

建設機械の自動化を核とした土木施工システムの変革

Innovation of Construction System Using the Automated Construction Machines as a Core Technology

三 浦 悟

要 約

建設業界における喫緊の問題である「人手不足・熟練者不足」、「低い建設生産性」、「労働災害や事故の多さ、災害・危険地域での工事増加」の解決を目的として自動化建設機械を用いた土木施工システムの研究開発を進めている。

本報では、タブレット端末から作業指示を出すだけで複数の建設機械が同時に自動運転を行うことで安全性、生産性の向上を狙いとして開発した自律型自動建設機械を適用したダム工事での実施状況、及び危険地域での作業を自動化した事例として放射線環境下での作業員の被ばく抑制と劣悪環境下での操作ミスの低減のための自律搬送システムを報告する。その上で、これらの適用結果を踏まえて、また、製造業で大きな成果を収めている生産システムを参考に、自動化技術を核とした土木施工システムについての成功要件、研究開発の方向性を考察する。

目 次

- I. はじめに
- II. ダム工事に適用した自律型自動建設機械
- III. 放射線環境下における建設機械の自律型自動運転システム
- IV. 自動化建設機械を核とした次世代施工システムの将来展望
- V. おわりに

I. はじめに

我が国の建設産業界における重大問題として、「人手不足・熟練者不足」、「低い建設生産性」、「労働災害や事故の多さ、災害・危険地域での工事増加」が挙げられている。

一般社団法人日本建設業連合会（日建連）から毎年刊行されている「建設業ハンドブック 2014年」¹⁾によると、1997年の685万人をピークに建設業就業者数は減り続け、2011年には497万人と1997年の72%となっている。14年間で188万人減少しており、単純には年間13.4万人減っている計算となる。また、一般財団法人建設経済研究所の「建設業就業者数の将来推計 2014年」²⁾における建設業就業者の年齢層分布では、1996年ではともに22～23%であった高齢者（55歳以上）と若年層（29歳以下）割合が2012年時点ではそれぞれ33.6%と11.1%となっており、ほかの産業と比べて著しく高齢化が進んでいる。これは経験を積むことによって育まれてきた熟練労働者が、今後確実に大きく不足することを示唆している。

生産性の低さに関しては、1990年代に製造業などの生産性がほぼ一貫して上昇したのとは対照的に、建設業の生産性は大幅に低下し、2012年の時点では製造業の47.6%、全産業の平均の60.4%に留ま

っている状況が前出の「建設業ハンドブック 2014年」で報告されている。

労働災害については、建設業労働災害防止協会から出される労働災害統計³⁾によれば、我が国の死亡災害は、全体的に減少しているものの建設業での死亡災害数は依然全産業における1/3を占めている。その内訳は、例年墜落事故が最も多く、建設機械・クレーンに関する事故がそれに続いている。また、東日本大震災直後の復旧工事をはじめ、最近多発している火山噴火や、台風、集中豪雨によって風水害や土砂災害の発生に対する災害地域での復旧工事が増加している。これらの工事では当然危険性の高い作業が多くなっているが、特に、東日本大震災時に発災した福島第一原子力発電所事故に伴う発電所構内での建屋解体工事やがれき撤去工事、発電所周辺の広範囲にわたって実施されている除染事業など、いわゆる放射線環境下での建設作業に多くの作業員が継続的に従事している。今後、これらの作業が長期間に及ぶことを考えれば、被曝抑制を主とした作業員の安全対策が最も重要な課題となることは明白である。

これらへの対応策として、建設機械の自動化を核とした施工システムの研究開発を進めている。本報では、自律型自動建設機械を適用したダム工事での実施状況、及び危険地域での作業を自動化した事例として放射線環境下での自動運転システムの適用についてその概要を紹介するとともに、これらの自動化技術を核とした土木施工システムについての将来を展望し、研究開発の方向性を考察する。

II. ダム工事に適用した自律型自動建設機械

重機土工にICTを活用した、いわゆる情報化施工システムの導入

キーワード: 自動建設機械、建設ロボット、自律制御、振動ローラ、ブルドーザ、クローラダンプ、フォークリフト、コンクリートダム、がれき搬送、放射線、レーザスキャナ、SLAM、産業用ロボット、CIM

Keywords: automatic construction machine, construction robot, autonomous control, vibration roller, bulldozer, crawler dump, forklift, concrete dam, debris transfer system, radioactive area, laser scanner, SLAM, industrial robot, CIM

が進められている。建設機械に係る代表的な例としては、GPSによって測定された建設機械の位置での設計データを照合して、例えば、ブルドーザであれば排土板の高さを自動制御することによって、熟練技能を持たないオペレータでも精度良く仕上げることを可能とする「3D-MC」と呼ばれる施工技術や、振動ローラの走行軌跡から転圧作業の品質を評価する「盛土締固め管理システム」のような管理技術などによる効率化、合理化報告がなされている。これらの技術をベースとして、前章で挙げた就業人員・熟練作業員の減少、現場安全性の向上などに対してより一層貢献できる技術として、現状と同等以上の施工効率を極力少ない人数で達成することを目標に建設機械の自動化の研究開発と実工事への導入を推進している。

今般、その第一段階として、振動ローラとブルドーザを対象に自動化装置や計測制御装置を後付けして、自動転圧システムと自動まき出しシステムを開発した。以下に、開発したシステムの概要と、本システムをRCDダム現場ほかで試適用した結果を示す。

1. 自動転圧システム⁴⁾

(1) 開発の概要

転圧作業の自動化施工システムを実現する第一歩として、まず、汎用振動ローラの自動化を行った。自動化の方法は、計測機器や自動化装置を汎用の振動ローラに後付けするとともに、計測制御用のPCを搭載し、計測データを基に制御指令を出力することによって動作させることが可能な自動振動ローラに改造した。

施工範囲や作業仕様などは作業指揮者が携帯するタブレットPC上で作成する。この作業指示情報を無線送信すると、自動振動ローラ上の計測制御用のPCによって走行経路を自動設定し、転圧作業を開始する。以降、安全確認を行いながら所定の指示内容を完了するまで自動で作業を行うことができるシステムとなっている。

本システムの現場導入に際しては、これまで人が運転しない機械を一般の工事現場に導入した事例が皆無であったため、特に、安全対策に十分留意した。例えば、自動走行中は常時前後の路盤形状を計測して、一定の値以上の凹凸形状に対しては障害物と認識して停止し、障害物が取り外されると運転再開するなど、人やほかの建設機械が錯綜する施工実態に適した機能なども付加した自動運転システムとなっている。

また、作業効率の向上を目的に一人の作業指揮者によって複数機械を同時並行作業させることができるよう一台のタブレットPCから複数台の振動ローラに作業指令を出すことを可能としている。



Photo 1 振動ローラ (Vibration Roller)

(2) 自動化装置

汎用の振動ローラに設置し自動化する各種装置について、Photo1に示す11t振動ローラ(酒井重工製SD451)を用いて説明する。

a.後付自動化装置

既存の振動ローラを自動化するために後付自動化装置を設置した。既設のハンドルにモータ駆動の操舵用装置を設置し、これによって操舵を制御できるようにした。また、前・後進の切り替えや起振の入り切りは既設の電子回路にスイッチング回路を接続して制御している (Fig.1)。

b.計測センサ

振動ローラに各種センサを搭載した (Fig.2)。

- ・車体位置計測：RTK-GPS
- ・車体方位計測：GPS方位計
- ・車体の傾き(ロール、ピッチ角)計測：ジャイロ
- ・アーティキュレート角(前輪ローラとキャビンの相対角)

c.作業指示インターフェース

作業指示画面を Fig.3 に示す。施工範囲や転圧回数、ラップ幅、繰り返し長さなどの詳細な作業内容の指示がタブレットPCのタッチパネルで簡単に行うことができる。



Fig.1 後付け自動制御装置 (Post-installation Type Automatic Device)

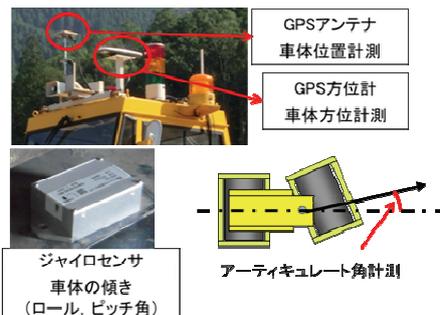


Fig.2 計測センサ類 (Measurement Sensors)

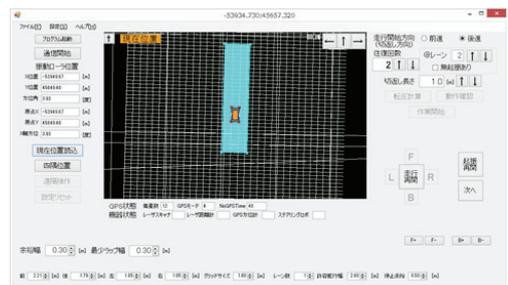


Fig.3 作業指示画面の例 (Example of the Work Instructions on the PC Screen)



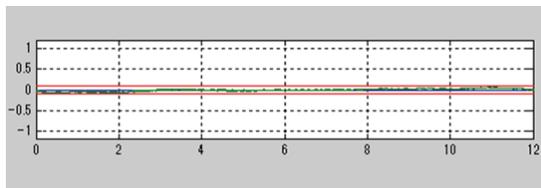
Photo 2 同時施工の状況
(Situation of Simultaneous Construction)

(3) RCD ダム施工での実適用

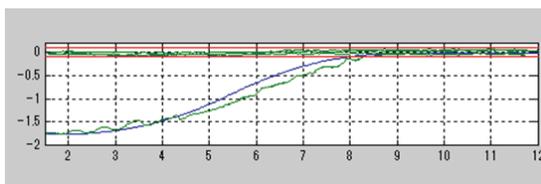
本システムを福岡県・五ヶ山ダム堤体工事の RCD コンクリート転圧作業に適用し、実用性を検証した。

まず、実施工において一人の作業指揮者で2台の自動化振動ローラを稼働させることができ (Photo 2), 少ない人員で多くの建設機械をコントロールする可能性を確認した。

また、転圧時の機械の走行精度を尺度として、自動施工の品質評価を行った、転圧走行時の軌跡を Fig.4 に示す。直進走行では直線 $y = 0$ を目標として転圧し、切返し走行では青線を目標軌道として走行後、直線 $y = 0$ を目標として転圧を開始する。赤線は直線 $y = 0$ に対する $\pm 10\text{cm}$ の誤差領域を示しており、どちらの図も転圧時の誤差が $\pm 10\text{cm}$ 内に収まっていることが分かる。



(a)直進走行時の軌跡



(b)レーンチェンジ時の軌跡

Fig.4 自動転圧時の走行軌跡
(Running Path of Automatic Roller Compaction)

2. ブルドーザ自動まき出しシステム⁵⁾

(1) 開発の概要

振動ローラと同様、自動化施工システムの前提となる自動ブルドーザの開発を進めた。Photo 3 に示すコマツ製ブルドーザ D61-PXi (機械質量:18.9t 全長:5.5m 全幅:3.9m 高さ:3.2m) に各種センサや自動化装置を後付けし自動化した。なお、ブルドーザは振動ローラと異なり、掘削、押土、まき出しなど、多くの作業に用いられるが、本開発では第一段階として、ダム工事、大規模土工事で作業量の多いまき出し作業を自動化の対象とした。

なお、本件は(株)小松製作所との共同研究で実施している。

具体的には、事前に検討して設定したいいくつかの作業パターンから、作業条件に応じて決定される走行経路や排土板動作計画に追従するようにブルドーザの走行や排土板操作を自動制御する機能を有しており、これによって、土砂まき出し作業を全自動で行うことを可能としている。



Photo 3 ブルドーザ
(Bulldozer)

(2) 自動化システム

a.後付け自動化装置

後付け自動化装置としてブルドーザに搭載するのは、後述する計測センサなどからの信号を基に専用インターフェースを介してブルドーザ内部のコントローラと通信する計測制御用 PC で、これによって車体の走行や操舵、排土板操作を制御する。計測制御用 PC からブルドーザへ制御指令を送信すると同時に、ブルドーザの走行速度や各種レバー操作量、排土板操作量などの機体情報を取得することもできるようにして、本システムにおける制御則の基本形として活用している熟練オペレータの操縦データを記録することや、それらのデータを基に同じ動作を再現することなどにも使用している。

b.計測センサ

ブルドーザに次の量を計測するため各種センサを搭載した。

- ・車体位置計測：RTK-GPS
- ・車体方位計測：GPS 方位計
- ・車体の傾き（ロール、ピッチ角）計測：ジャイロ

c.走行制御アルゴリズム

ここでは走行制御則の例としてブルドーザ走行時の設定経路への追従時の手順を示す。経路追従アルゴリズムは Fig.5 に示すように、自己位置と目標経路との相対関係を基に所定距離 L_1 前方で目標経路に到達するように目標方位を定め、経路からの誤差 d や目標方位からの誤差 θ により操舵量を演算し目標経路に追従させる方法を取っている。これは、ブルドーザに急激な方向転換をさせないため、履帯で路面を荒らすことなくスムーズに目標経路に寄り付き、追従させるためである。自動走行中の走行速度、排土板操作量などを詳細に設定できるため、作業に合わせた複雑な動作を実現している。

実機を用いた目標経路への追従精度評価実験の結果例を Fig.6 に示す。 $\pm 10\text{cm}$ 程度の誤差で追従できることを確認した。

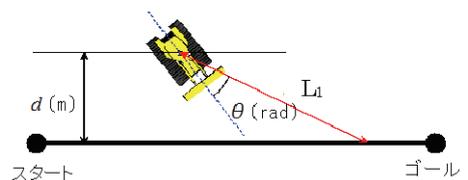


Fig.5 経路追従アルゴリズムの概要
(Concept of the Algorithm of Tracking Route)

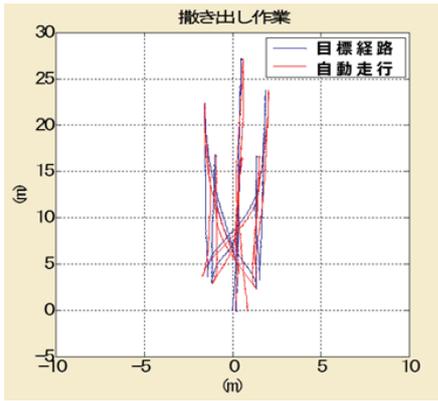


Fig.6 経路追従性能
(Performance of Tracking Route)

(3) 造成工事での試験施工

本システムの性能確認のため、実際の造成工事において試験施工を行った。ダンプトラックにより荷下ろしされた約 20 m³(直径 5m, 高さ 3m) の土砂を対象に、設定した作業経路、排土板動作でまき出しを行った。その結果、所定の仕様(幅 8m, 厚さ 30cm)を確保しながら全自動でまき出し作業を行うことができた (Fig.7)。

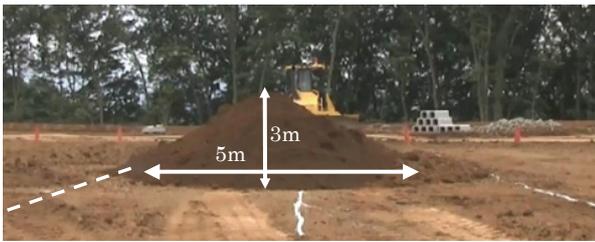


Fig.7 造成工事での自動まき出し結果の例
(Result of Automatic Spreading in Earth Work)

(4) RCD ダム堤体工事での試験適用

RCD ダム施工現場に本システムを試験導入し、実用性を検証した。福岡県・五ヶ山ダム堤体工事において Photo 4 に示すように、RCD コンクリートのまき出し及び整形作業の自動化性能を評価した。Fig.8 は自動まき出し・整形作業時のブルドーザの目標経路に対する実走行経路の差の例を示している。図では目標経路は青線、走行軌跡は赤線である。図中ピンクの範囲はマウンド整形のために排土板の上下高さ、及び左右角度を制御している状況時を示している。これを見ると、マウンド整形時以外の場所では、荷降ろされたコンクリートを乗り越えるなど、不陸の大きな箇所を通過する際には目標と実走行の経路に差が生じているが、整形作業時にはほぼ±10cm程度の誤差で追従させることができていた。この結果、Photo 5 に示すように矩形のマウンド整形が施工上十分な精度を持って実施で



Photo 4 RCD ダム工事での自動運転状況
(Situation of Automatic Operation in Dam Construction)

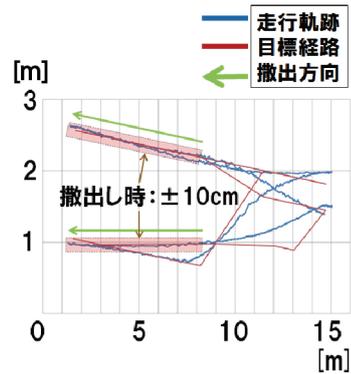


Fig.8 経路追従性能結果例
(Sample of Tracking Route Performance)



Photo 5 RCD コンクリート自動まき出し・整形状況
(Situation of Automatic Spreading and Fixing)

きることを検証した。

Ⅲ. 放射線環境下における建設機械の自律型自動運転システム⁶⁾

1. 開発の背景

東京電力福島第一原子力発電所の原子炉建屋解体・がれき撤去工事で発生する高線量ががれきの構内保管施設への搬送作業は、遠隔操作型や放射線遮蔽型の建設機械を導入することで、搬送作業時の被ばく線量低減が行われてきた。しかし、より放射線量の高いがれきの発生が予想され、一層の被ばく量の抑制、操作ミスの低減、作業効率の向上が更なる課題となった。これに対して、従来の遠隔操作ではなく、使用する建設機械の自動化によって、人手を省き、安全で安定した作業効率を実現して、搬送作業に伴う諸課題を一気に解決することを検討した。その結果、知能型移動ロボットなどで利用

されている走行経路の自動認識、障害物の自動検知などの計測・制御技術を応用した自律型自動運転システムを開発し、実作業へ投入した。

2. システムの概要

開発・導入したシステムは、福島第一原子力発電所の原子炉建屋解体時に発生する高線量がれき(鉄筋コンクリートガラおよび鉄骨)を収納した鋼製コンテナ(2000×2000×1500mm)を解体箇所から構内保管施設のコンテナ貯蔵場所までの積込・搬送・荷降ろし作業のうち、コンテナ積込、積み降ろし以外の搬送作業を、人手を介さないで完全に自動で行うものである。作業用の建設機械に搭載したセンサーやコンピュータによって、自己位置・姿勢計測、走行路確認、障害物検知などの走行に関わる情報を取得するとともに、その情報を基に自律的に判断し、発進・停止、方向変換、速度調整などを行い、自動走行するものである。今回自動化した具体的作業は次の2つである。(Fig.9)

a. クローラダンプによる屋外での搬送作業(原子炉建屋～構内保管施設の約1km)

b. フォークリフトによる構内保管施設での搬送作業(地上～地下倉庫内の約800m)

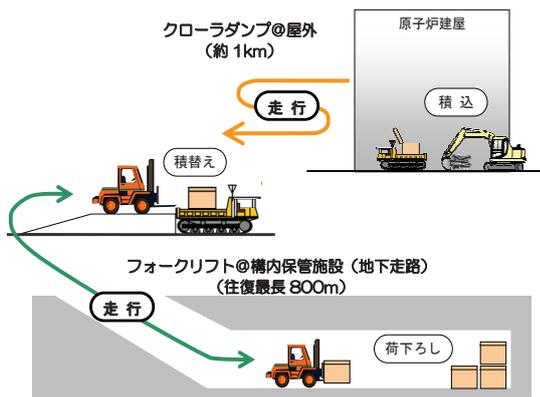


Fig.9 自律型自動運転システムの概要
(Outline of Autonomous Type Automatic Operation System)

(1) クローラダンプ自律型自動運転システムの特徴

a. 導入目的

従来の屋外搬送は、Fig.10の配置で、オペレータが先導車の後部に遠隔操作型クローラダンプ(車両重量16.4t, 最大積載荷重11t, 車両全長6.0m, 車両全幅3.5m)と対面するように後ろ向きに搭乗し、遠隔操作によって運転していた。作業中の被ばく線量を抑えるために、クローラダンプからできるだけ離れた位置から操作するのだが、狭い場所では機体の周囲状況などを目視で確認するため、クローラダンプに近づいて操作しなければならない状況も頻繁に発生していた。そこで、被ばく線量低減のために一定以上の距離を常に保つとともに、作業効率の向上、オペレータによる誤操作防止を目的として、従来から使用していたクローラダンプを改造した自律型自動運転システムの開発を行った。

b. システム概要

Fig.11に改造の対象である遠隔操縦型11tクローラダンプを示す。予め設定する目標経路に沿って自律的に走行、停止をさせるために

必要な各種センサーや制御機器、通信機器を既存機体に取り付け、現地に改造を行った。クローラダンプへの走行指示や車載カメラ映像の確認は、先導車から無線通信を介して行う。先導車では目標経路に対するクローラダンプの位置や方位、及び障害物の検出状況をリアルタイムでPC画面に表示しており、車載カメラ映像と合わせて、オペレータは状況を確認し安全性を確保することができる(Fig.12)。本システムにより走行状況の目視確認が不要となり、従来は30m弱だった離隔距離を100m程度まで離すことで被ばく線量を1/10～1/100と大幅に低減させることが可能となった。



Fig.10 従来のクローラダンプによる搬送作業
(Conventional Transportation Work Using Crawler Dump)



Fig.11 クローラダンプ外観
(Appearance of the Crawler Dump)



Fig.12 先導車内の自動運転確認状況
(Monitoring System of Automatic Operation in Leading Vehicle)

(2) フォークリフト自律型自動運転システムの特徴

a. 導入目的

フォークリフトの走行路である構内保管施設は地下にありGPSが機能しないため、レーザースキャナを用いて自己位置姿勢検出・障

害物検知を実現した技術が大きな特徴と言える。類似技術に製造工場などの自動搬送システム (AGV) があるが、これは信号線などを床に敷設 (埋設) する電磁誘導方式などの走行ガイドを事前に設置する必要があり、また、走行路の変更の度に工事が必要であること、定期的なメンテナンスも必要であることなどの問題も多く、採用できなかった。本システムで導入した技術は、事前工事が不要で走行路の変更や作業内容の修正・調整もソフトの変更だけで行える。この情報を基に、倉庫内での複雑な経路に沿って安定した走行を可能とするフォークリフト自動運転が実現した。

b. システム概要と特徴

本システムで使用する自動搬送機械は、Photo 6 に示す汎用フォークリフト (車両重量 16.4t, 定格荷重 8.5t, 車両全長 6.3m, 車両全幅 2.4m, 最少旋回半径 4.1m) をベースマシンとして、これに、車体位置と姿勢計測、障害物検出のための各種計測機器・センサと、標準的に装備されている車両状態モニタ用計器類、それらからのデータを収集し、操舵や速度調整等の車両制御を行う自律制御 PC、及び通信機器を追加搭載することで自律搬送が可能な機械に改良している点に大きな特徴を有している。システムの概要を Fig.13 に示す。フォークリフトの自動運転の監視・指令は、Photo 7 に示すように、放射線量の低い場所から行っている。

本システムにおいて最重要となる経路データ上での車両位置・姿勢の計測技術には、建設分野では適用例がない新しい技術を採用し



Photo 6 フォークリフト全景 (Whole View of Fork Lift)

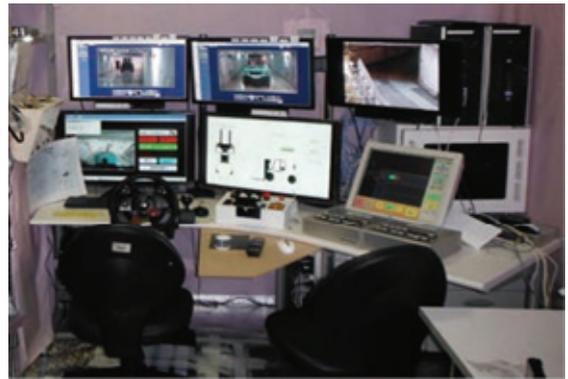


Photo 7 遠隔監視・指令室 (Remote Monitoring and Instruction Room)



Fig.14 走行状況と位置・姿勢推定結果 (Result of Position & Posture Measurement at Automatic Running)

ている。それは、GPS が適用できない屋内での計測に際し、知能ロボット分野で移動ロボットの自動経路探索に用いられているレーザスキャナデータを基に地図データ上の位置姿勢を同定する SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) 技術であり、これを制御システムに組み込んだことよって、施設内におけるフォークリフトの位置、姿勢角を推定することが可能となった。具体的には、レーザスキャナを機体の前後左右の 4 か所に配置し、それらの計測結果から位置・姿勢角計測を行っている。

Fig.14 は施設内通路を走行している状況とその時にレーザスキャナデータから推定した位置・姿勢角計測結果を描いた CG である。灰色の濃淡は施設の床と壁を表し、青色領域はレーザスキャナで計測された形状である。事前に施設の床と壁を地図化して与え、SLAM で得られた位置・姿勢角を基に機体を描いているが、推定データと施設内の壁の位置が一致しており、相対位置・姿勢角を正しく推定していることが分かる。

(3) 導入効果

本システムの主たる導入理由は、①作業員の被ばく線量の低減②絶えず緊張を強いられる環境下での遠隔操作時の操作ミスの低減であり、作業員の安全性向上、工事故の低減を目的として導入したものである。このシステムによって、クローラダンプでの作業では作業車両との離隔距離が大きく取れるため被ばく量は 1/10~1/100 に低減できた。また、クローラダンプ、フォークリフトの作業ともに、他機械や設備への衝突事故や走行路から逸脱事象無く、導入から 3 年以上経過した現在も順調に稼働し続けている。また、開発した 2 つの自動化システムは、従来の自動化・ロボットシステムによ

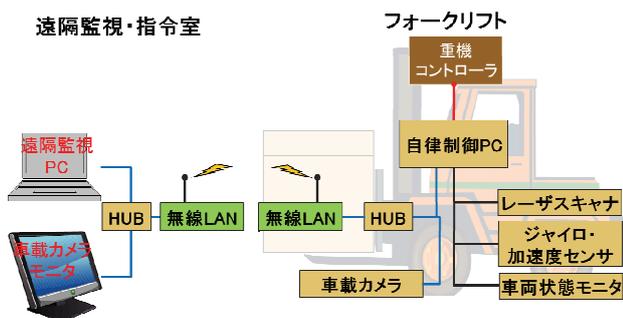


Fig.13 自動運転システム概要 (Outline of Automatic Operation System for Fork Lift)

うに特殊な専用自動機械を導入したのではなく、汎用機械に計測・制御技術を付加することによって、人の行う操作の自動化を達成しているのが経済性の面でも大きなメリットがあった。

IV. 自動化建設機械を核とした次世代施工システムの将来展望

I章で掲げた業界の重要課題の対策として開発した、自動化建設機械による施工システムの実工事への導入事例をII, III章で報告した。

まず、労働災害・事故の抑制に対しては、以前から3K作業の代表にあげられることが多い建設作業の重要問題として検討され、1980年代後半に始まった『建設ロボット』の導入目的として真っ先に取り上げられ、繰返し挑戦されてきた。30年以上が経過しても、まだその目的は達成されたとは言い難い状況にあるが、III章で述べた災害・危険地域での作業の自動化に見られるように、作業に係る人を減らすことによって労働災害の発生確率が下がる可能性が大きいことが想定される。このような状況は一般の土木工事においても同様のことが言えるため、自動化技術の導入が労働災害・事故に対する有効な解決策であると考えられる。

人手不足・熟練者不足への対策としては、まずは、少人数でも現状と同様な施工を実施可能とする施工・作業システムが有効であると考えことができる。II章の事例に示したように、ここにも自動化技術が期待できるが、視点を変えれば、自動化によって施工生産性が向上した結果として、作業に係る人員数を減らせたという解釈もできる。国土省の平成27年度官民による重点的な取組事項でも、『建設業における担い手の確保・育成と生産性向上』が取り上げられ、人材を確保することを最重要課題としつつ、生産性向上を推進することが社会資本の効果的な整備を図るために不可欠としている。

具体的には、施工における新技術・新工法の活用として、情報化施工、プレキャスト化の推進が示され、生産システム全体においてはCIM (Construction Information Modeling)の推進が掲げられている(以下このCIMを「土木CIM」とする)。

(1) 2つのCIM

土木CIMは、計画・調査・設計段階から3次元モデルを導入し、その後の施工、維持管理の各段階においても3次元モデルに連携・発展させ、あわせて事業全体にわたる関係者間で情報を共有することにより、一連の建設生産システムの効率化・高度化を図ろうという概念で、最近では、単なるモデル化だけでなく、こうした技術を用いたマネジメント (Construction Information Management) としての意味もあると言われている。

土木CIMの構成要素の主役は3次元CADである。これを利用して計画・設計段階では、構造解析や応力解析、振動解析などの数値解析、コンピュータシミュレーションによって事前に計画や設計の評価を行う。そうしてできた3次元データに基づいて施工を行い、完成後の維持管理にも適用するという、土木事業における生産システムの変革と位置付けられている。

一方、高い生産性の代表として建設業が比較されることが多い製造業でもCIM (Computer Integrated Manufacturing) というコンピュータ統合生産管理システムが1980年代から導入されている(以下このCIMを「製造CIM」とする)。当時、製造業ではそれまでの大量生産形態から多品種少量生産に移行することが検討されており、その際に生ずる生産効率の低下を抑えるためにこのシステムが生ま

れた。

製品の品種・数量の需要変動にも柔軟に対応する生産体制として設計、生産計画、資材調達、製造、研究開発や物流・販売といった一連の企業活動をネットワーク化し、効率的で柔軟性に富んだ生産体制を構築することを目的に導入された概念である。当初は、製造部門と販売部門の間での情報を共有化し、モノを作ってから売るまでの効率化を図ることを目的としていたが、この考え方がさらに進化した、間接部門全体の連携を視野に入れたシステムによる企業活動の効率化が唱えられている。すなわち、製造のさらに上流側にあたる調達、開発、さらに流通も含め、企業活動の全業務プロセスを管理ならびに情報の共有化による各部門間の連携を行うようなシステムに変化しつつある。製造CIMの中核をなす具体的な機能は、初期設計段階から3次元製品モデルを構築し、PM (Product Model) を中核とした設計と生産の統合管理を実現することによって、設計・生産計画の最適化をもたらすような「意志決定の支援システム」作りであるとされている。このため、土木CIMと同様にマネジメントシステム (Computer Integrated Management) としてとらえることも多い。製造CIMを構成する主たる技術要素は、CAE (Computer Aided Engineering), CAD (Computer Aided Design), CAM (Computer Aided Manufacturing) である。

土木CIMと同じくここでもCADは基本技術であるが、製造業では3次元CADの利用は1970年代から始まっている。

CAEとはコンピュータ支援設計と訳され、コンピュータを使って設計問題を評価する技術を指す。設計問題とは、構造的な問題、外力に対する強度や耐久性の問題などで、簡単に言えば、「設計した製品を実際に作る前段階で、有限要素法、有限差分法、境界要素法などの手法を用いコンピュータ上で製品が壊れるのかどうかのシミュレーション技術を指している。土木構造物の計画・設計段階における解析、シミュレーションも同じ目的で、同種の技術・手法によって行われている。

すなわち、2つのCIMは、概念、目的だけではなく、構成する主要技術も非常に似通っている。そして、今日の成功を収めている製造業の多くが様々な工夫や試練を経て製造CIMの考え方を導入し、成功していることから、これを手本として不十分な点を補うことが短期間に土木CIMの目的に到達する一つの方法であると考えられる。

(2) CAMと土木施工への応用

CAD, CAEなど共通点が多い中で、製造業との大きな違いは、製造段階一施工段階にある。製造業CIMにおいてCADの次段階として位置づけられているCAMは、コンピュータ支援製造と訳され、製品の製造を行うためにCADで作成された形状データを入力データとして、機器の動作プログラム作成などに変換し、工作機械に送られて実際の加工を行う仕組みである。昨今話題となっている3次元プリンタなどによる加工はCAMの代表例といえる。CADからの設計データをそのまま製造に生かすのがCAMであり、その方法として例えばFA (Factory Automation) がある。FAとは、工場における生産工程の自動化を図るシステムのことで、従来、人間によって行われていた作業を自動化することを意味する。産業用ロボットを多用して、従来人間によって行われていた作業を自動化し、作業ミスの削減、作業効率、人間に対する安全性の向上を図っている。



Fig.15 自動施工システム(A⁴CSEL)のコンセプト
(Concept of Automatic Construction System- A⁴CSEL)

もちろん、人手でなければできない作業は残るが、産業用ロボットとプロセスを制御して人が介在する必要性を低減させ、すなわち少数の人数で多くの生産を達成することに成功している。

実際、I章で挙げた建設業界における重要問題は、主として「施工、作業」の段階で発生している。その段階における対策として、前述したように情報化施工やプレキャスト化推進が掲げられているが、省人化の限界やコストの問題などによって、問題の解消の決め手には至っていないのが実状である。このため、人手不足・熟練者不足への対応、安全性・生産性向上という同種の問題に対して成功を収めてきたCAMの仕組みを土木施工への応用に検討することは大いに意義があると考えられる。

製造フェーズのキーワードを抽出すると、「少人数で」「産業ロボットで」「多くの仕事を精度良く行う」と捉えられる。このコンセプトを土木施工に展開して、Fig.15の自動化施工システムA⁴CSEL(クラウドアクセラ: Automated/Autonomous/Advanced/Accelerated Construction System for Safety, Efficiency, and Liability)にまとめた。A⁴CSELは、自動化した汎用建設機械をできる限り少ない人員で運転させて、安全に効率良く作業を行うことを目標とするシステムである。A⁴CSELでは、前述したFAにおける産業用ロボットの位置づけ、導入時の基本的な考え方と同じく、人で行っていることをすべて機械に自動で行わせようとするのではなく、作業を分析して真に熟練の技が必要なものだけを人に担当してもらい、それ以外は自動機械に分担させるという考え方を取り入れている。II章で紹介したダム工事に適用した自律型自動建設機械による施工システムはこのコンセプトを具現化した初めての試みである。

(3) 自動化施工システムの成否のポイント

製造業における産業用ロボットの導入のポイントとして、経済産業省「平成22年度中小企業支援調査委託費(ロボット技術導入事例調査)」⁷⁾で挙げられている事項のうち土木作業・施工にも参考となると考えられる項目を以下に示す。

① ロボット導入による費用対効果を多面的に検討する。

省人化と生産性向上のみならず、費用面では省資源・省エネ化、省スキル化といった観点、効果面では高付加価値化、品質安定・向上、作業環境改善といった観点も含めて検討すること。

② 工程を再設計することで、ロボット導入効果を高める。

- ・ロボットの導入効果を最大化するためには、人手作業を単純に置き換えるだけではなく、周辺装置や前後工程、生産計画、人員配置など、工程を再設計すること。
- ・ロボットが効果を発揮するような工程設計を行うこと。
- ・作業分析やシミュレーションによりロボット動作に無駄のない最適なライン構成を確立すること。
- ・100点の出来でなくとも作業者がシステムにあわせることで実用に供すること。
- ・ロボット導入に際し、物資運搬の動線を再配置すること。

③ 全体設計・システム化に長けたシステムインテグレータの活用。

システムインテグレート(System Integrate)とは、システム化する業務の内容を分析し、システム設計からプログラムの開発、必要なハードウェア・ソフトウェアの選定・導入、完成したシステムの保守・管理までを総合的に行うことであり、作業プロセスにもロボット自体にも精通しているシステムインテグレータ(System Integrator: SIer)と連携して進めることが重要である。上記事項をブレイクし、自動化建設機械を核とした新しい施工システムの成否を握るポイントを以下にまとめる。

- a. 導入の評価検討: 省力化、生産性向上とともに、品質安定・向上～検査業務の効率化、安全性向上、就業時間の短縮など多面的に評価項目を検討できるか否か。
- b. 生産工程、作業分析、作業手順の再検討: 自動化する作業の抽出とともに自動化できる作業を増やす。熟練作業を減らす努力、部材のPC化や形状の単純化、大型化の導入を含めて、これまでのやり方を抜本的に見直し、生産システム化できるか否か。
- c. 自動化機械の使い手との連携、使い手の育成: 施工、作業と自動機械、制御技術に精通した技術者を育成できるか否か。

(4) 今後の研究開発の方向とゼネコンの役割

前項までの検討から、次世代施工システムの推進に必要な技術開発において重要となる項目を考えると、

① 自動化建設機械の開発

システムの前提となる自動で動作する建設機械—専用機ではなく産業用ロボットのような汎用的な自動建設機械を開発する。

② 自動化施工のための施工計画、作業計画技術の開発

レイアウト分析、作業分析、動作分析などの IE (Industrial Engineering) 手法や、施工～作業シミュレーションなど解析技術の導入。特に、『施工現場の工場化』という観点での作業の定量化、モデル化、見える化を実現するための研究開発が必要である。

③ 機械装置の改善、高度化・知能化

作業手順、施工状況に応じた計測・認識・評価技術の開発や自律制御技術の継続的な研究開発が重要となる。

などであると考えられる。

①は製造 CIM を成功に導いた産業ロボットに相当する機械の開発できわめて重要な要素である。これまで汎用機械の自動化がなされてこなかった状況では、Ⅱ、Ⅲ章で示したような開発活動が今後必要であると考ええる。まずは、実施して成果を上げることが次のステップ（新しい機械の開発、ほかの工種への展開など）に進むためには重要である。その後は、無人化施工や情報化施工などのこれまでの施工システムの進展経緯を考えれば、建機メーカーや周辺機器メーカーの技術力、開発力によって進められていくことができるだろう。

②は、施工のやり方に直接関係する事項であり、自動機械と施工・作業をつなぐ技術、すなわち、産業用ロボットの導入で言えばインテグレートする技術で、最も重要な開発項目であると考えている。これに関しては、製造業が産業用ロボットを適用しつつもその使い方は独自に培ってきたのと同様、原則的には施工に係る各社が独自に構築していくべき技術・システムであると考ええる。しかし、過去の施工の自動化技術の開発が、ほとんどが一部の作業の自動化あるいは機械化で、施工全体に波及するようなものではなかったのに対し、これまでの施工方法、作業手順などを抜本的に見直すことが要求されるため、個々の現場で対応できるレベルではない。施工要領や作業標準の見直しも必要になるため、施工会社だけでは検討しきれない。一方、極端に言えば、一つ一つの作業自体を対象にすることになるため、官主導で活動しにくいという面もある。このため、施工担当会社である元請会社と協力会社のコラボレーションとともに、発注者からの参加が必須となる。そして、ここで重要なのが施工・作業と自動化システムとをつなぐ、すなわちインテグレートすることである。そして、このシステムインテグレータの役割を担うべきはゼネコンであると考ええる。このような観点からの議論はこれまで土木においてはほとんどなされてこなかったと思うが、業界全体の重大課題への対応には必須であると考ええる。

③に関しては、1970年代初頭に産業用ロボットの導入が始まった当時、非常に高価の割に性能が十分でなく、単純作業しか実現できなかった。が、その後さまざまな技術開発によって、知能化が進められ、今では複数の産業ロボットの同期協調運転や双腕知能ロボッ

トなどの多機能な製品が低コストで市販され、世界で130万台も稼働している状況となっている⁸⁾。このように約40年間で産業用ロボットが大きく進歩して今日の製造業の高い生産性を築いてきたように、建設分野も同様に努力していかなければならない。しかし、逆に考えれば、これまでに生まれたICTやRT (Robot Technology) の優れた技術をどんどん取り入れることで、比較的短期間に機器・装置の性能を向上させることが期待できる。そして、近い将来、自動化システムが土木施工の必需品として実用に供することに繋がると考える。

V. おわりに

建設業界における重要課題の解決策としてCIM (Construction Information Modeling) に大きな期待が寄せられている。本報では、このCIMと同様の思想、価値観を持ち、およそ35年前に製造業がそれまでの少品種大量生産によって効率を上げていた生産体制から、消費者のニーズに合わせた多品種少量生産形態へと変貌を遂げるために導入し、成功を収めている製造業におけるCIM (Computer Integrated Manufacturing) を参考にしながら、特に、製造業の製造工程とその生産性で大きく遅れていると言われる現場施工や作業にスポットを当て、今後の方向性を考察した。

ゼネコンだけで進められることは限られているため、発注者やコンサルタント、協力会社とのコラボレーションが必要となるが、この分野の研究開発の鍵となるいくつかの検討すべき課題、項目は抽出できたと思う。これを進めることが、土木の生産活動の大きな部分を占める施工段階の次世代への変革、業界の問題解決につながると思えるものである。

参考文献

- 1) 一般社団法人日本建設業連合会；建設業ハンドブック，2014.
- 2) 一般財団法人建設経済研究所；建設業就業者数の将来推計，2014.
- 3) 建設業労働災害防止協会；労働災害統計，2014.
- 4) 浜本研一ほか；振動ローラの自動転圧システムの開発 — RCDダム施工での試験，土木学会第70回年次学術講演会，VI-050，2015.
- 5) 黒沼 出ほか；ブルドーザの自動撤出しシステムの開発，土木学会第70回年次学術講演会，VI-051，2015.
- 6) 三浦悟，日比康生；放射線環境下における搬送作業の自動化，土木施工，Vol. 54, No.1, 2013, pp.52-55.
- 7) ロボット技術導入事例集；平成22年度中小企業支援調査，2013.
- 8) 楠田 喜宏；産業用ロボット技術発展の系統化調査，技術の系統化調査報告第4集，国立科学博物館編，2004.

Innovation of Construction System Using the Automated Construction Machines as a Core Technology

Satoru Miura

Kajima has been pushing forward the research and development of a new civil construction system using automation construction machines for the purpose of "lack of labor, shortage of expert", "the low construction productivity", "the numerousness of work-related accident and the construction in the disaster and danger area" that are urgent problems in the construction business. In this paper, two construction systems are mentioned. One is the system which enables autonomous and simultaneous operation of multiple units of construction machines only by a single operator's work instructions from a tablet terminal. The other is an autonomous transport system for reduction of the radiation exposure of the worker under the radiation environment and the operation mistakes under the poor working conditions. Based on these application results, requirements to the success of introduction the automation technology to the construction work in reference to remarkable accomplishments in utilization of industrial robots in manufacturing industry, and a role of general contractors is also mentioned in this paper.