

BIM/CIM モデルを活用したタワークレーン操作支援システムの構築

前田建設工業(株) 正会員 ○室屋 志夢, 正会員 工藤 新一
正会員 戸部 圭, 滑川 和臣
向田 雄貴
ソナス(株) 大原 壮太郎, 滝澤 慎也

1. はじめに

近年、建設業界においては、熟練技術者不足が顕在化しており、建設現場全体の生産性や安全性に大きな影響を及ぼしている。その中でも、タワークレーンのオペレータ不足は深刻な状況となっている。

タワークレーンの操作は、視界が悪い荒天下での作業や夜間作業でも対応できる経験に基づく高度な技能が必要で、技術者の育成が難しい。これを背景として、熟練技術者でなくても作業効率や品質を低下させることなく容易に操作できるシステムを開発した。2024年11月、ダム現場において、本システムの実用性について試行検証した。本稿では、タワークレーン操作における課題、本システムの概要・機能、試行の検証結果・導入効果等について紹介する。



写真-1 ダム現場におけるタワークレーンの設置状況

2. タワークレーン操作における課題

システム開発に際し、タワークレーン操作における熟練オペレータと一般オペレータの動作比較を行った結果、堤体打設作業の効率に大きな差が生じていることが分かった。

1往復あたりの打設時間は、現場に習熟した熟練オペレータが平均5分半であるのに対し、一般オペレータは7分程度かかり、その差は約1分半であった。ダム現場1日当たりの平均打設量を基準に計算すると、全体の作業時間に約1時間もの差が生じることが確認できた。

そこで、熟練オペレータおよび一般オペレータに対して個別ヒヤリングを行い、操作方法を確認した。熟練オペレータは、巻上げ・起伏・旋回の操作を複数同時に実施し、段階的にノッチ数を調整しながら効率的な動作を実施していることを確認した。一方、一般オペレータは単一操作が主体で、各動作を段階的かつ順次実施する傾向が見られる。特に、熟練オペレータは狭い範囲での接触回避や振れ止め操作など、状況判断に基づいた複合操作により作業時間短縮と安全性向上を実現している。一般オペレータは安全を重視しつつも効率面で劣り、操作の切り替えや同時操作に課題が残る。

本比較から、熟練オペレータの高度な同時操作技術と状況判断力が、作業効率と安全性の両立に寄与していることが明らかとなった。

キーワード デジタルツイン, BIM/CIM, 施工管理, タワークレーン, マシンガイダンス

連絡先 〒102-8151 東京都千代田区富士見 2-10-2 前田建設工業(株) 土木技術部 TEL03-3265-5551

表-1 熟練オペレータと一般オペレータの比較

項目	熟練オペレータ	一般オペレータ
・ 操作の同時性	複数操作を同時に実施	操作を分けて順次実施
・ ノッチ操作	高ノッチを素早く使用	ノッチを段階的に徐々に上げる
・ 操作ポイント	安全かつ効率で正確	安全性重視
・ 旋回・起伏操作	巻上げ・起伏・旋回を同時に操作	巻上げ・旋回・起伏を順次かつ慎重に操作

また、熟練オペレータは経験に基づき機器の特性や現場の状況に応じて柔軟に対応しており、安定した作業遂行が可能であることが分かった。一方で、一般オペレータは、経験不足のため、安定した作業遂行が難しい。よって安定した作業遂行を可能とするために必要な操作ノウハウを視覚的に共有するタワークレーン操作支援システムを開発した。

表-1 に熟練オペレータと一般オペレータの動作比較を示す。

3. システム概要

本システムは、タワークレーンによる吊荷の最適運搬経路（計画）と現位置（リアルタイム）を操作室内のモニタに3次元表示し、オペレータの操作を支援するデジタルツインのシステムである。

以下に、ハードウェアの構成およびシステムの機能について概説する。

(1) ハードウェアの構成（図-3）

本システムは、GNSS受信機と無線通信モジュール、PC、モニタの4つのハードウェアで構成される。

a) GNSS 受信機

吊荷の位置情報をリアルタイムで計測するため、吊荷上部の治具にGNSSユニットを設置し、PPP-RTK方式の衛星測位補強サービス「CLAS（センチメートル級測位補強サービス）」を採用した。タワークレーン操作支援システムのGNSS測位方式として、NW型RTKとCLASの2方式を比較検証した。検証は、両方式の測位精度と現場での実用性を評価することを目的とし、東京都千代田区の電子基準点（見通し良好）と大田区の街区多角点（見通し制限）で、基準点直上にGNSSユニットを固定して5分間測定し座標誤差を評価した（写真-2）。

NW型RTKはインターネット経由で補正情報を受信し、見通し良好な条件下ではX方向約10cm、Y方向約30cmの精度で迅速にFIX解へ到達したが、見通しが悪い場所では1m以上の誤差や測位のブレが生じやすいことが分かった。一方、CLASは準天頂衛星みちびきのL6信号を用いた補正サービスで、専用モジュールを用いることでセンチメートルレベルの精度を実現した。見通し良好な条件ではRTKと同等の誤差範囲を示し、見通し制限下でも一時的に未確定（FLOAT解）となるが、一定時間待つことで数センチレベルのFIX解に達した。

この結果から、NW型RTKは高精度かつ迅速な測位が可能だが、通信環境や見通し条件に依存しやすい課題があるのに対し、CLASは通信環境に左右されにくく、見通しの悪い場所でも安定した測位が可能である。以上より、CLASは現場の多様な環境下で高精度かつ安定した測位を実現でき、通信トラブルの影響も受けにくいことから、タワークレーン操作支援システムに最適と判断し採用した。図-1及び図-2に各電子基準点における計測結果を示す。

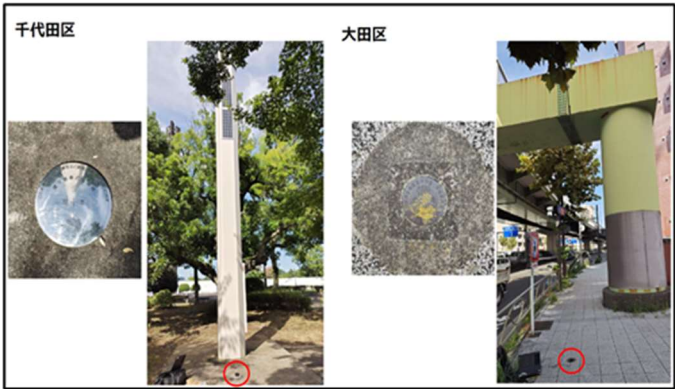


写真-2 計測基準点

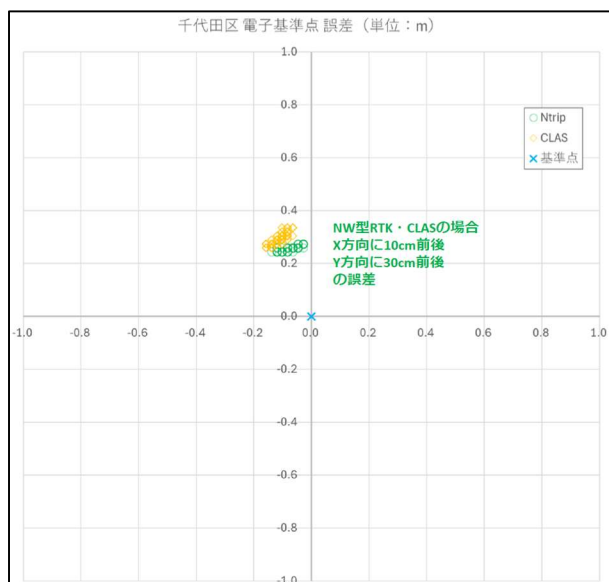


図-1 電子基準点誤差（見通し良好）

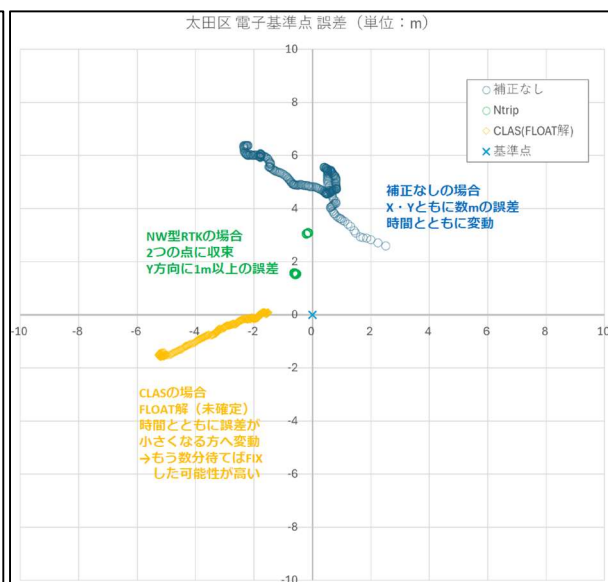


図-2 電子基準点誤差（見通し制限）

b) 無線通信モジュール

GNSS 受信機で取得した吊荷の位置情報を、操作室内の PC に送信。また、リアルタイム性を確保するため、送信間隔は 1.0 秒ごとに設定。無線通信には、ソナス㈱の UNISONet(920MHz 帯)を使用した。

c) PC

a)で受信した吊荷の位置情報と、ソフトウェアで解析した最適経路の位置情報を 3 次元モデル上にプロット。なお、3 次元モデルは、普及拡大しつつある BIM/CIM の仕様を採用した。

d) モニタ

c)の 3 次元モデルをディスプレイに表示。なお、モニタは、PC と有線で接続し、13.3 インチ、フル HD、タッチパネルの仕様を採用。

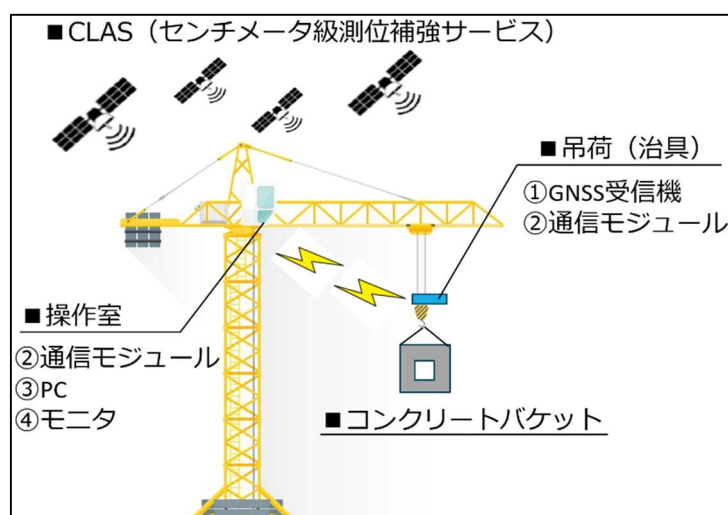


図-3 ハードウェア構成図

(2) システムの機能

タワークレーンのオペレータが使用するソフトウェアとして、以下に示す 3 つの機能を搭載した。なお、本ソフトウェアは、操作室内の PC にインストールして使用するものとする。

a) 最適ルート記録機能（記録モード）

事前に、熟練技術者が操作する吊荷の経路データを記録し、最適経路を保存する機能（写真-3）。

b) 操作ガイダンス機能（オペレータモード）

操作時に、(1)で保存した最適経路と吊荷の現位置を 3 次元モデル上に表示する機能。オペレータは、この表示を見て操作（写真-4）。

c) 作業効率表示機能

単位時間あたりの運搬の回数を常時表示する機能。なお、運搬回数は、吊荷の実績経路より自動で記録・表示。

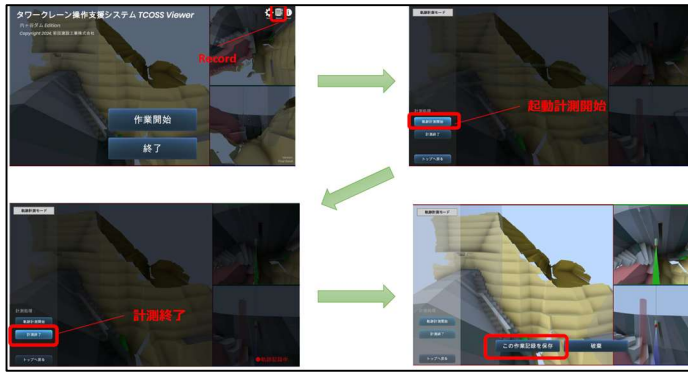


写真-3 最適ルート記録機能表示画面

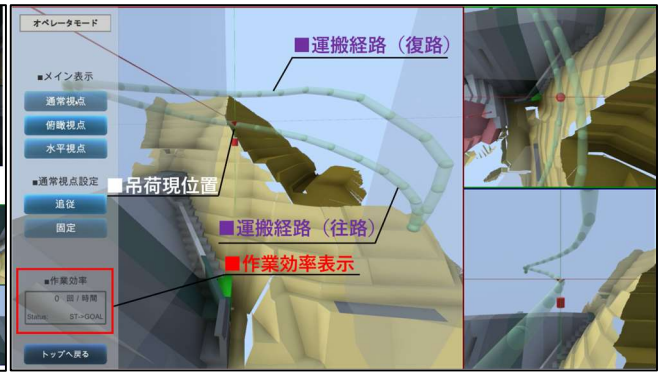


写真-4 オペレータモード表示画面

4. システム運用方法

本システムの運用手順を以下に示す．まず、BIM/CIM 仕様で作成された 3D モデルデータを、事前にフォーマット変換等の必要な前処理を行った上で、システムにインポートする．この際、モデルの各構成要素が正確に属性情報や座標値を保持していることを確認する．システムへ 3D モデルデータが反映されたのを確認した後、現地に設置した GNSS アンテナ等から取得した位置情報と、3D モデル上の座標データを突合し、位置合わせを行う．これにより、実空間と仮想空間とのズレを最小限に抑え、実際の現場作業の精度を担保する．

次に、熟練オペレータが作業計画に基づき、記録モードを用いてクレーンの打設経路を設定する．軌跡設定は、現場条件や障害物の有無、安全性等を考慮しながら、システム上で視覚的に確認が可能である．設定された軌跡データに基づき、作業範囲を示すガイドボリウム(図-4)を自動生成する．このガイドボリウムは、半径を任意に設定できるため、現場状況や施工条件に柔軟に対応することが可能である．

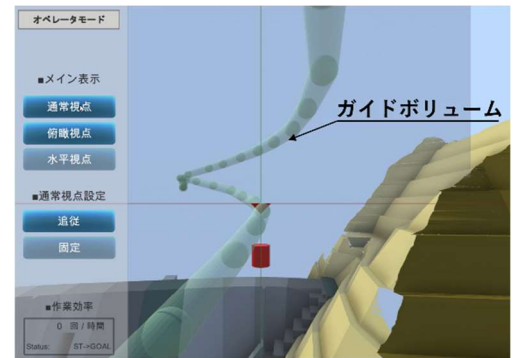


写真-5 ガイドボリウム

一般オペレータは、システムが提示するガイドボリウムおよび自己位置を現場のモニターでリアルタイムに確認しながら、クレーン操作を実施する．また、作業完了後には、実際の軌跡データを保存し、作業後の事後検証や品質管理資料として活用することができる．図-4 にシステム運用フローを示す．

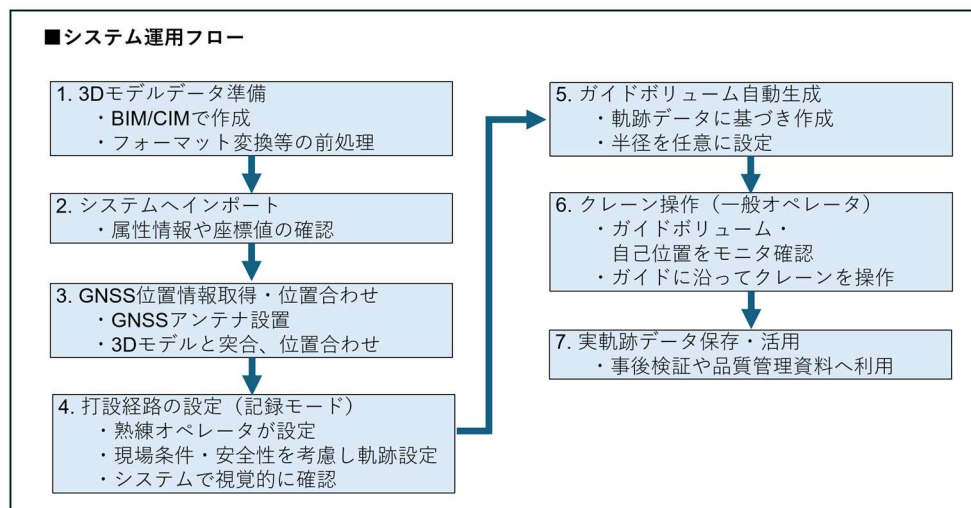


図-4 システム運用フロー

5. 試行概要及びシステム検証結果

(1) 試行概要

本システムの試行は、実際のダム工事現場に設置されているタワークレーンを利用し、堤体打設時のコンクリートバケットの運搬の作業を対象として行った。なお、検証項目は、a) 測位精度、b) 伝送速度、c) ガイダンス表示の操作性、d) ガイダンス表示の視認性とした。写真-5 及び写真-6 にシステム使用状況を示す。

(2) システム検証結果

本システムの検証は、5 日間（延べ 50 時間）の作業を対象に実施した。その結果を以下に示す。

a) 測位精度

平面 X,Y の誤差は、0.5m～1.0m で実用的に問題ないことを確認した。高さ Z 方向には 6.0m の誤差が生じた。これは、GNSS モジュール内部の標高計算に使うジオイドモデルが、簡易的であることが原因と考えられる。そこで、標高計算はアプリケーション側で精度の高いモデルを使用するようにし、さらに高さの補正値を設定できるようにした。

b) 伝送速度

検証の全期間（延べ 50 時間）を通じて、GNSS を用いて取得した吊荷の位置情報が遅延なく 1.0 秒ごとに確実に伝送されることを確認した。これにより、リアルタイムでの位置情報把握が可能となった。

c) ガイダンス表示の操作性

タッチパネル式で操作しやすい一方で、ダイアログ等の表示サイズが小さく、操作ミスが多数発生した。ダイアログ等のサイズを変更するなど対策し、操作ミスが起こらないユーザインターフェースを構築した。

d) ガイダンス表示の視認性

3 次元表示で吊荷の位置が即座に把握できた一方で、見たい箇所への表示切替えが出来なかった。画面表示をワンタッチで切り替えられるように機能改良した。

また 3D モデル内にクレーン作業半径及び各ブロックの番号を付与した。これにより、コンクリート打設作業のみならず、その他の雑運搬業務においても資材や構造物の位置特定が容易となり、作業の円滑化やミスの低減に寄与した。



写真-6 システム使用状況（日中）



写真-7 システム使用状況（夜間）

6. 導入効果

本システムの現場試行検証の結果、以下の導入効果が確認された。

(1) 作業の効率化

直感的に操作可能なガイダンス機能によって、一般オペレータも熟練者が記録した最適な軌跡を3次元モデル上で確認しながら、迷うことなく安全かつ効率的にクレーン操作を行うことができるようになった。

これにより、従来は現場経験や技量の差によって生じていた操作のばらつきが大きく減少し、一般オペレータでも熟練者に近いパフォーマンスを発揮できる環境が整った。

(2) 安全性向上

吊荷の位置情報と作業範囲をリアルタイムで可視化することで、現場における安全性が向上した。これまで、オペレータは目視や経験に頼って吊荷の位置や周辺状況を把握していたため、死角や複雑な動線での接触事故、吊荷の振れによる危険が存在していた。本システムでは、吊荷の現在位置や移動経路、作業許容範囲（ガイドボリューム）が3次元モデル上で明確に表示され、オペレータは常に最新の情報を把握しながら作業を進めることができるこれにより、接触事故や吊荷の振れによるトラブルを減少させることが可能となった。

(3) 作業の標準化

作業の標準化の観点では、従来、熟練オペレータが個々の経験や感覚に基づいて判断していた最適経路や複雑な操作ノウハウを、本システムによりデジタルデータとして蓄積・活用できる点が大きな特長である。具体的には、熟練者が実際に操作した際の経路データや作業パターンを記録し、システム上で再現することが可能となった。また、ノウハウがデジタルデータとして組織内に蓄積されることで、熟練技術者の退職や人員の入れ替えがあった場合でも、知識や技術の継承が容易となり、持続的な人材育成や現場力の底上げが期待できる。このように、本システムは教育・ノウハウ共有の基盤として非常に有効であることが確認された。

7. 考察・まとめ

本検証における成果、課題、今後の展望について以下に示す。

【成果】

- ・ 熟練オペレータの操作ノウハウをデジタル化し、最適経路や操作パターンを記録・再現できるシステムを構築し、作業効率化に寄与。
- ・ 3次元モデル上で常に最新の情報を把握しながら作業を進めることができ、安全性向上に寄与。
- ・ 作業の標準化やノウハウ継承のためのデジタルデータ化を推進し、技術継承・教育の効率化に貢献。

【課題】

- ・ 3D表示の切替や詳細表示の改善は実施したが、さらに直感的な操作性の向上が必要。
- ・ 現在は個別モデルの作成・アップロードに手間がかかっているため、システム内でリフト状況に応じてモデルを切り替えられる仕様へ変更する。

【今後の展望】

- ・ 運搬経路を熟練オペレータのノウハウから自動生成し、効率的な施工計画支援を目指す。
- ・ ノウハウ・作業データの蓄積・共有を推進し、熟練者不在時の操作者支援や人材育成に活用。
- ・ さらなる安全性向上のため、センサー類とのシステム連携を図り、アラート機能等付与。

参考文献

- ・ 次世代IoT無線「Unisonet」（ソナス㈱HP）<<https://www.sonas.co.jp/technology/unisonet>>
- ・ 鈴木誠，長山智則，大原壮太郎，森川 博之：「同時送信型フラッドィングを利用した構造モニタリング」電子情報通信学会論文誌 B，Vol. J100-B No. 12，pp. 952-960，2017