

鉄骨工事自動化技術の開発と現場適用

DEVELOPMENT AND ON-SITE APPLICATION OF AUTOMATION TECHNOLOGY
FOR STEEL FRAME CONSTRUCTION山内 博史^{*1}, 市村 元^{*2}, 鈴木 信也^{*3}
Hiroshi YAMAUCHI, Hajime ICHIMURA and Shinya SUZUKI

The authors have been advancing the development of automation technology for steel frame construction to save labor, improve efficiency, and enhance safety through the combination of various elemental technologies. This report describes the results of applying a combination of a system of automatic measurement and plumbing adjustment for steel columns, a joining method not requiring the use of service bolts, a suspended-load rotation control system, a 3D automatic guidance system for tower cranes, and a remote-control system for tower cranes on site.

Keywords : *Adjustment System of Automatic Measurement and Plumbing for Steel Columns, Assembly System Not Requiring the Use of Temporary Fitting-up Bolts, Load Rotation Control System, 3D Automatic Guidance System for Tower Cranes, and a Remote-control System for Tower Cranes*

鉄骨柱の自動計測・建入れ調整システム, 仮ボルト不要接合法, 吊荷旋回制御装置,
タワークレーン3次元自動誘導システム, タワークレーン遠隔操作システム

1. はじめに

建設業界では、少子高齢化に伴い労務不足や熟練技能者の減少が進んでおり、今後更なる労働者数の減少や大幅な人手不足が懸念される。また、2024年から時間外労働の上限規制が適用され、労働時間を遵守する上でも生産性の向上は必須である。その方法の一つとして、機械化技術や自動化技術を用いた作業の省力化・省人化が挙げられる。また、これらを推進することで、危険作業を減らし、安全性を高めることが可能となる。そこで筆者らは、鉄骨工事の省力化、省人化および安全性の向上等を図るため、「鉄骨工事自動化技術」として様々な要素技術の開発を進めてきた。図1にその全体構想を示す。筆者らは、これまでに3つの要素技術を開発し、現場展開を行ってきた^{1),2)}。それは、簡易な操作で鉄骨柱の鉛直精度の調整を自動で行う「鉄骨柱の自動計測・建入れ調整システム」、鉄骨大梁の端部に設置した仮ボルト不要接合法具の接合ピンをボルト孔に差し込むことで、大梁を簡易に仮固定できる「仮ボルト不要接合法」、クレーンで吊り上げた資材の旋回を制御する「吊荷旋回制御装置」である。これら3つの要素技術に加え、今回、タワークレーンオペレーターの省人化や作業負担軽減を目的に、タワークレーンの操作を自動で行う「タワークレーン3次元自動誘導システム（以下、自動誘導システムという）」、遠隔地からタワークレーンを操作できる「タワークレーン遠隔操作システム（以下、遠隔操作システムという）」を開発した。本報告では、この自動誘導システム、遠隔操作システム、そして鉄骨工事自動化の要素技術を組み合わせ、TODA BUILDING 作業所にて

現場適用を行った結果について述べる。

2. タワークレーン3次元自動誘導システム

2.1 概要

自動誘導システムの概要図を図2に、自動誘導システムによる揚重のイメージを図3に、フロー図を図4に示す。このシステムの特徴は、タワークレーンを用いた荷取り位置から取り付け位置までの鉄骨部材の移動を、モニターの操作画面をタッチするだけで、自動で実施できることである。各鉄骨部材の形状や荷取り位置、取り付け位置等の情報は、鉄骨の BIM (Building Information

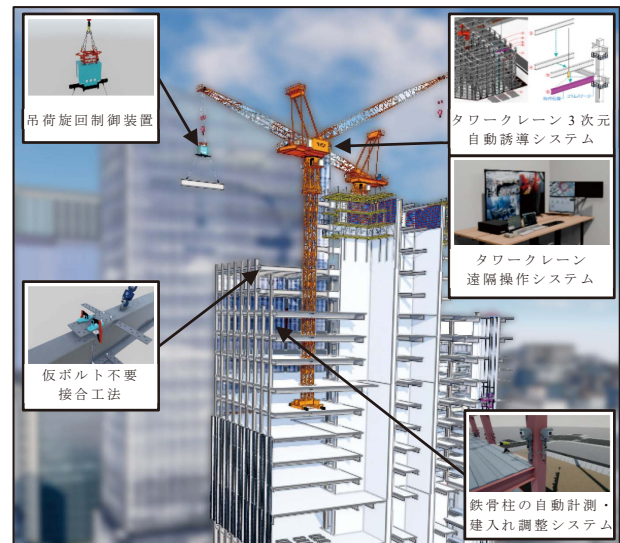


図1 開発技術の全体構想

*1 戸田建設(株)技術研究所 修士(工学)

*2 戸田建設(株)技術研究所 工学修士

*3 戸田建設(株)技術研究所

Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.
Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.
Technology Research Institute, TODA CORPORATION

Modeling) モデルから抽出する。自動誘導システムの機能は、大別すると以下の①～④の項目に分けられる。

- ①「通過点自動算出システム」：移動ルートを自動作成する
 - ②「吊荷自動判別システム」：揚重する部材を識別する
 - ③「コアコントロールユニット」：吊荷の姿勢や揺れの制御、玉掛け・玉外し等を行う
 - ④「コアコントロールシステム」：コアコントロールユニットが取得した情報を端末で表示・制御する
- これらの機能が連携して動作することで、荷取り位置から部材の取り付け位置までの一連のタワークレーン作業を自動化することを可能としている。

2.2 通過自動点算出システム

通過点自動算出システムは、鉄骨部材の形状や工程等の情報を含んだ BIM モデルを基に、各部材を揚重する際の通過点の座標データを自動で算出するシステムである。

前提として、部材 ID (部材を識別するための番号) や工程情報 (部材の取り付け順序) とを鉄骨の各部材毎に付加した BIM モデルを、事前に作成する必要がある。この BIM モデルを読み込んだ後、施工対象となる建物の範囲や、施工当日に立ち入り禁止となる範囲を指定することで、それらを避けた安全な移動ルートを自動で設定し、その通過点の座標を算出する。

部材毎の通過点座標データは、自動誘導で施工する日の前日までに作成しておき、BIM モデルおよび部材 ID と共に、専用のクラウドに一旦保存する運用を想定した。クラウドにデータを保存した後は、クラウド上で部材 ID と通過点座標とを合成したデータを出し、これをコアコントロールシステム側に送信する。

2.3 吊荷自動判別システム

揚重部材の自動判別システムの概要を図 5 に示す。このシステムは、建設現場に搬入されてきた鉄骨部材に貼

り付けた QR コードを荷取り位置にて読み取り、それに対応する部材 ID や部材の通過点座標データを紐づけるシステムである。

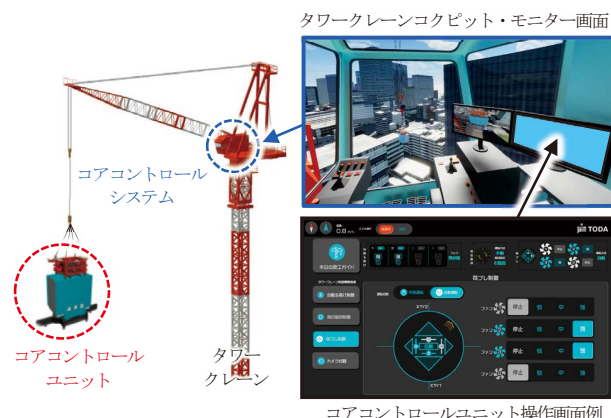


図 2 タワークレーン 3 次元自動誘導システム概要図

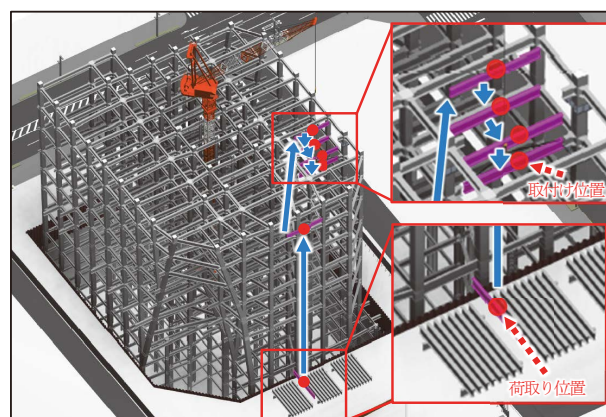


図 3 タワークレーン 3 次元自動誘導システムによる揚重のイメージ

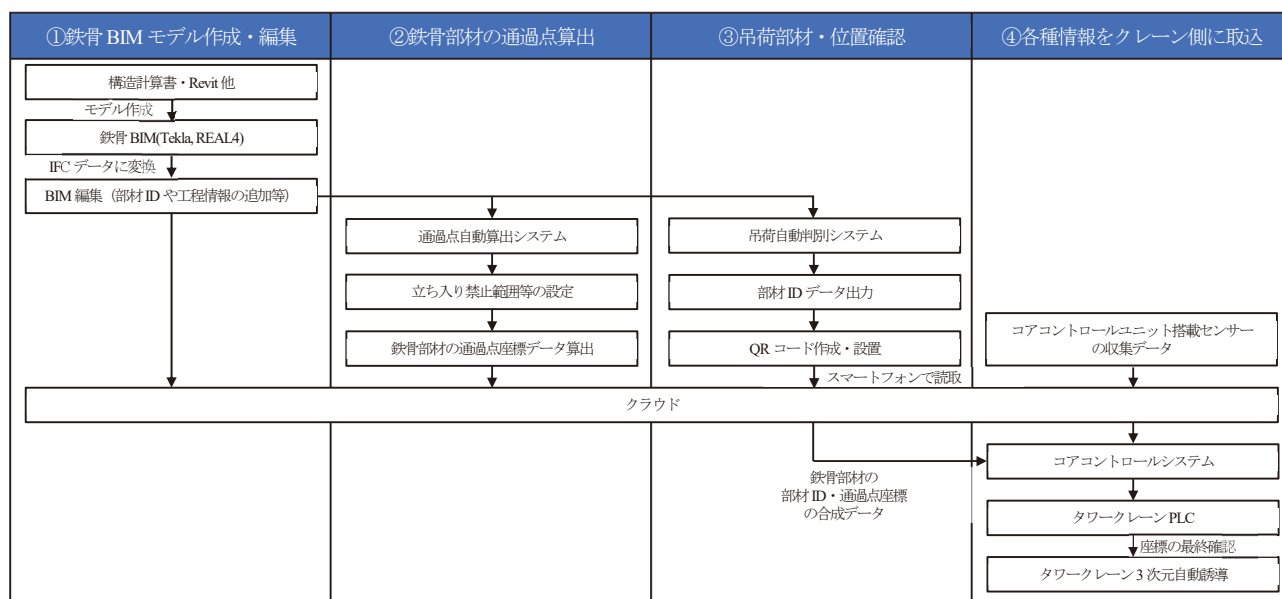


図 4 タワークレーン 3 次元自動誘導システムフロー図

鉄骨部材に貼り付ける QR コードは、揚重部材を識別するための部材 ID をコード化したものであり、事前に鉄骨製作工場で貼り付けておく。部材の荷取り位置（置場）についても、識別用の ID となる置場 ID を割り振っておき、これを QR コード化して実際の置場に設置する。並行して、各置場 ID に対応した荷取り位置座標のデータを作成しておく。

施工当日は、置場に相番している作業者が、スマートフォンに搭載した専用のアプリを用いて部材 ID と置場 ID を読み取り、そのデータをクラウドに送信する。その後、クラウド上で部材 ID と通過点座標を合成する。この際に、通過点の 1 点目の座標（すなわち、部材の荷取り位置の座標）は、読み取った置場 ID に対応した荷取り位置座標に更新されるようになっている。部材 ID と通過点座標を合成したデータは、クレーンのコックピットに設置したモニター上に、BIM モデルと共に表示される。これにより、クレーンオペレーターは、自動誘導システムによる揚重を実施する直前に、読み取られた部材の情報とその取り付け位置が対応しているか、最終確認することができる。

2.4 コアコントロールユニット

写真 1 にコアコントロールユニットを示す。このユニットは、吊荷旋回制御装置に各種センサーを搭載することで、吊荷の旋回（姿勢）の制御以外に、荷振れの制御、空間推定、玉掛け・玉外し等の様々な操作を行うことが可能な機械装置である。タワークレーンのフックブロック直下に常時吊り下げられた状態で使用し、吊荷はユニットの下に吊り下げて使用する。

本ユニットの頂部 2 箇所には、GNSS（Global Navigation Satellite System）アンテナを、本ユニットの下部には Web カメラを搭載している。GNSS アンテナの位置を衛星測位することで吊荷の現在位置や方向を把握することができ、また Web カメラにより吊荷の取付け位置周辺の状況をリアルタイムに把握できる。また、コアコントロールユニットの一部として「吊荷旋回制御装置」を組み込んでおり、これにより吊荷の方向を制御することが可能である。加えて荷振れについては、写真 2 に示すダクトドファン（以下、DF という）が発生させる推力による振れ止め制御を行う機構としている。本ユニットに搭載している IMU（Inertial Measurement Unit）が吊荷の振れを検知すると、吊荷の振れる方向とは逆の向きに推力が発生するように DF が稼働する。この動作を繰り返し行うことで、吊荷の振れを徐々に小さくしていく。この機構により、従来はクレーンオペレーターの技量に依存していた荷振れの抑制について、自動で制御することが可能となった。以上の機能により、本ユニットは、タワークレーンや吊荷の状況をリアルタイムに把握し、同時に各種制御・動作を遠隔で行うことが可能な機械装置としている。

2.5 コアコントロールシステム

コアコントロールシステムは、コアコントロールユニットが取得した情報を収集し、その情報を各種端末（ディスプレイやタブレット端末など）上に表示することができるシステムである。同時に、専用に開発した操作画面から、コアコントロールユニットの制御を行うことを可能としている。

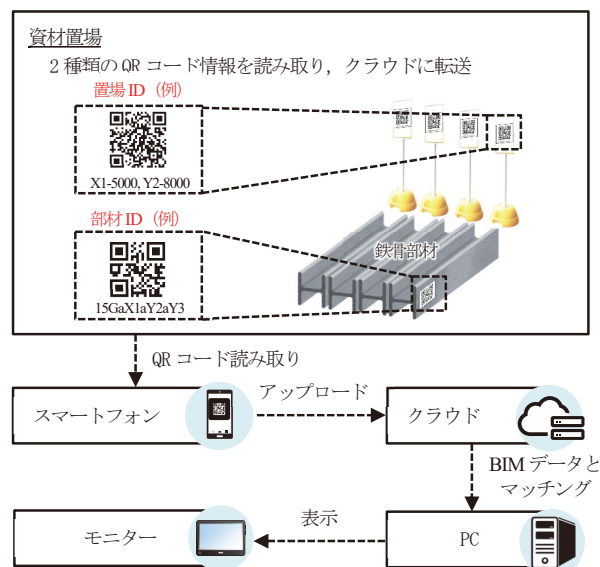


図 5 吊荷自動判別システム概要

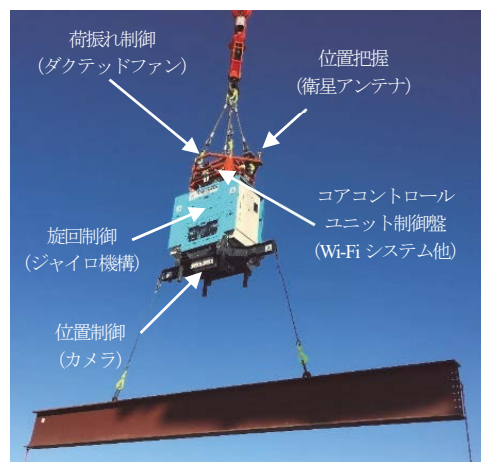


写真 1 コアコントロールユニット

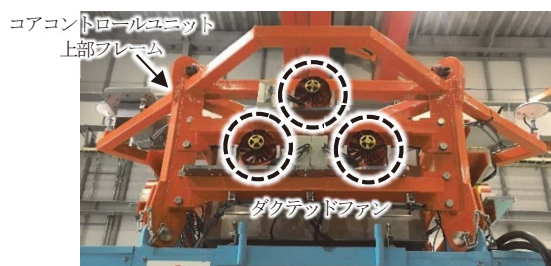


写真 2 ダクトドファン

図6に、コアコントロールシステムの操作画面の一例として荷振れ制御用画面を示す。この操作画面は、運転席内に設置したモニターに表示され、コアコントロールユニットの荷振れ制御動作を手動または自動で選択・操作できる画面である。荷振れ制御だけでなく、旋回制御操作および自動玉掛け・玉外し操作についても同様に自動または手動での制御が可能である。また、揚重する鉄骨部材の情報を示す画面や、コアコントロールユニット下部のWebカメラの映像を映す画面も表示することができる。このように、コアコントロールユニットと連動することで、タワークレーンの動作データや吊荷の状況（吊荷情報）をリアルタイムに把握するとともに、吊荷の状態を制御することが可能なシステムとしている。

3. タワークレーン遠隔操作システム

前述したタワークレーン3次元自動誘導システムと並行して、タワークレーン遠隔操作システムを開発した。遠隔操作システムは、専用のコックピットから遠隔でタワークレーンを操作することができ、クレーン頂部の運転席に登る必要がなくなるため、クレーンオペレーターの作業環境の改善に貢献できるシステムである。また、遠隔操作用コックピットから、自動誘導と遠隔操作の切り替え操作をすることで、自動誘導システムと連携させて使用することが可能である。

写真3に遠隔操作システムの全景を、図7に同システムの構成図を示す。タワークレーンの各所（ジブトップ、運転席など）やコアコントロールユニットに設置したカメラの映像、タワークレーンの動作パラメーターを画面に映し、オペレーターはこれらをモニタリングしながら運転を行う。低遅延の映像伝送システムを用いることで、カメラ映像を非常に短いタイムラグ（0.2秒未満）で送信しているため、リアルタイム性の高いシステムとなっている。この他に、タワークレーンの3Dモデルが、実際のクレーンの動作に連動してその動作状況を再現する「デジタルツイン画面」を開発した。これにより、クレーンのフックと鉄骨ヤードに置かれた吊荷との位置関係など、カメラ映像だけでは確認できない情報を捕うことができる。この点は、現状のクレーン操作よりも、安全性の向上に貢献出来る点である。また、モーションシミュレータにより運転座席の振動と傾きを遠隔においても体感できるものとし、TV会議システムを用いてクレーンの動作音や三者通話の明瞭な音声情報を取得することで、運転席にいるような臨場感のある操作性を実現している。上記の機能により、クレーン操作についてより忠実な再現性を確保するとともに、操作性・安全性に配慮したシステムとしている。

4. 動作検証

自社の工作所敷地内を実験ヤードとして、自動誘導システムの動作検証を実施した。写真4に動作検証の状況



図6 コアコントロールユニット操作画面の一例
(荷振れ制御用画面)



写真3 タワークレーン遠隔操作システム全景

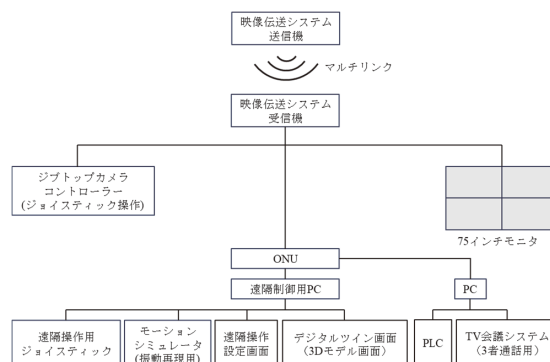


図7 タワークレーン遠隔操作システム構成図



写真4 工作所での動作検証の状況

を示す。ここでは、自動誘導システムの現場適用に向けて、その動作精度を高めるため、検証と動作精度の評価を繰り返し行うこととした。自動誘導システムにおいて取得できる位置情報としては、ジブトップ位置情報（クレーンに内蔵されたセンサーにより求められる）と、衛星測位による位置情報（コアコントロールユニットに設置した GNSS アンテナを測位して求められる）の 2 種類がある。ただしジブトップ位置情報については、重量物を吊り上げた際に、クレーンの撓み等の変形による誤差の影響を受けると予想された。そのため、この動作検証においては、衛星測位による位置情報を用いてタワークレーンの動作精度を評価することとした。検証データを収集しながら、クレーンのキャリブレーション（クレーンおよびコアコントロールユニットに設置した GNSS アンテナの測位データに対する補正や、測位データの座標とクレーン搭載センサーのデータの座標との照合）を行い、その精度を高めていく計画とした。

図 8 に動作検証の計画図を示す。本検証では、コアコントロールユニットの下に 10t の検査用ウエイトを吊った状態で、任意の位置に衛星測位アンテナを設置し、それを目標点として自動誘導を繰り返し行い、その動作精度（水平方向における位置の精度）を衛星測位により計測し評価した。なお、動作検証時は無風状態であった。図 9 に動作精度の検証結果の一例を、表 1 に目標点到達時の誤差をまとめて表す。誤差については、目標点として設置した衛星測精度の検証結果の一例を、表 1 に目標点到達時の誤差をまとめて表す。誤差については、目標点として設置した衛星測位アンテナの測位結果と、目標点到達時のコアコントロールユニット位置の測位結果を比較することで求めた。なお、コアコントロールユニットには上部の両端 2 箇所に GNSS アンテナを設置しているため、その測位結果の平均値をコアコントロールユニットの位置（すなわち、吊荷の位置）とした。また、実際にはクレーンの動作停止後も、荷振れにより吊荷は完全に静止しないため、吊荷の通過軌道を衛星測位により捕捉し、その平均点を吊荷の通過点とした。5 回連続して計測を行った結果、目標点に対する誤差は最小で 1.5cm、最大で 7.3cm、平均して 5.3cm の誤差となり、いずれも 10cm 以内に収まった。以上の結果から、検証終了時点における自動誘導システムの最高精度は 10cm 以内と定め、これを以降の現場適用における目標精度とした。

図 10 に、DF による荷振れ制御の検証結果を示す。吊荷が目標点に達し、クレーンが旋回を停止した時点で荷振れ制御機能を起動し、そこから荷振れ制御が自動で停止するまでの吊荷の通過軌道を、衛星測位により計測した。荷振れが IMU の閾値以下となった時点で荷振れ制御は自動停止するため、この時点で測位を終了した。IMU が荷振れを検知する度に自動で DF を起動し、これを繰り返し行うことで、徐々に荷振れが小さくなっていく

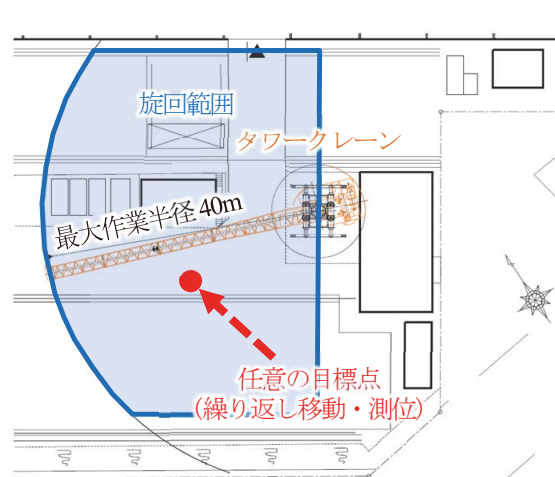


図 8 動作検証計画図

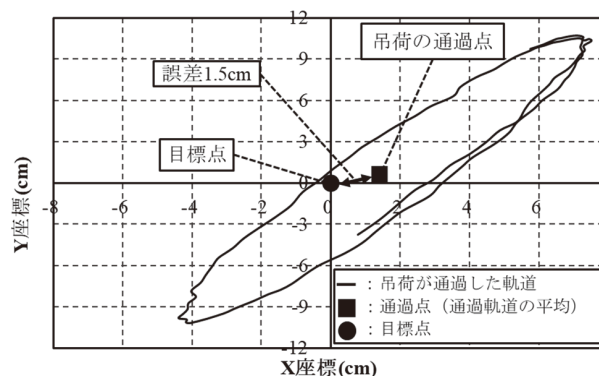


図 9 動作精度の検証結果の一例（5 回目）

表 1 目標点到達時の誤差

	目標点に対する誤差 (cm)
1 回目	7.2
2 回目	7.0
3 回目	3.5
4 回目	7.3
5 回目	1.5
平均	5.3

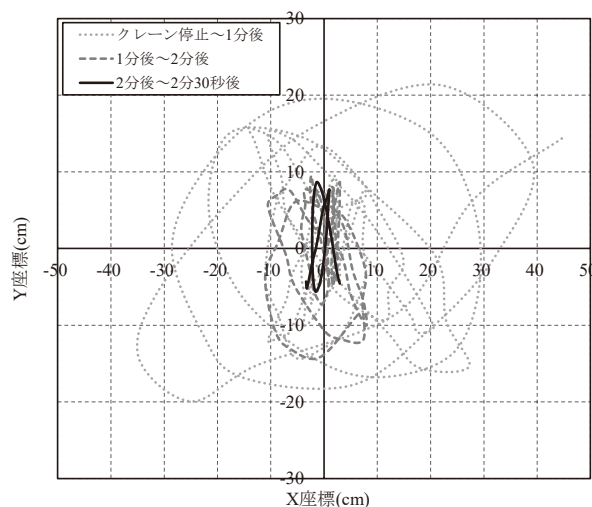


図 10 荷振れ制御の検証結果

くことを確認できた。荷振れ制御の軌道から1分程度で、荷振れの幅が10cm程度に収束することを確認した。

5. 現場適用

5.1 概要

2023年12月、鉄骨工事自動化技術を新 TODA ビル計画新築工事作業所に適用した。

図11に作業フロー図を、図12に吊荷の移動ルート図を示す。ここでは、鉄骨の柱1本および大梁2本を対象として、自動誘導システムと遠隔操作システムを切り替えながら、鉄骨部材への玉掛けから取り付けまでの施工を行った。初めに遠隔操作システムにより、クレーンオペレーターが遠隔で柱への玉掛けおよび地切りを行い、次に自動誘導システムにより、取付け位置の直上まで揚重した。取付け位置の直上に来た時点で、荷振れ制御および旋回制御の機能を遠隔で起動し、柱を指定の向きに旋回し安定させた。この際の自動誘導システムと遠隔操作システムの切り替えや、荷振れ制御・旋回制御については、遠隔操作用コックピットから実施した。最後に再び遠隔操作で巻き下げ動作を行い、柱を取付け位置まで移動させ、建入れ調整治具により仮固定した。その後「鉄骨柱の自動計測・建入れ調整システム」を用いて、東西方向および南北方向に対してそれぞれ誤差3mm以内となるよう、建入れ精度を自動で調整した。続いて、大梁についても柱と同様の手順で取り付け位置の直上まで揚重し、遠隔操作により取り付け位置まで巻き下げをした後、「仮ボルト不要接合法」により大梁の仮固定を行った。

また今回の現場適用では、工作所で実施した動作検証の結果に基づき、自動誘導システムの目標精度を、水平方向で誤差10cm以内と定めた。ただし今回の現場適用では大梁の仮固定までを実施するため、この誤差を補正するための新たな要素技術として、「AR マーカー」(写真6)による測位技術および「ガチャントピンガイド」(写真7)を導入した。取り付け位置の直上に到達した時点で、「AR マーカー」による測位技術を起動し、大梁の現在位置と取り付け位置との誤差を自動で計測しながら、オペレーターの遠隔操作により位置の補正を行った。また「ガチャントピンガイド」に沿って大梁を下ろし、「仮ボルト不要接合法」の「接合ピン」を所定の位置まで誘導することで、最終的な位置を補正し位置合わせ作業を省略した。

5.2 結果

図13に、自動誘導により大梁を取り付けた際の衛星測位の結果を示す。鉛直方向を除いた、水平方向の測位結果である。(目標点、すなわち大梁取り付け位置に対して、自動誘導システムにより目標点の直上まで到達し、クレーンが動作を停止した際の測位結果を到達点としている。) 結果として、目標点に対してX方向で25.7cm、Y方向で5.3cm、直線距離で26.2cmの誤差となったた

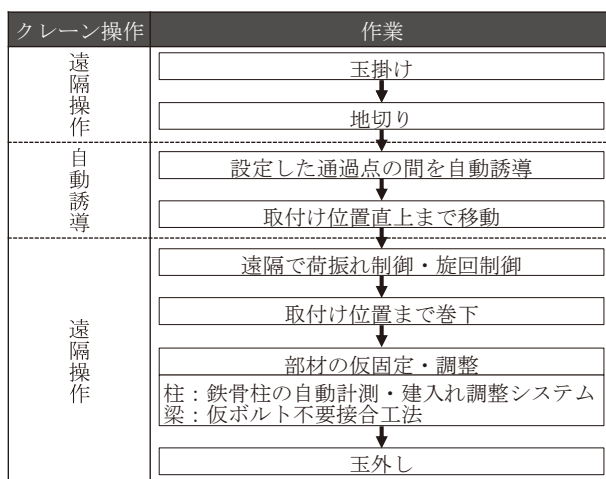


図 11 鉄骨部材取付け作業フロー図

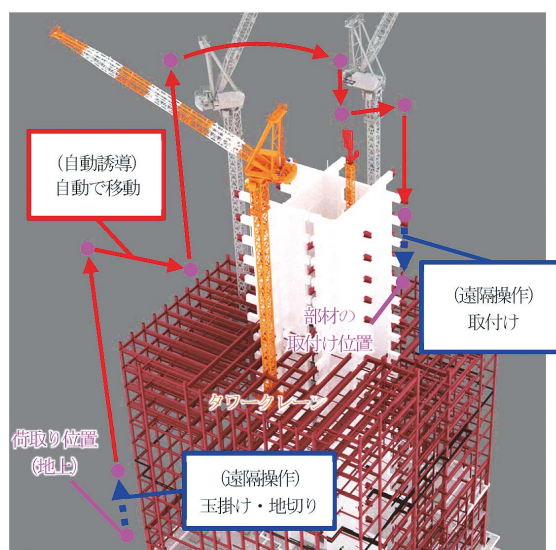


図 12 吊荷の移動ルート図

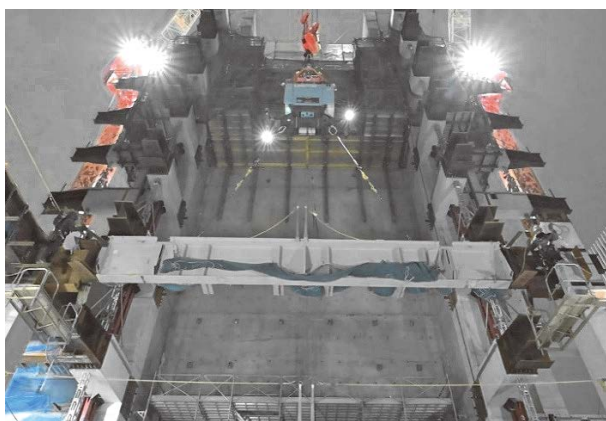


写真 5 鉄骨大梁の揚重状況

め、目標精度を達成することはできなかった。この原因として、マルチパス現象(衛星からの電波がビル等に反射または回折するために、複数の経路から受信される現象)により、GNSS アンテナと複数の衛星との間の測距において誤差が生じたことが考えられる。しかし、先述

した「AR マーカー」による測位技術を用いて大梁の取り付け位置に対する誤差を計測しながら、遠隔操作により誤差10cm 以内の位置まで補正を行い、「ガチャントピンガイド」に沿って大梁を下ろすことで、鷹工の引き込み等の補助を必要とせずに、部材の仮固定を安全に達成することができた。

6. まとめおよび今後の展開

今回は、自動誘導システムおよび遠隔操作システムを他の鉄骨工事自動化技術と組み合わせて現場適用を行い、その有効性を確認した。しかし自動誘導システムについては、前述したとおり目標としていた動作精度を達成することはできなかった。そこで、誤差要因となる衛星の測位データのみを除去することで、都市部のような測位環境の悪い場所においても、高い測位精度を確保できるシステムに改良することを考えている。また、GNSS を用いた測位においては、鉛直方向の誤差は水平方向の誤差より大きく出る傾向にあり、鉄骨部材への玉掛けから取り付けまでを全て自動で行うためには、この点も課題となる。

今後は、衛星測位の精度を更に上げるための改良を継続しながら、3D-LiDAR (Light Detection And Ranging) 等の測位技術を組み合わせることで、自動誘導システムの動作精度を向上させていく。また遠隔操作システムについては、特に安全性に関わる機能について改良を行い、現場での実証施工等を実施した後、作業所に展開していく予定である。

謝辞

今回の現場適用においては、新 TODA ビル計画新築工事作業所の方々および総台工作所の方々に多大なご協力を頂きました。心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 三輪他「鉄骨工事における自動化技術に関する開発」、戸田建設技術研究報告第43号 2017.11
- 2) 市村他「鉄骨工事における自動化技術の改良と現場適用」、戸田建設技術研究報告第46号 2020.11

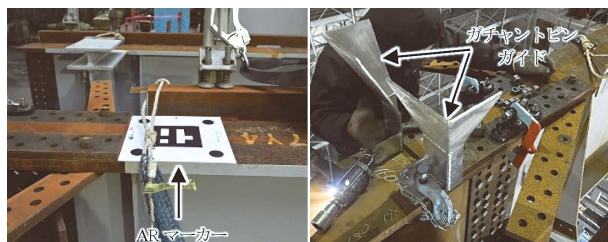


写真6 AR マーカー

写真7 ガチャントピンガイド™

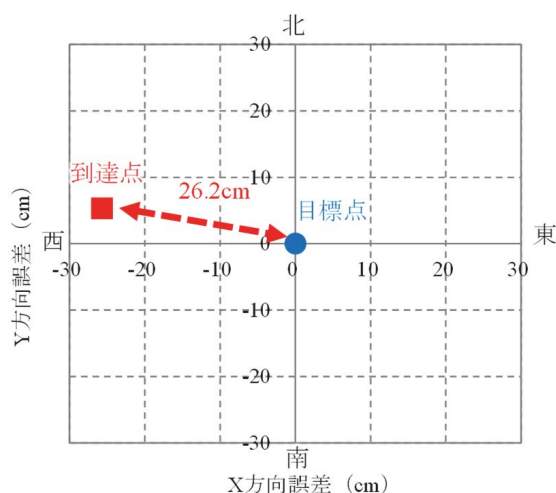


図13 自動誘導による大梁取り付け時の測位結果