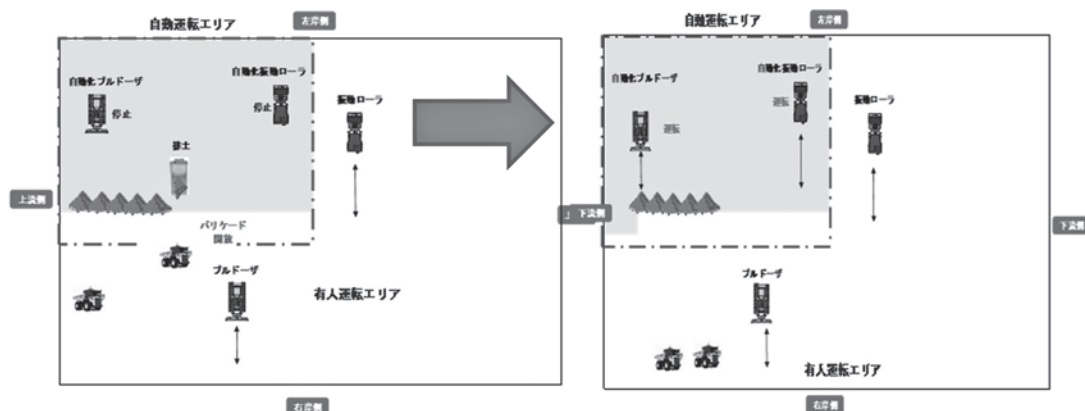
4. 技術的、経済的効果

(1) 技術的効果

今回の施工では大型の機種が必要であったため、適用したい建設機械の中に電制化された機種がなく、制御方式は外付けアクチュエータ方式とした。このため、アクチュエータに起因するトラブルが多く発生し、対応に時間を要した。特にブルドーザにおいてはレバーやスイッチでの操作が多く、大型に起因する振動も大きいためトラブルは多かった。中型の機種では開発し始めているアクチュエータを介さない制御方式の開発が待たれるところである。他にも制御データや各機体の状態を通信する送受信技術、自己位置推定技術など様々なトラブルに対応しながらの導入であった。長期間にわたる現場導入の知見を活かし、今後の



写真一六 エリア区画状況



図一七 自動化施工状況

自動化技術の向上に努めていきたい。建設機械単体の自動運転では省人化の効果は限られていたが、自動建機同士を連携させることで、省人化の効果は更に拡大されることがわかった。連携させる自動建機が増える程、効果は増大する。

デジタルツイン技術の接触防止システムは、今回のような自動建機の安全対策としても活用できるが、通常の有人施工の際にも有効なシステムである。最新の建設機械には、メーカー製の接触防止装置を搭載しているものもあるが、建設現場では新旧を問わず様々な建設機械が使用されている。すべての機種に同じような装置を装備することは非常な労力となる。このシステムであれば、建機の位置情報を取得するだけで接触防止の対策が可能である。

自動建機の開発および実装は今が過渡期であり、市場にはまだ対応可能な自動建機は少なく、機種も限られている。本システムは、自社開発した自動建機やメーカーが開発した自動建機、有人建機を制御できるものである。これは今後「メーカー製の自動建機」が増えてくれば、「自動化されていない従来の建設機械」と協調運転できるため、自動化施工の普及が加速すると考えられる。また施工の自動化は、単調な作業から進められており、複雑な作業は有人による施工に頼らざるを得ない。その場合も HOG システムを活用した、有人建機も含めた協調運転制御をすることにより、単調な作業は自動建機で複雑な作業は有人建機で行うという組み合わせで協働することが可能である。労働人口の減少が今後もつづくと予想されており、少ない人数で複数台の建設機械を操作することで、生産能力の維持が期待できる技術である。

(2) 経済的效果

建設機械の自動化は、人手不足対応や働き方改革の対応策として必要なものであると考えられるが、現在は開発途上であり、システムや機械単体の自動化改造に多額の費用が必要で、経済的といえる状況ではない。今後、自動建機が量産され本システムのような協調運転制御のプラットフォームを使い、少人数で複数台の自動建機を操作することにより、生産性の向上が図れ、経済的效果は自動建機の台数に比例して増大する。労働人口の減少が今後もつづくと予想されており、少ない人数で複数台の建設機械を操作することで経済的效果が期待できる。

5. おわりに

本技術の適用により、インフラ建設現場の自動機械による施工をもって、施工の効率化、安全性の向上を図り、生産性の飛躍的向上を実現するものである。遠く離れた場所からでも現場の施工、管理が可能になることで、人口減少が進むことによる人手不足対応や生産性向上、働き方改革の対応策として大いに期待できる。また自動建機の実現場への導入に向けた産官学の取り組みが加速してきている。今回の自動化施工はそのモデルケースの一つとして示すことができ、少しでも施策の推進に貢献できれば幸いである。

謝 辞

南摩ダム本体工事への自動建機導入に際して、(独)水資源機構 思川開発建設所、パナソニック アドバンス トテクノロジー(株)、(株)カナモト、エム・エス・ティー(株)、西尾レントオール(株)、水谷建設(株)から多大なる協力をいただいた。ここに謝意を表す。

JICMA

《参考文献》

- 1) 中居拓哉, 若山真則, 小森聡: デジタルツインによる接触防止システムの開発, 土木学会第 77 回年次学術講演会
- 2) 佐野和幸, 中居拓哉, 佐藤将, 中村凌: 自動大型振動ローラの実施工導入に向けた開発, 土木学会第 77 回年次学術講演会
- 3) 中居拓哉, 若山真則, 小森聡, 田中真由子: 自動建機群の協調制御システム「TiCraft[®]」の実証, 土木学会第 76 回年次学術講演会

【筆者紹介】

佐野 和幸 (さの かずゆき)
大成建設(株)
土木本部 機械部 機械計画室
次長



佐藤 将 (さとう すずむ)
大成建設(株)
東京支店 環七地下調節池作業所



中村 凌 (なかむら りょう)
大成建設(株)
九州支店 土木部

