

3D クレーンブーム位置監視システムの開発

Development of 3D Crane Boom Position Monitoring System

三上 博 HIROSHI MIKAMI

千葉 史隆 FUMITAKA CHIBA

土木技術部 伊達 峰司 TAKASHI DATE

土木技術部 草竹 真也 SHINYA KUSATAKE

建設工事において、クレーン作業を行う際には、工事区域に近接する道路、線路、送電線、構造物等に対するブームの接近距離の監視が必要である。筆者らは、クレーンブーム頂点位置にGNSS受信機を設置して、即時的に監視・警告を行うシステムを開発した。制限範囲は3次元形状領域として定義され、システムはその領域に対するクレーンブーム頂点の接近度を常に監視する。本システムを最近いくつかの現場に適用した結果、安全度の見える化を効果的に増進できることを確認した。

キーワード：GNSS，送電線，近接工事，警報システム，3次元

Construction works using cranes which are located near roads, railways, power transmission lines and constructed objects are required to monitor the distance between the crane boom and such objects as a safety measure. A real-time monitoring and warning system using a GNSS receiver which is set upon the top of a crane boom have been developed. Limitation zones are defined as 3 dimensional areas, and the system always monitors the approaching degree of the crane boom top to such zones. Through the recent on site works, it is confirmed that the system increases the visualization of safety degree effectively.

Key Words: GNSS, Power-transmission Line, Neighboring Construction, Warning System, 3Dimension

1. はじめに

建設工事では、工事区域に隣接するさまざまな既存の構造物、施設等に対する安全対策が必要となる¹⁾。特にクレーンによる建設資材等の揚重作業を行う際には、クレーンのブームや吊荷が、隣接する道路、線路、敷地等に侵入することが無いように、厳しい監視が必要となる。また、橋梁工事等においても施工場所の上空に高圧送電線が存在し、送電圧に応じた離隔距離確保がクレーン作業に求められる機会が多い。さらに高速道路の二期線工事においては、供用中の隣接する一期線に対するクレーンの侵入監視が必要となる。

クレーンの侵入に対する安全・監視対策に関しては、従来さまざまな技術が提案され実施されている。目視による監視に加えて、計測機器を用いた手法、クレーン自体の動きを制限する技術などもある。これらの技術では、制限範囲と安全範囲の境界を2次元平面で設定することが通常であり、実際の複雑な制限範囲（曲面や3次元形状領域で構成）を100%モデル化して規定すること

は難しい。そのため、本来は侵入可能な安全な領域においても、システムの特長から制限や警報が発生する不都合がしばしば生じる。その結果、有効作業範囲が必要以上に制限されてしまい、施工が困難となる場合もある。

筆者らが開発を行った、3Dクレーンブーム位置監視システムは、GNSS（Global Navigation Satellite System：全地球衛星測位システム）を活用することによって、制限範囲を任意の3次元空間として設定できる特徴を有する²⁾。本報告では、システムの概要と現場での適用事例について示す。

2. 技術概要

(1) 既往の安全対策技術

既往のクレーン作業の安全対策技術は、おおむね以下の三手法に大別される。①注意喚起標識等を用いた目視監視、②制限範囲境界にレーザー等のバリアを設け警報を行う手法、③クレーンの可動範囲を機械的に制限する手法等である。

機器やセンサー類を用いる②および③の手法では、あらかじめ制限範囲に応じた境界位置条件のデータを入力して作業に備える。しかしながら、制限範囲の境界は、単純な直線や平面で設定されるものだけではなく、複雑な形状である場合も多い。例えば、道路や鉄道などのカーブ区間では、制限範囲の境界も曲面で設定されることが望ましいケースがある（図-1）。

また、送電線への近接監視では、鉄塔間での電線の自重によるたわみによって、地上からの離隔距離が、位置によって異なる（図-2）。

図-3は、高圧送電線に対する離隔制限範囲の一例であり、送電線軸に対して直角方向の断面図で示したものである。本事例では、2本の送電線が並んでおり、送電圧から定められる基本的な安全離隔範囲が円（黒線）で示される。しかし、強風時には、送電線が、横に振り上げられ移動することから、送電線の側面には、この影響を考慮した曲線上の離隔範囲（緑線）が設定されている。実際の建設現場においては、この制限範囲を矩形形状に単純化したモデルで管理を行うことが一般的である。

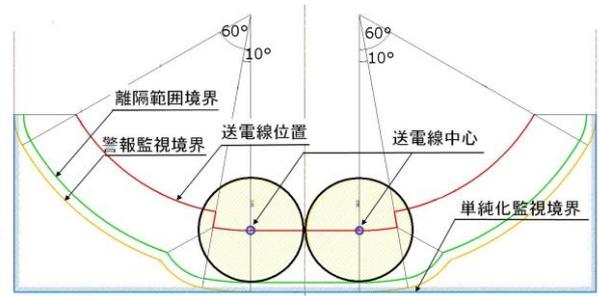


図-3 送電線軸直角方向断面での制限範囲概念

このような条件下で、既存の安全対策技術では、複雑な境界位置の設定が容易で無いケースも多い。クレーンの作業範囲を安全かつ有効的に確保するためには、実際の制限範囲を、より詳細に規定できる監視手法が望まれる状況である。

(2) 3D クレーンブーム位置監視システムの原理

本システムは、クレーンブーム頂点位置にGNSS受信機（アンテナ）を設置して、その3次元位置座標（ X_1, Y_1, Z_1 ）を測位して、即時的な位置監視を行うものである。制限範囲は、3次元形状領域としてあらかじめPC（パーソナルコンピュータ）で稼働するプログラムに登録しておく。PCに取り込まれたブーム位置座標が制限範囲の内外のどちら側にあるかを常に判定して、状態に応じた報知を行う。図-4に警報判定の概念図を示す。制限範囲にブームが入った危険時には、LED警報装置で赤色を点灯させ、警告音を鳴らして報知を行う。ブーム位置が制限範囲から離れている安全時には緑色の点灯を行う。

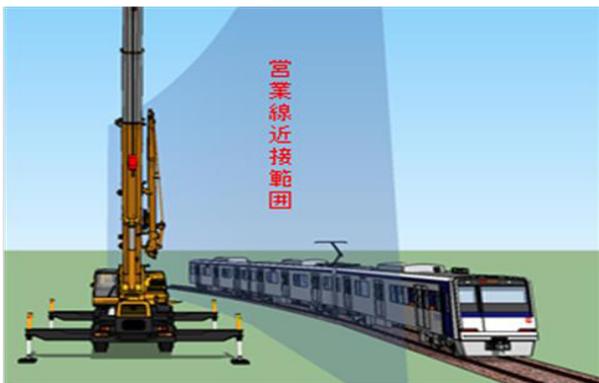


図-1 カーブ区間の営業線近接工事の概念



図-2 送電線近接工事の概念

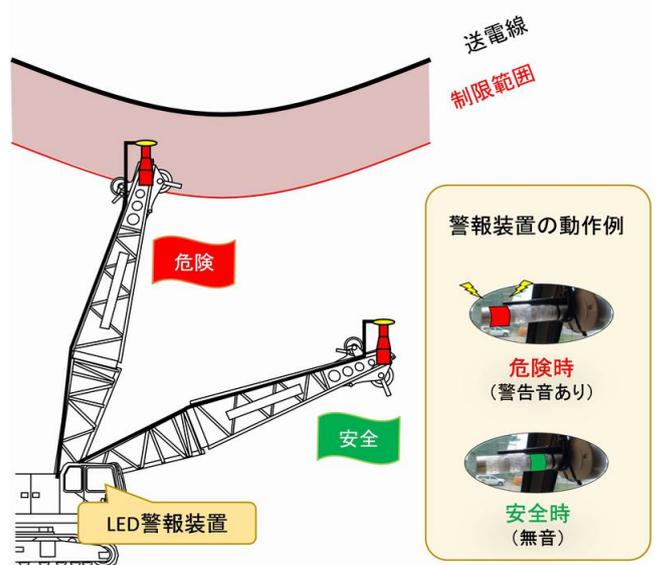


図-4 警報判定の概念

(3) システム機器構成

本システムの機器構成を図-5に示す。クレーンブーム頂点位置に設置されたGNSS受信機（移動局）の測位データを重機運転席に搭載したPCに無線LAN等で転送する。PCにて制限範囲との位置関係を判定して、侵入と判定された場合には、運転席のLED積層表示灯やスピーカーなどの警報装置を作動させる。さらにこれらの情報は、バーチャル空間での3次元表示システム（後述）を用いて同時に監視が可能である。

GNSS 基地局（固定局）は、衛星測位精度を向上する目的で、現場内の不動点に設置する。座標値が正確に判明している既知点に1台のGNSS受信機を設置し、無線（無線LAN，デジタル簡易無線等）を介して補正データを、クレーン側GNSS受信機（移動局）に送信する。

使用するGNSS機器は、使用目的や要求精度に応じて、RTK-GPS方式（数cm級の精度）およびDGPS方式（1m級の精度）を使い分けている。上空視界が必ずしも良好ではない環境条件においても利用の可能性を高めるため、GPS（米国）に加えてGLONASS（ロシア）の衛星も利用可能な受信機を採用している。

(4) 3次元警報範囲の設定

本システムでは、警戒監視を行う制限範囲を、直方体や六面体の3次元立体空間として定義している。範囲空間を規定する8頂点の座標(x, y, z)を監視プログラムにあらかじめ入力して設定を行う。

座標の入力は、世界測地系、日本測地系、ローカル座標など任意の測地系の座標を用いることが可能である。制限範囲の設定においては、複数の領域を同時に組み合わせることが可能であり、これによって複雑な形状の範囲の定義も容易に行える。例えば、送電線に近接した工事においては、場所毎に異なる制限範囲を全て一括して登録しておくことが可能である。これにより、クレーンが場内で移動しても、その位置に応じた適切な条件に基づいた監視を行うことができる。

また、使用するGNSS受信機の精度に伴う測位誤差や、計測処理タイムラグなどに対する安全余裕しを考慮して、監視するクレーン頂点位置を一定の大きさを持った仮想球体としてモデル化する機能を有している。この機能を用いると、実際に制限範囲内にブーム頂点が侵入する直前の接近状態（仮想球半径距離）において警報を作動させることができる。

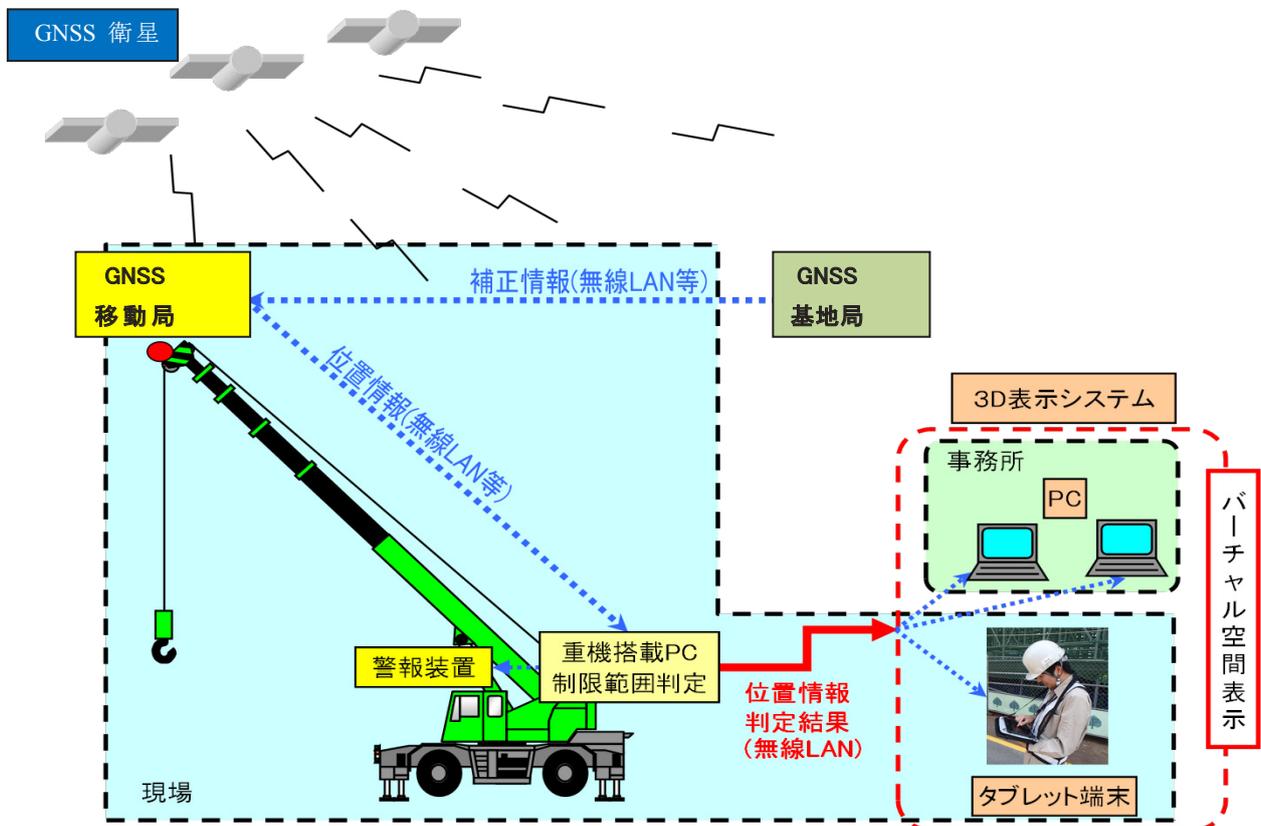


図-5 システム機器構成

さらに、警報に三色のLED積層信号灯を用いる場合には、ブーム位置が安全領域にある場合「青」、制限範囲に入った場合に「赤色」の表示に加えて、制限範囲に所定の距離まで近づいた場合は、要注意の「黄色」の点灯が可能である。またGNSSによる測位が良好に行えないなど、システムが正常に作動していない場合には、LEDの点滅によって注意喚起を行うものとしている。

(5) 機器のクレーンへの設置方法

クレーンへの機器設置については、電源の供給方法およびブームに沿った配線の有無等により、有線方式と無線方式の2種の方式を使い分ける。

a) 有線方式による設置

有線方式は、クレーンブーム長が変化しない、クローラクレーンやタワークレーンなどで用いる。GNSSアンテナのみをクレーンブーム頂点位置に設置して、GNSS受信機本体およびパソコンなどは運転席などに設置する。GNSSアンテナは専用の治具を用いて取付けを行い、クレーンブームの傾斜角度に応じて、自由に回転する機構を有している。これにより、GNSSアンテナが常に天頂を向くような仕組みとなっている(写真-1)。

クレーンブームに沿っては、アンテナ同軸ケーブルの配線を行う。本方式では、配線の手間がかかるが、機器電源が常時重機側から供給されるため、日々のメンテナンスが不要となる利点がある。ただしブーム伸縮への対応は難しい。

b) 無線方式による設置

無線方式は、ラフタークレーンなどのブームが伸縮するクレーンで用いる。クレーンブーム頂点位置にはGNSSアンテナ、GNSS受信機本体、デジタル簡易無線機、無線LAN装置およびバッテリーが設置される。機器は防水ボックスに収められ、治具によりブームに設置される。有線方式と同様に、GNSSアンテナが常に天頂を向く仕組みである(写真-2)。

GNSS受信機による測位データは、無線LANにより、運転席等の地上のPCに送られる。本方式は、ブームに沿った配線作業が不要なため、有線方式に比べて短時間での設置・撤去が可能である。ただし、バッテリーの交換・充電などの日々のメンテナンス作業が必要となる。

c) 運転席への機材設置

運転席には、監視ソフトウェアが導入されたPCおよびLED積層信号灯を設置する。運転席内に設置されたLED積層信号灯の一例を写真-3に示す。クレーンの運転者は、信号灯の色の変化および報知音に注意を払って作業を行う。



写真-1 ブーム頂点への機器設置状況 (有線方式)



写真-2 ブーム頂点への機器設置状況 (無線方式)



写真-3 運転席に設置したLED積層信号灯

(6) バーチャル空間での3次元表示システム

クレーン運転者への報知に加えて、施工管理を担当する現場職員が近接作業状況を容易に確認する目的で、バーチャルな空間での3次元表示システムを付加機能として開発した。

本システムでは、既存構造物や近接構造物等（送電線、道路等）および制限範囲をあらかじめ3次元モデルデータとして表示システムに登録を行う。現場職員が携帯するタブレット PC や現場事務所の PC に表示システムを導入しておき、クレーンブーム頂点位置の GNSS 測位結果および警報判定結果のデータを無線 LAN 経由で表示用 PC に転送する。これによって、クレーン頂点位置と近接物および制限範囲の関係が、3次元的にリアルタイムに PC 画面上で表示される。画面表示の視点位置を任意に設定・変更することが可能であるため、近接監視対象物とクレーンブームトップの位置関係を視覚的に容易に確認できる利点がある。

図-6は、送電線に近接したクレーンブーム位置監視の3次元表示の事例である。地上から見上げる監視員の視点では、両者の位置関係の把握が難しい問題がある。本システムを用いると、高所の送電線位置からの視点（上空を飛ぶ鳥の眼のような視点）で、接近状況を表示できるため、視覚的な状況判断が容易となる。本表示システムは、データを現場内のネットワークで共用できるため、作業場近傍だけでなく、遠隔地の事務所においても、クレーンの作業状況を同時にモニタリングすることができる。

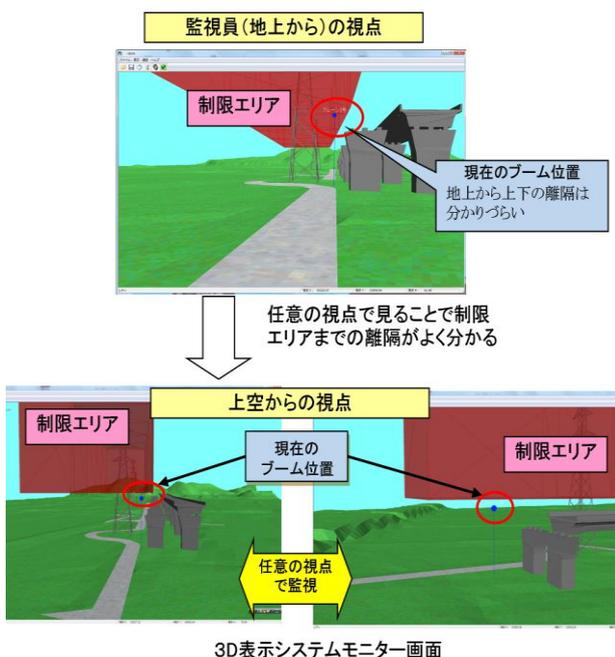


図-6 3次元表示システムの画面例（送電線近接）

3. 建設工事での適用事例

(1) 営業線近接工事への適用事例

本事例では、既設の営業線に近接した狭隘な作業空間において、高精度のクレーン安全対策が求められた。

工事名：つくばエクスプレス線、車両基地入庫線
複線化工事

発注者：鉄道建設・運輸施設整備支援機構 東京支社

工事場所：茨城県守谷市

施工者：三井住友・名工・佐田特定建設工事
共同企業体

実施期間：2013年12月～2014年10月

本工事は、営業中のつくばエクスプレス線本線と車両基地入庫線の高架橋間に、新たな車両基地入庫線の高架橋を構築するものである。新設される高架橋の基礎工事の際に、クレーンの営業線への接近警報を目的として、本システムを導入した（写真-4）。

監視対象区間の高架橋は、カーブ区間であり、従来の監視技術では、制限範囲設定が容易ではなかった。3D クレーンブーム位置監視システムを用い、高架橋のカーブ線形の座標に基づいて、精細にモデル化した3次元の制限範囲を設定し、工事の安全管理を実施した。基礎工事の進捗に応じて、クレーンが移動した場合でも、制限範囲は工事区域全体の座標に基づいて設定されているため、日々再設定は不要である。極めて限られた作業空間を有効に活用するため、GNSS受信機は、二周波 RTK-GPS方式を用いて、数 cm 級精度での管理を行った。工事の最盛期においては、最大5台のクレーン監視を同時に行った。その結果、安全面で極めて慎重を要する工事であったが、本システムの活用により、作業領域の有効活用と安全管理を効果的に実施し、当該近接工事を無事に完了した。



写真-4 営業線近接工事での実施例

(2) 高圧送電線近接工事への適用事例

3次元バーチャル空間でのリアルタイム表示を含めた、最新機能のシステムを本工事において適用した。

工事名：平成25年度 東海環状上切高架橋 PC 上部
工事

発注者：国土交通省 中部地方整備局

工事場所：岐阜県関市

施工者：三井住友建設株式会社

実施期間：2014年5月～2015年1月

本工事は、現在供用中の一期線の高架橋と並行して、二期線の高架橋を構築する橋梁工事である。工事区域内に近接して高圧送電線が存在し、施工位置に応じた離隔距離確保が求められた。

対象はラフタークレーンを主としたが、コンクリートポンプ車にも適用を行った。ポンプ車への機材設置においては、マグネット式の取付け治具を新たに開発し、極めて短時間での機材着脱を可能とした。

現場内および現場事務所間に無線 LAN 環境を構築し、3次元バーチャル空間でのリアルタイム表示システムを、タブレット PC および現場事務所の PC で利用した(写真-5および写真-6)。GNSS 受信機は、二周波 RTK-GPS 方式を使用し、数 cm 級の精度を確保した。

その結果、高圧送電線下において、作業安全性の確保が極めて重要な工事であったが、本システムの導入により、安全の見える化を促進し、確実に円滑な管理を行うことができた。

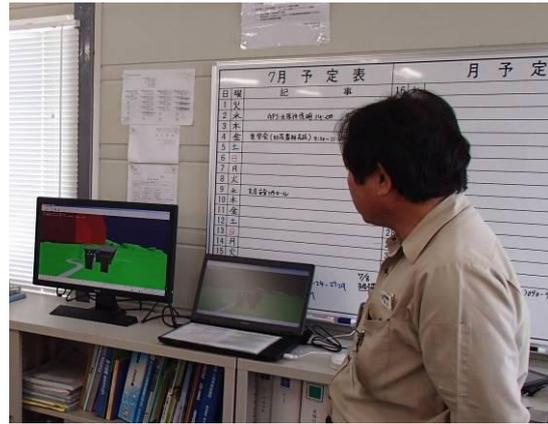


写真-6 事務所 PC で監視状況

4. おわりに

GNSS を用いたクレーンブーム位置監視システムは、初期の2次元監視版を含め、これまで国内7現場での適用事例がある。各現場での使用実績に基づいて、順次システムの改善、バージョンアップに継続的に取り組んでいる。

現在、建設分野においては、施工管理への ICT 活用とともに、設計から施工段階を含めた、BIM/CIMなどの3Dモデリングが積極的に進められている。これらの3次元モデルデータと3Dクレーンブーム位置監視システムの連携により、さらなる技術の応用展開が可能と考える。今後も引続き技術の改善を行い、建設工事の安全向上に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 三上 博：建設施工における安全対策への ICT 活用，建設機械，Vol.51，No.6，2015.6
- 2) 三上 博，千葉 史隆，伊達 峰司：3D クレーンブーム位置監視システムの実用化，建設機械施工，Vol.67，No.5，2015.5



写真-5 タブレット PC での監視状況