

# 独立行政法人土木研究所における 建設ロボット調査研究について

■独立行政法人土木研究所技術推進本部先端技術チーム

主席研究員 ふじの 藤野 けんいち 健一

## 1. はじめに

独立行政法人土木研究所先端技術チームでは、その前身である建設省土木研究所材料施工部機械研究室の時代から建設ロボットの調査研究活動に取り組んできました。

機械研究室時代にはAIを利用した建設機械の自動化やコンクリート部材のプレハブ工法の研究開発などを行い、その後の建設ロボット研究の基礎となる研究開発を行いました。

本報告では、土木研究所において、本格的に建設ロボットに取り組む契機となった国土交通省総合技術開発プロジェクト「ロボット等によるIT施工システムの開発」（以下「ロボットIT総プロ」という）およびそれ以降の活動について紹介します。

## 2. ロボットIT総プロと 自律制御型バックホウ

土木工事は危険苦渋作業が多く、安全確保が課題であり、作業環境や施工法の改善が継続して行われています。また、近年の熟練オペレータの不足や若年労働者の参入によって、生産性や安全性、とりわけ構造物の品質が損なわれることが危

惧されています。

これらに対応するための先導的な研究開発として、離れた場所からの簡単な作業指示によって自律した施工を行うロボット建設機械、ここでは油圧ショベルを用いたIT施工技術の研究開発が国土交通省総合技術開発プロジェクトおよび土木研究所の運営費交付金によって行われました。

実際に建設ロボットで自律的に施工を行う場合、

- ・施工を行う対象の把握（3次元計測）
- ・実施したい施工の内容

に基づいて、動作計画を作成することが必要です。そして、その動作計画に基づいて、ロボットを制御する、いわゆる制御プログラムが必要です。

また、作業を効率的に進めるために、設計目標に近くなってからは出来形に合わせた仕上げを行う掘削動作を行う必要があります（図—1）。

このように、この研究では、

- ・設計情報を含む作業指示情報をもとに、油圧ショベルの動作計画を自動生成する技術
- ・その動作計画をもとに油圧ショベルの動きを自



図—1 掘削動作の種類（イメージ）

動制御する技術

を確立することが必要でした。図-2はこの概念をもとにしたシステム概要図です。

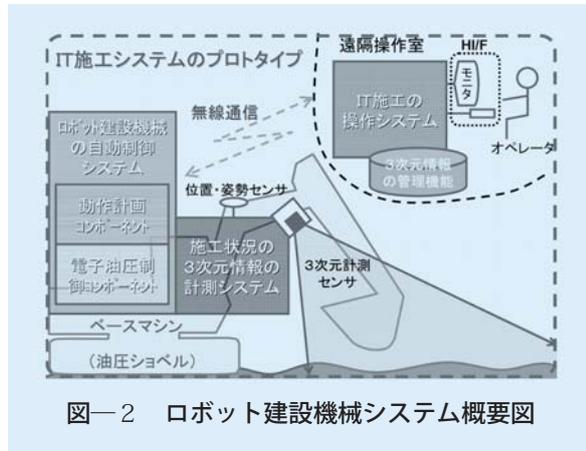


図-2 ロボット建設機械システム概要図

今回の研究開発ではこれらの技術成果を、油圧ショベルをベースマシンとしたプロトタイプ of 自動施工システムに実装し、その効果や課題の把握を行いました。写真-1は実装した油圧ショベルです。写真-2はPC上に表示されたIT施工操作システムを示しており、開発にはMatlabを採用しました。

このシステム構築のためには、精度良く施工状



写真-1 開発技術を実装した自律型バックホウ

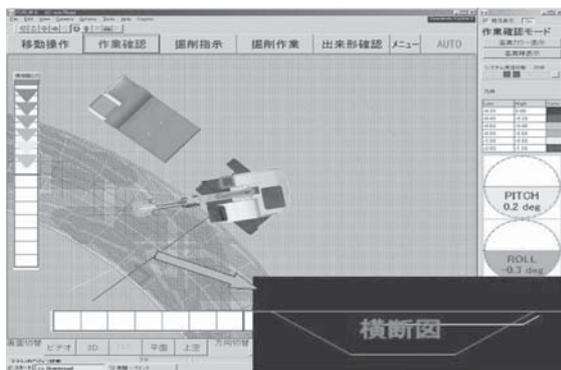


写真-2 IT施工操作システムの画面

況を3次元で計測することが必要です。このシステムでは写真-3に示すセンサが使用されています。

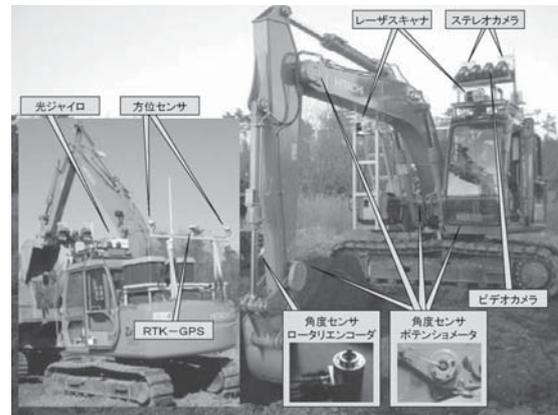


写真-3 装備されている3次元計測センサ

この自律型建設ロボットの研究開発からは以下の成果が得られました。

(1) 3次元情報を用いた施工管理技術の開発

効率的な施工管理を行うことを目的に、施工管理情報としての3次元設計データと3次元で得られる地形情報により、3次元情報を用いた施工管理技術の開発を行った。

- ① 3次元データ圧縮技術仕様の構築
- ② 3次元情報に対応した出来形管理・完成検査技術の開発
- ③ 3次元情報対応機器の開発目標設定

(2) 建設機械のIT施工技術の開発

建設機械のIT施工技術の実用化を目的に、その基盤となる要素技術として、IT施工の操作システム(3次元情報の管理機能)、施工状況の3次元情報の計測システム、建設機械の自動制御システムを開発し、これらの要素技術を実装した実機(プロトタイプ)によりIT施工技術の有効性について検証した。

- ① IT施工の操作システムの開発
- ② 施工状況の3次元情報の計測システムの開発
- ③ 建設機械の自動制御システムの開発

このように、この研究では建設ロボットの基本的な概念がロボット工学的な観点から整理される

とともに、その制御を行うための「動作計画」プログラムの重要性が明らかとなりました。また、3次元計測システムは情報化施工におけるICT機器の活用技術の開発と普及に貢献しました。

一方で、制御を優先しているために、建設機械が本来有している高い出力レベルで作業を行うことが難しいことや地中障害物によってバケットの動作が阻害されたときに、地中障害物によるものか、土の切削抵抗による障害なのかの判断が難しく、現状での知見とプログラムでは状況に応じて適切な動作を選択する制御を実現することが難しいなどの課題を残しました。

### 3. 重点プロジェクト大規模土砂災害等に対する迅速かつ安全な機械施工に関する研究

自律型のロボットの研究を通じて、その制御を改善していくためにはテラメカニクスなどの建設工学的な技術の必要性が明確になりました。しかし、この制御技術の開発には膨大な予算と時間を要することが考えられること、技術的な波及効果は大きいものの、ロボット活用が限定されることなどが考えられたため、制御を自動化するのではなく、人による判断・操作を前提とした実用性の高い建設ロボット、いわゆる「無人化施工」に着目し、「人と機械でその弱点を補完しあってコスト的にも効率的にも最適な建設ロボットを開発していく」方向に路線を変更しました。

この変更はこれまでの自律型建設ロボットを否定するのではなく、人によってどのような認知が行われ、どのような操作が行われるのか、いわゆる認知工学に基づくマンマシンインターフェースの研究を通じて、自律制御にそのノウハウを反映させていく点で、これまでの研究の延長線上にあります。「重点プロジェクト大規模土砂災害等に対する迅速かつ安全な機械施工に関する研究」はこのような背景の下、平成22

年度の事前研究を経て、平成23年度から開始されています。

奇しくも平成23年には東日本大震災に伴う原子力発電所事故、紀伊半島大規模土砂災害などの大規模で危険性の高い災害が連続して発生し、無人化施工に対する注目が集まりました。また、ロボットを専門とする学識経験者からはその実用性と建設関係者が継続して技術ノウハウを維持してきたことについて高い評価をいただきました。

しかしながら、実際にはどのような指標、判断に基づいて無人化施工を採用することになるのか、どのような無人化施工技術が存在し、どのような工種に対応が可能なのか、また、今後どのような工種に対応していくことが必要なのか等、マネジメントについて明確になっておらず、場当たり的になっていることは否めません。

また、遠隔操作を行うに際してのマンマシンイ

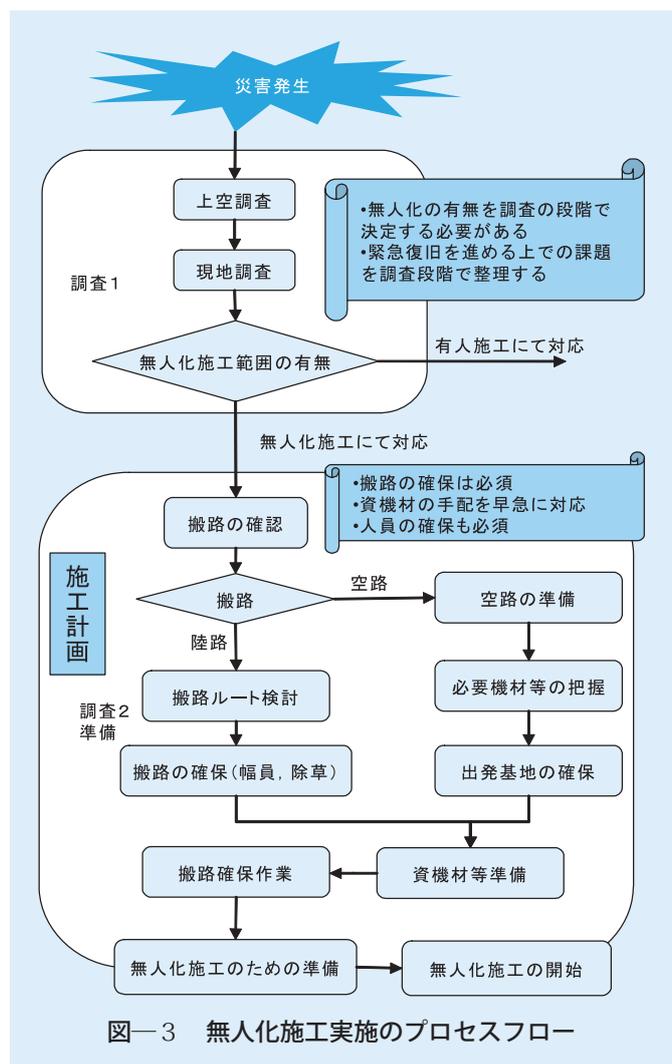


図3 無人化施工実施のプロセスフロー

ンターフェースについてはこれまで現場経験に基づく知見は得られているものの、学問的に、例えば、認知工学等を活用した調査や分析はほとんど行われませんでした。

この研究では、このような点を解決するための調査研究を行っています。

災害発生時の調査と具体的な対策検討の流れをまとめたのが図-3です。調査1によって無人化施工を適用するか否かを判断し、調査2において搬路を確認することによって現場に搬入できる機材の規模を確定し、対策を講じることが可能になってきます。

写真-4はオペレータの熟達度と認知に関する実験の状況です。図-4に示す実験フィールドを設定し、オペレータが遠隔操作で写真-5に示す対象物の移動を行いました。写真-6はアイマー

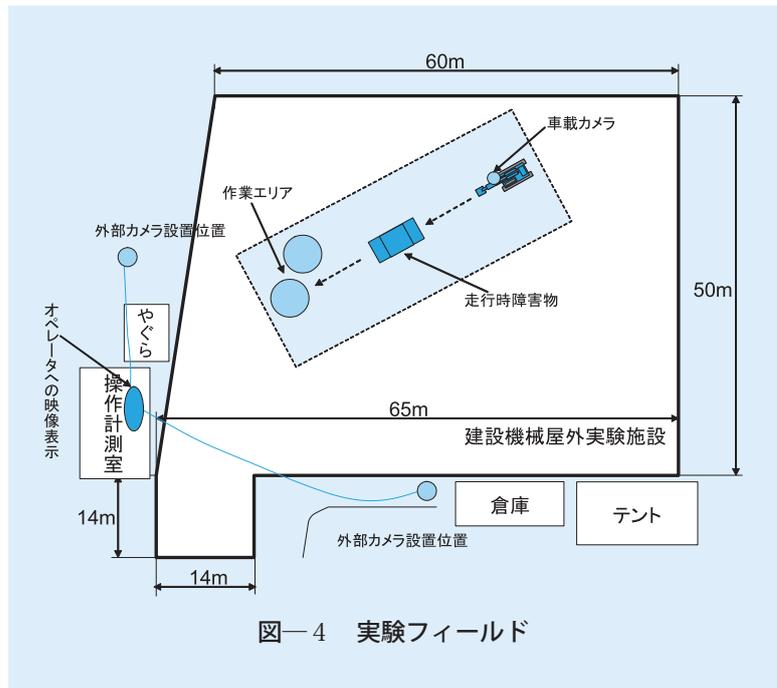


図-4 実験フィールド

クカメラでオペレータの視線を計測している状況です。写真-7は遠隔操作に熟練しているオペレータの視線を示しています。ジグにバケットを引っかけるポイントの位置を素早く、効率的に確認していることが分かります。逆に、写真-8は遠隔操作初心者の視線ですが、どこを注視して良い



写真-4 遠隔操作実験状況



写真-6 遠隔操作の状況

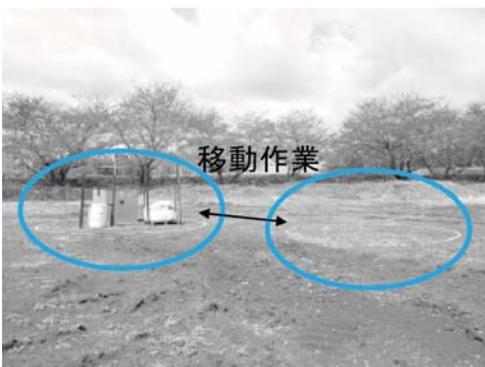


写真-5 対象物の移動作業



写真-7 熟練オペレータの視線

のか分かっていないことが分かります。

この実験では、作業時間の計測なども行い、作業時間の短縮時間を指標として習熟度の測定など



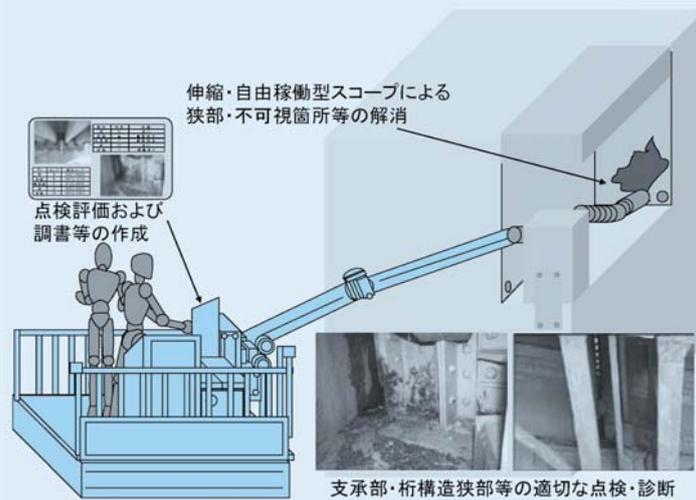
写真—8 初心者オペレータの視線

も行っています。

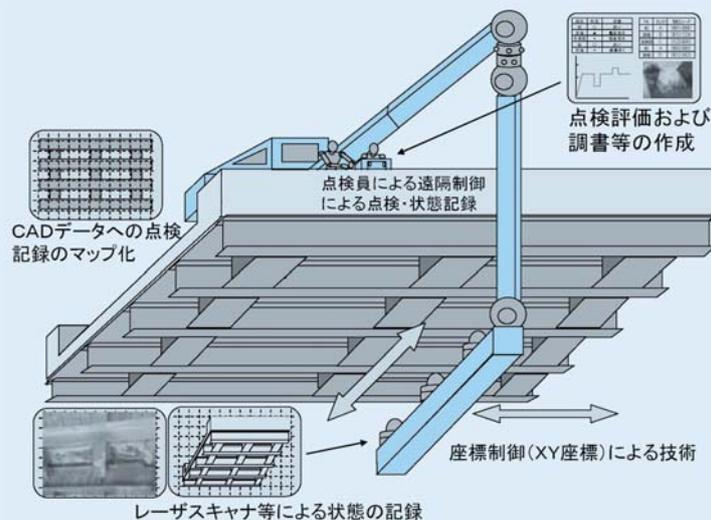
#### 4. 機能的な橋梁点検・評価技術に関する研究

近年、道路や河川管理施設の老朽化が問題になっています。土木研究所では平成22年度より「機能的な橋梁点検・評価技術に関する研究」に取り組んでいます。この研究では、橋梁点検の先端的な技術を有する構造物メンテナンス研究センター（CAESAR）と先端技術チームが連携して行っています。

橋梁は複雑な構造のために人による点検が難し



図—5 不可視部の点検ツールのイメージ



図—6 点検結果の効率的評価ツールのイメージ

いものがあります。また、供用されたあとに歩道が増設されたり、さまざまな占用のために配管が敷設されたりと、当初とは異なる構造になることがあります。このため、点検において人が直接アクセスすることができない、いわゆる不可視部が発生しており、この不可視部を点検することができるロボット技術の開発が必要になっています。また、点検結果を測定した座標と連携させて使いやすい形で整理する技術の開発も必要です。

図—5、6はこの研究で取り扱っている一部の内容です。

不可視部点検のためにツールについては平成25年度には試験機を製作し、その適用性の検証を開始する予定です。

## 5. その他の研究活動

このほか、平成24年度より、国土交通省建設技術研究開発助成を受けて、一般財団法人先端建設技術センターおよび民間5社（青木あすなる建設株式会社、株式会社大本組、株式会社熊谷組、西松建設株式会社、株式会社フジタ）と共同で「無人化施工による応急対応技術とその基盤となるデジタル通信技術の開発」に取り組んでいます。

この研究では、緊急時におけるわが国の災害対処能力を高めることを目的として、災害現場での必要性が高い新たな工法の開発と無人化施工で課題となっている画像伝送について、効率的、低遅延画像伝送技術の開発を進めています。

災害現場での新たな工法としては、新型土嚢を用いて迅速に築堤を行う技術の開発と泥濘化した軟弱地盤の改良技術の開発をテーマとして、無人化施工によってこれを実現する研究開発を行っています。

画像転送は近年普及がめざましいデジタル通信を無人化施工に適用するに当たって、ネットワーク上に流れる画像データ量を少なくしつつ、画像

の遅れを少なく、かつできるだけ鮮明な画像をオペレータに提供することを目的として、最適なソフトウェアを開発していこうとするものです。

土木研究所では政府・民間を問わず、このような研究活動や建設ロボットの適用方法についての技術相談や連携に当たっています。

## 6. おわりに

近年は自動車のエンジン制御にもLSIが使用されるのが当たり前になっているように、建設機械にもさまざまな電子機器が装備されるようになり、ある意味では通常の建設機械自体がロボットであるといっても過言ではありません。土木研究所で取り組んだ自律制御型ロボットもまたその一つの分野であり、無人化施工もその一つです。

その意味ではわれわれ建設分野でロボットに携わる者はロボットを研究しようとしてきたのではなく、現場が必要とするモノを提供していく努力をしてきた機械屋にすぎないのかもしれませんが。

しかしながら、最近、学識経験者らからこれほどの実践的なロボット技術活用はほかに例があまりないという声を聞きます。また、それが活用できる体制を継続的に維持していることに対して驚嘆の声も聞きます。本当に喜ばしいことです。

国内の災害復旧工事があまりない時期、多くの無人化施工関係者の熱意が冷め始めていました。しかし、「コトが起こったとき、最後の手段として無人化施工が求められる時期が来る」という危機感の下で関係者がその継承に努力し、ここ数年の国家的な危機を乗り越えることができました。当時の関係者の努力に謝意を表します。

最後に、土木研究所では長期的な視野の下での研究開発とあわせて、今後ともこのようなロボット技術の継承にも関わっていきたいと考えています。