

建設機械の予防安全技術—マシンモニタリングシステムの開発—

Construction Machinery Active Safety Technology —Development of Machine Monitoring System—

嘉本 敬樹 Keiki Kamoto^{*1}

洗 光範 Mitsunori Arai^{*2}

梗概

建設現場で利用される重機（建設機械）に起因する災害を予防し、かつ効率的な重機作業を実現する技術「マシンモニタリングシステム」を新たに開発した。本システムは、GPSにより計測した重機の位置・姿勢情報を、3次元モデルデータで構築したバーチャルリアリティ空間上の重機モデルに反映することを特徴とする。現実とシームレスに連動するこの空間では、重機の指定範囲外への越境、構造物・他の重機との干渉をリアルタイムに監視しており、検知結果は表示装置、警報装置を介してオペレータへ伝達される。本システムを実プロジェクトに適用し、安全性、生産性を向上できる可能性を確認できたため報告する。

キーワード：建設機械、予防安全技術、ICT、GPS、バーチャルリアリティ空間、3D-CAD

Summary

We have developed "Machine Monitoring System" to prevent the accidents of construction machinery and to achieve high effective production. In this system, machine's positioning data from GPS sensor is reflected in virtual reality space constructed with 3D modeling data. In the virtual reality space that synchronizes seamlessly with real world, the system is real-time monitoring that the risk of going outside area and the risk of colliding with buildings and another machines. The detection results are transmitted to operator by display and alarm. Machine Monitoring System applied to real projects, and confirmed the possibility to improve safety and productivity.

Keywords: construction machinery, active safety technology, ICT, GPS, virtual reality space, 3D-CAD

1 はじめに

建設業の重機災害は長期的には減少傾向にあるが、ここ数年の減少率は鈍化している（Fig.1）。また、重機災害は第三者災害、重大災害に直結する可能性が極めて高いことから、現場近隣住民をはじめとした地域社会のかかえる不安は大きくなっている。こうした災害がひきおこす企業に対するイメージの低下や社会的信用力の低下、作業員の労働意欲・士気の低下など、間接的な損失も考慮すると、企業の安全に対するリスク管理の重要性はこれまで以上に高まっていると考えられる。従来日本では、人による安全確保（教育）と法・ルールによる規制を中心にして安全管理が進められてきた。しかし近年では人間の注意力の限界を認め、それをカバーする科学的なアプローチが求められるようになってきている。この考え方は労働安全衛生マネジメントシステムとして、2006年より努力義務化（労働安全衛生法第28条の2）されている。

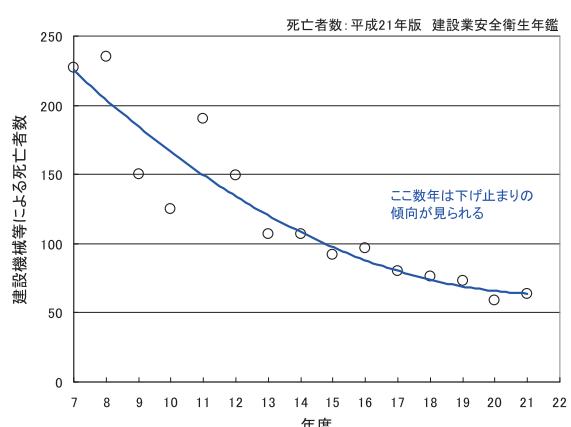


Fig.1 建設機械等による死亡者数の推移
Number of fatalities caused by construction machinery

*1 技術研究所 研究員 Researcher, Research & Development Institute

*2 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute

他方、建設業では低い労働生産性の改善が課題となっている。90年代に製造業の生産性が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、近年は概ね横ばいに近い動きとなっている。製造業では、3次元設計したデータを使い工作機械を制御することで、低成本で高品質な製品を作り出すことが可能であり、これが高い生産性を実現できる一つの理由であると考えられる。これに対し建設業では、大半の部材を現地で組立てる必要があり、生産設備を固定できないことから、設計データを3次元化しても、すぐに施工に活かすことができないという違いがある。しかしながら近年、GPS（Global Positioning System）などの測量機器、通信機器、コンピュータなどの情報通信技術（ICT：Information and Communication Technology）が発達したことにより、従来はできなかったリアルタイムの位置計測が可能となってきた。このICTを活用し、建築現場で使用する生産設備の正確な位置と設計データがあれば、製造業のように効率的で高品質な施工を実現できる可能性がある。

このような背景から、建築生産の代表的な生産設備であるクレーン、解体機などの建設機械に对象を絞り込み、建築現場の安全・安心を確立し、労働生産性を向上させるための研究に着手した。その第一段として、建機オペレータの状況認知・判断能力の不足を補う装置「マシンモニタリングシステム」を新たに開発した。以下では、開発システムの概要および実プロジェクトでのフィールド試験から得られた知見、今後の展開について報告する。

2 マシンモニタリングシステムの概要

2.1 システム構成

Fig.2にマシンモニタリングシステムの基本構成を示す。本システムは、GPSなどにより計測した重機の位置・姿勢情報を、3次元モデルデータで構築したバーチャルリアリティ（Virtual Reality, VR）空間内の重機モデルに反映し、「見える化」することを特徴とする。現実とシームレスに連動するVR空間では、重機の指定範囲外への越境、構造物・他の重機との干渉をリアルタイムに監視しており、その検知結果は表示装置、警報装置を介してオペレータへ伝達される。本システムを適用することで、重機オペレータの誤認識、注意力低下に起因する災害発生リスクを低減することができる。また重機オペレータは作業に専念できることから、作業能率を向上できると考える。無線LANを介して重機の位置・姿勢情報を現場事務所などに送信することで、遠隔地からも重機の作業状況を監視することができる。

2.2 位置検出器

重機本体位置の計測、クレーンブーム先端位置の計測には、RTK-GPS（Real Time Kinematic GPS、動的干渉測位）に対応したGPS測量機を採用した。RTK-GPSでは、水平方向1cmの精度でリアルタイム位置検出が可能である（Table 1）。RTK-GPSを行う際には、計測対象となる重機に設置するGPSアンテナ（以下、計測点）とは別に、地面付近の既知座標に設置され計測点の基準となるGPSアンテナ（以下、基準点）が必要となる。この基準点は不動点である必要があり、かつGPS衛星からの電波を受信できるように上空が開けている必要がある。建設途中の現場敷地内で、前述したような条件の場所に基準点を常時設けることは難しい。そこで、本システムでは仮想基準点（VRS：Virtual Reference Station）方式を採用することとし、物理的な基準点を省略することにした。VRS方式とは、観測地域周辺の複数の電子基準点における観測

データから、計測点近傍の位置に仮想的な基準点をつくり、あたかもこの地点で得られるであろう観測データを生成し、VRSデータとして配信する仕組みである。後述する適用事例では、VRSデータを配信する日本GPSデータサービス（株）と契約し、FOMA回線を使って、計測点と仮想基準点の間のデータのやりとりをしている。

重機に設置するGPSアンテナの取り付け位

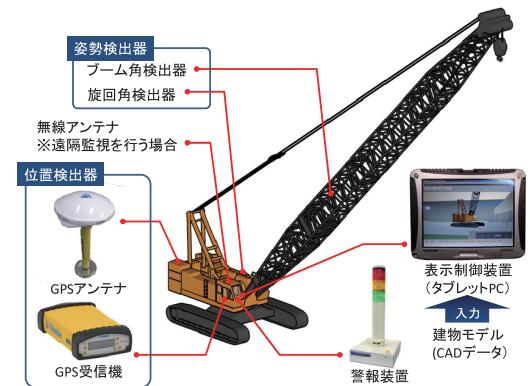


Fig.2 基本システム構成
Basic system configuration

Table 1 GPS測位の精度
Typical GPS accuracies

| 測位の種類 | 単独測位 | D-GPS | RTK-GPS |
|------------|----------|-------------------------|--------------------|
| 測位精度 (rms) | 10 – 15m | ~1m | ~1cm 水平 ~2cm 垂直 |
| 測位方法 | | PRNコード測位 | 位相差測位 |
| 測位に必要な衛星数 | | 4 | 4 (初期化以降) |
| 初期化に必要な衛星数 | | – | 5以上 |
| 補正情報 | 不要 | 中波ビーコン基地局またはMSASからの補正情報 | 基準点設置またはVRSデータ |

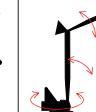
置は、以下の点を総合的に判断した上で、プロジェクト毎に決定している。

- ・GPS衛星の遮蔽、マルチパスの影響を受けにくい部位（地上高が高い方が有利であるが、メンテナンス性は低下）
- ・メンテナンス性の良い部位
- ・損傷の危険性が少ない部位
- ・高精度な測位が必要な部位（重点的に監視する必要がある部位）

2.3 姿勢検出器

重機の状態をより詳細に監視したい場合には、位置検出器に加え、可動部毎に姿勢検出器を取り付ける。重機は種別により動作自由度が異なるため、用途に応じた姿勢検出器を必要数設置する必要がある。代表的な重機の動作自由度をTable 2に示す。例えば、クローラクレーンのブーム仕様の場合は、車両位置情報の他、車両方位角を検出するセンサ、旋回角を検出するセンサ、ブーム角を検出するセンサが必要となる。ただし、これらの重機は旋回角、起伏角などの姿勢変化により、吊り上げ能力が異なるよう設計されていることが多く、姿勢検出器を予め備えている場合もある。後述するフィールド試験では、建機メーカーの協力を得て、予め建機に備わっている姿勢検出器のデータを利用した。

Table 2 動作自由度
Degree of freedom of motion

| 種別 | ホイールクレーン | | クローラクレーン | | タワークレーン |
|-------|---|--|---|---|---|
| | ブーム仕様 | ジブ仕様 | ブーム仕様 | タワーフロント仕様 | |
| 外観 |  |  |  |  |  |
| 車輌位置 | 3自由度 | 3自由度 | 3自由度 | 3自由度 | 固定 |
| 車輌方位角 | 1自由度* | 1自由度* | 1自由度* | 1自由度* | 固定 |
| 旋回角 | 1自由度 | 1自由度 | 1自由度 | 1自由度 | 1自由度 |
| ブーム長 | 1自由度 | 1自由度 | 固定 | 固定 | 固定 |
| ブーム角 | 1自由度 | 1自由度 | 1自由度 | 1自由度 | 1自由度 |
| ジブ長 | - | 1自由度 | - | 固定 | - |
| ジブ角 | - | 1自由度 | - | 1自由度 | - |
| 自由度合計 | 7自由度 | 9自由度 | 6自由度 | 7自由度 | 2自由度 |

*車輌方位角はヨー角のみ（水平堅土な作業床での使用を前提）

2.4 建物モデルデータ

近年は3次元CADのデータ活用が進められ、さらに時間的要素を付加した4Dシミュレーションも数多く試行されている。これらのデータを活用すれば、建物モデルデータを作成する手間を大幅に省略することができる。今回はDXF形式のCADデータを、制御ソフトに入力する仕様とした。作図の際、CADデータにレイヤ情報を付加しておくことで、制御ソフト上ではレイヤ単位の表示・非表示の切換えが可能となる。この機能を利用すれば、建物形状を実際の施工の進捗に合わせたVR空間を構成することができる。

2.5 ローカル座標への変換

GPS測量機で計測した位置情報は、WGS-84座標系、WGS-84標準円体における緯度、経度、標準円体高で示される3次元座標値である。これに対し、建物モデルデータはCAD上の原点を中心としたローカル座標で定義されている。実空間における重機と建物との位置関係を、VR空間上の重機モデルと建物モデルに反映させるためには、座標変換係数（平行移動量および回転角）を事前に決定しておく必要がある。座標変換係数は、GPS測量機を用いて現場



Photo 1 実空間
Real space

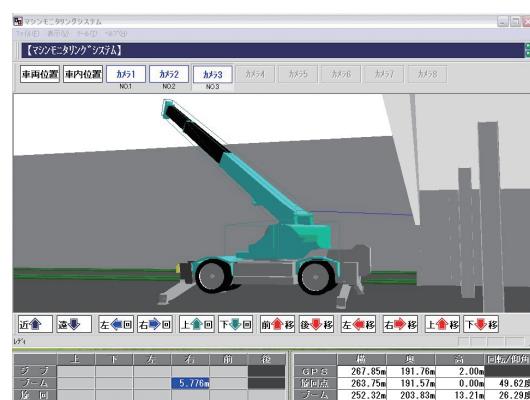


Fig.3 VR空間 (モニタ画面)
Virtual reality space (Monitor screen)

敷地内の基準となるポイントを2点以上計測することで決定する。座標変換が正常に行われると、実空間（Photo 1）とVR空間（Fig.3）はシームレスに連動することになる。

2.6 安全管理機能

① モニタ表示

重機を操作する際、運転室から肉眼で直視できない死角は、数多く存在する。このため従来は、カメラを設置したり、合図者の指示に従って操作を行ってきた。本システムでは、運転室に設けた表示制御装置（タブレットPC）にVR空間を映し出すことで、実機と建物、他の建機との相対的な位置関係をあらゆる視点から客観的に視認することが可能である。また、床補強範囲などはカラーコーンにより区画が設けられている場合は良いが、これが無い場合には肉眼での認識が困難であり、現に重機の倒壊事故も発生している。施工計画がより複雑化する中で、実際には見えない情報（施工計画など）を見える化する意味でも本システムは有効であると考える。

敷地の越境あるいは建物との衝突を事前に防止する手段として、重機を構成する可動部位毎に衝突判定範囲（機械寸法+限界管理値）を割り付け、この衝突判定範囲を用いて越境・衝突判定を行っている（Fig.4）。限界管理値は安全余裕度であり、オペレータの技量、重機の移動スピード等を考慮して設定することで、制御装置が安全側に動作するようにしている。衝突判定範囲と障害物との離隔最短距離 [L] は常時演算処理で求め、判定の結果、危険性がある場合には注意・警告メッセージを表示する（Fig.5）。また機器の接続不良、GPS測位が正常にできない場合にはエラーメッセージを画面に表示する。

② 警報装置

オペレータが作業に集中している場合、モニタ表示を見落とすなどのヒューマンエラーの発生は否めない。したがって、ブザー付きのパトライトを搭載することで、安全性を強化した。警報は設定した離隔最短距離 [L] に応じて3段階設定し、通常状態を緑色、注意状態を黄色、警告状態を赤色としている。また、注意、警告の状態ではブザーの断続、連続音にて注意喚起を促す。

3 都心部におけるGPS測位の課題と対策

3.1 GPS測位の誤差要因

本システムを2件のプロジェクトへ適用した後、重機オペレータ、現場担当者へヒアリング調査を行った。その結果、表示・検出の精度、リアルタイム性に関しては満足できるという意見を得られたが、システムの可用性（Availability）と保全性（Integrity）に関する改善要望が多く寄せられた。そこでシステム稼働期間中のログデータを分析したところ、可用性、保全性が低い要因は、主としてGPS測位に起因していると考えられた。GPS測位は土木、海洋工事などでは情報化施工技術として広く普及し始めているが、これらの場合には上空の開けた広大な敷地での活用事例である。これに対し建築工事は、都心部に位置する（周囲を高層建物に囲まれている）ことがほとんどであることから、常時安定して高精度の

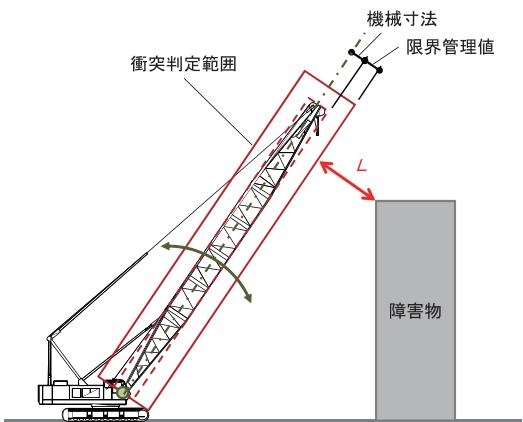


Fig.4 衝突判定範囲概念図①
The concept of collision range ①

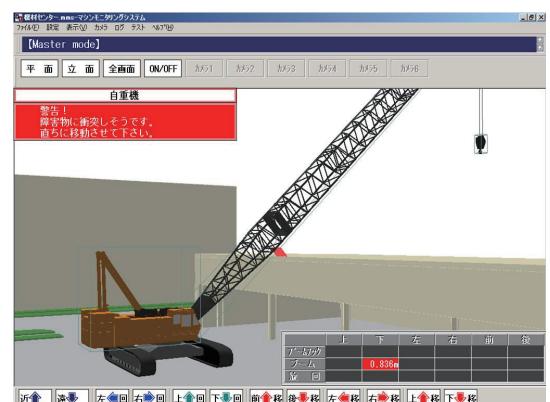


Fig.5 警告メッセージ
Warning message

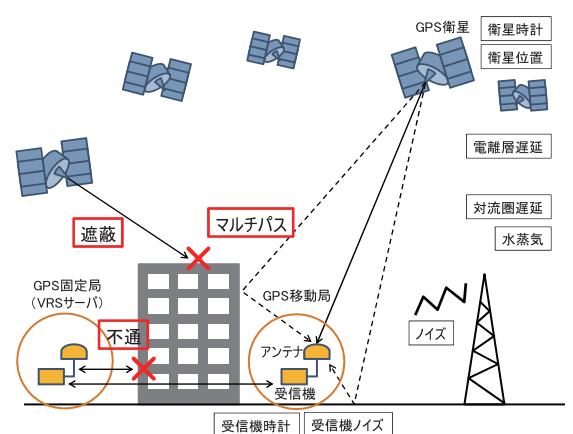


Fig.6 GPS測位の誤差要因
Error factor of GPS survey

GPS測位を行えるとは限らない。GPS測位の誤差要因をFig.6に示す。この誤差要因の中で、建築工事で特に問題となるGPS衛星の遮蔽、受信機間の不通、マルチパスの影響を考慮したシステム設計に見直す必要があると判断した。

3.2 GPS衛星の遮蔽、受信機間の不通対策

Fig.7に改善前（A工事、B工事）における計測日毎のGPS有効データ取得率（有効データ／総データ）のヒストグラムを示す。ここでの有効データとは、GPS測位の種類で最も精度が良いRTK-GPS（測位精度1cm）のデータのみを示す。RTK-GPSは計測精度が良い半面、測位に必要な衛星数は5基と多く、また仮想基準点からのVRSデータが必要になるため、これらの条件・データがそろわない場合には測位が成立しない。このためRTK-GPSが成立しない時間帯が多く発生し、システム適用期間中の有効データ取得率が平均64%と低い値となったと考えられる。また、有効データ取得率は日によってばらつきが大きいことがわかる。これは重機の作業エリアが日々変化し、GPSの受信状態が一様でないことに起因していると考えられる。

そこでシステムの可用性を高めるための対策として、精度の劣るD-GPS（測位精度数m）も有効なデータとして取り扱うこと、有効データ取得率を向上させることとした。なお、D-GPSは測位に必要な衛星数は4基であり、VRSデータは不要である。しかしこの場合には、RTK-GPSとD-GPSの、計測精度の異なる2種のデータが混在するという新たな問題も発生する。そこでさらなる対策として、測位の種類に対応した測位精度を基に、重機モデルを構成する衝突判定範囲（機械寸法+限界管理値+測位精度）を、リアルタイムに変更する機能を新たに追加した（Fig.8）。これにより、測位精度が劣化している場合には、衝突判定ブロックが大きくなり、より手前（安全側）で衝突判定機能が動作し、安全を確保できるようになる。測位の種類測位精度は、GPS出力値（GGAメッセージ）に含まれる「データの質の指標」を利用することで、座標値と一緒に取得することができる。

この改良を実施した後、C工事にシステムを適用し、効果を確認した。Fig.9に有効データ取得率を示す。結果として、有効データ取得率は平均で90%以上となり、計測日によればつきも小さく、システムの可用性は向上したといえる。

3.3 マルチパス対策

Fig.10はC工事における重機に取り付けたGPSアンテナの移動軌跡を示す。作業開始時から終了時まで約12時間、8秒毎の座標値を敷地平面図にプロットした。敷地範囲を逸脱した点が多数存在しているように見えるが、実際の重機の動きとは異なっている。これらの点は、マルチパスに起因する“誤差を含んだ出力値（エラー出力値）”であると考えられた。エラー出力値の発生頻度は、日によって異なっていたが、おむね有効データの1~5%である。発生頻度は多くはないが、

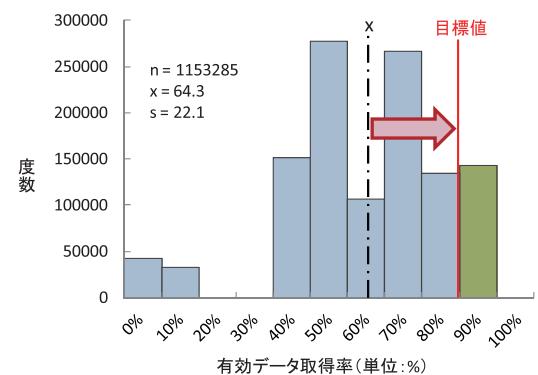


Fig.7 有効データ取得率 (A,B工事)
Effective data acquisition rate (A,B)

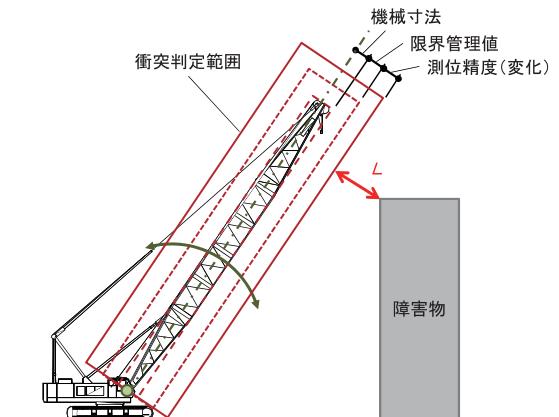


Fig.8 衝突判定範囲概念図②
The concept of collision range ②

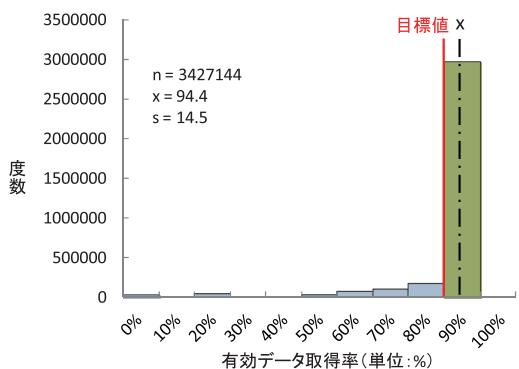


Fig.9 有効データ取得率 (C工事)
Effective data acquisition rate (C)

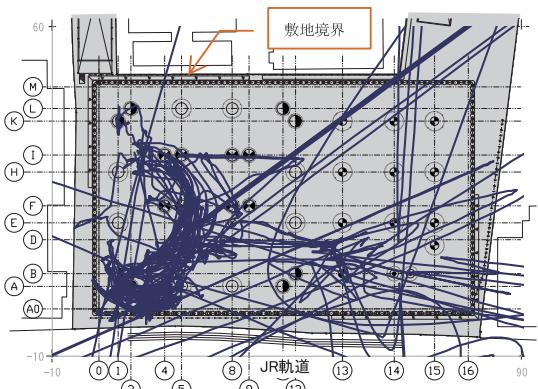


Fig.10 計測点の移動軌跡 (マルチパス含む)
Traversing path of GPS survey point (include multipath)

システムの誤表示・誤動作を引き起こし、意図しないタイミングで警報装置が動作するなどオペレータへ与える不快感は大きい。

マルチパス誤差低減手法としては、アンテナ設置場所による低減、チョークリングアンテナ等のアンテナによる低減、受信機の信号処理による低減等が考案されているが、完全な除去技術は確立されていない。本システムでは、マルチパス誤差を低減するのではなく、マルチパスを含んだエラー出力値を後処理で判別する機能を付加し、システムの誤表示・誤動作を低減させることにした。

一つ目に着目したのは、GPS測位データのZ座標である。重機は平面的(X, Y座標)に広範囲に動き回ることが想定されるが、高さ(Z)方向の動きはブーム長、起伏角で機械的に制限されている。重機を設置している地盤面のZ座標(楕円体高あるいは標高)は既知であることから、GPS計測点のZ座標には上限値、下限値の閾値を設けることができる。したがって、この閾値を超えた場合には、エラー出力値であると判定できる。

二つ目に着目したのが、計測点の移動速度である。作業中の重機の移動速度(可動速度)は、人の動きと比較しても速くはない。C工事で使用した重機は、ブームの先端にGPSアンテナを取り付けている。このときアンテナ移動速度が2.0m/secを超えた場合に、エラー出力値が発生していることがこれまでの計測データから読み取れた。このような場合には、計測点の移動速度に2.0m/sec以下という閾値を設定することが有効であるといえる。

Z座標(楕円体高)と移動速度の変化を時系列でグラフ化したものを見たものをFig.11に示す。Z座標が閾値を超えたタイミングでは、移動速度も閾値を超えていることがわかる。他日の計測データについても、同様の処理を行った結果、有効データに含まれるエラー出力値の90%以上を除去でき、保全性を高めることを確認した。

Fig.12に先の処理を行い、エラー出力値を取り除いた後の計測点の移動軌跡を示す。

3.4 システム制御フロー

Fig.13は対策後のシステム制御フローであり、色つきのプロセスが新たに追加した項目である。対策前と比較して、可用性は20%向上、システム誤動作の発生頻度を10%以下になるまで保全性を高めることができた。なおデータの質、楕円体高、移動速度が不適合となった場合には、GPS測位が正常に行われていないことを伝えるエラーメッセージを画面出力し、オペレータへ注意喚起を促す仕様としている。ただしエラーメッセージ出力時間中は、正確な状況を監視できていなければならず、GPS測量機とは別のセンサを用意し、位置情報を補完する機能を付け加えることが今後の課題と考える。

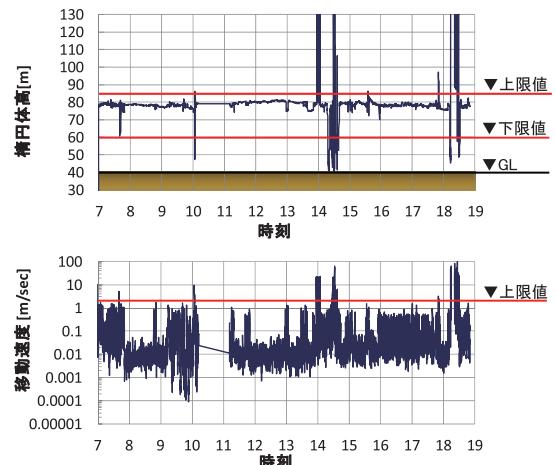


Fig.11 楕円体高と移動速度
Ellipsoidal height and Moving velocity

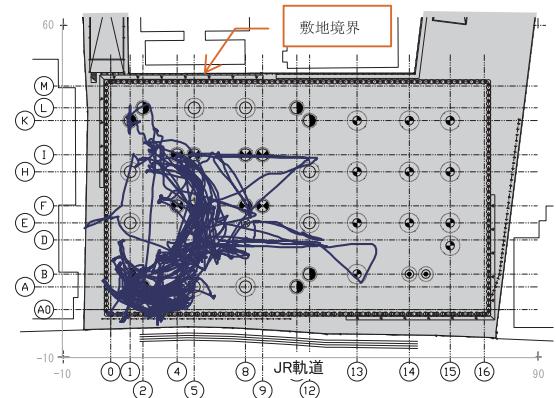


Fig.12 計測点の移動軌跡（処理後）
Traversing path of GPS survey point (after process)

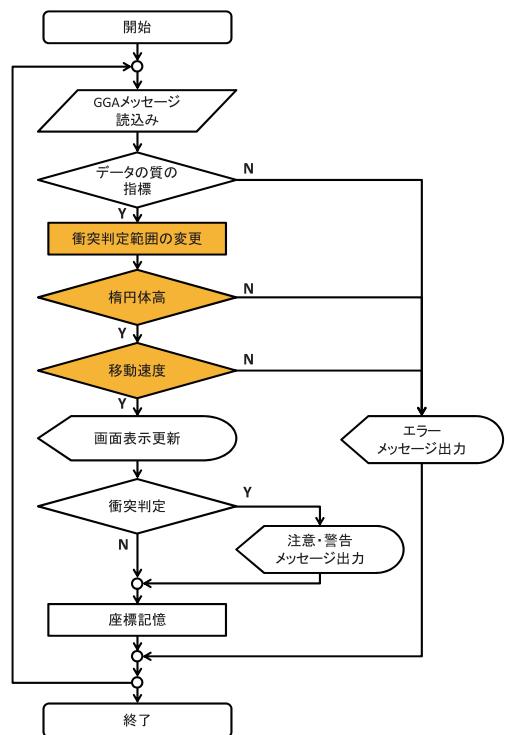


Fig.13 制御フロー
Control flow

4 適用事例

4.1 鉄道近接作業での適用 (C工事)

鉄道に近接するプロジェクトでは、軌道上へクレーンが越境し、鉄道輸送に支障をきたすことがないよう十分な安全対策が求められる (Fig.14)。このような場合には、クローラクレーンのブーム先端にGPSアンテナを取り付け (Fig.15)，敷地境界とブーム先端の位置関係を「見える化」することが有効である (Fig.16~17)。本工事で対象とした重機は山留め工事用の相番クレーンであり、敷地境界際での作業が断続的に発生した。重機オペレータからは、こうした作業の際に警報装置が正確に反応するため、作業にメリハリをつけることができたという意見を得ている。



Fig.14 敷地状況
Site status



Fig.15 GPSアンテナ設置状況
Situation of attached GPS Antenna



Fig.16 クレーン操作状況
Situation of crane operation



Fig.17 モニタリング画面
Monitor screen

4.2 解体工事での適用例 (B工事)

通常、階上解体工法では、重機を設置する床の直下には補強サポートが必要となる (Photo 2)。重機オペレータからはこの補強サポートを視認することは困難であり、ガラが堆積した床面に補強範囲を示す区画を設けることは現実的ではない。そのため重機作業に必要でない範囲についても床補強を行うことが一般的とされる。これに対し本事例では、床補強範囲を必要最小限にとどめるというリスクへの対策として、マシンモニタリングシステムを採用した (Fig.18)。結果として重機の作業



Photo 2 補強サポート設置状況
Situation of reinforcement support

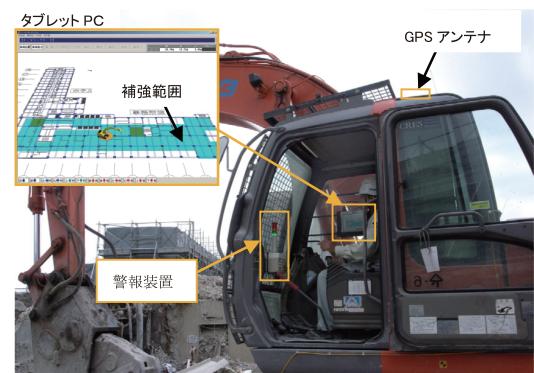


Fig.18 重機操作状況
Situation of dismantling machine operation

範囲は安全なエリアのみに限定でき、全体工程の短縮、床補強費は全面床補強を行うとした当初計画案と比較して約3割低減することができた。

4.3 3次元モニタリングの適用例（A工事）

クローラクレーンのタワーフロント仕様（Photo 3）は、建物越しにかつ広範囲に荷を揚重できるというメリットがある半面、運転室からは肉眼では視認できない死角が多く発生し、他の重機と比較しても災害発生リスクは高い。通常はジブ先端にカメラを吊り下げ、フック周辺の限られた範囲の死角を補うようしている。この事例ではカメラに加え、本システムを採用することで、全体を俯瞰するような角度で作業状態を見える化し、かつ重機と建物の近接状態を監視した（Fig.19）。旋回角の検出には、GPS方位計を採用（Fig.20）し、ブーム角、ジブ角はクレーン本体に内蔵された姿勢検出器のデータを採用している。3次元モニタリングでは、重機の姿勢も正確に監視していることから、クレーン操作中に吊り荷、ブームおよびジブに注意が集中している場合にも、旋回フレーム後方部と建物との接触等、通常は気付きにくい危険を早期に発見できると好評であった。



Fig.19 クレーン操作状況
Situation of crane operation



Photo 3 クローラクレーンタワーフロント仕様
Crawler crane with tower boom and luffing jib

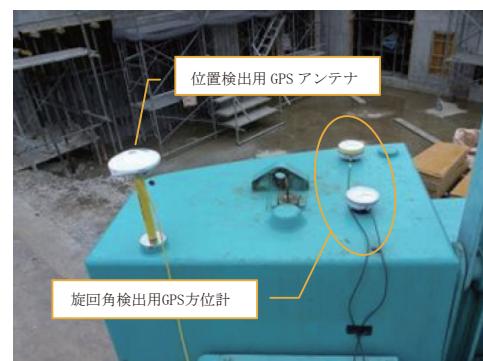


Fig.20 GPSアンテナ設置状況
Situation of attached GPS antenna

5 まとめ

本稿では、ICTを活用した建設機械の予防安全技術「マシンモニタリングシステム」の開発について報告した。またフィールド試験の結果から、都心部におけるGPS測位の課題を抽出した。GPS衛星の遮蔽、受信機間の不通対策として、測位精度に応じた衝突判定範囲の変更処理、マルチパス対策としてエラー出力値除去処理を提案し、その効果を確認した。

今後は実プロジェクトへのシステム適用件数を増やし、安全性、生産性向上に関する定量的評価を行っていく予定である。また、現システムでは重機オペレータの認知・判断能力の不足を補うことに主眼を置いているが、最終的には危険の自動回避、自動運転機能などを実装し「建設機械の知能化」を目指したい。

参考文献

- 1) 嘉本敬樹、洗光範、志手一哉、近藤正芳：「建設機械の予防安全技術—マシンモニタリングシステムの開発—」、第12回建設ロボットシンポジウム、2010
- 2) 嘉本敬樹、洗光範、陳雨晴：「ICTを活用した建設機械災害防止への取り組み GPSを利用したマシンモニタリングシステムの開発」、建設の施工企画、No.725、2010
- 3) 杉本末雄、柴崎亮介：「GPSハンドブック」、朝倉書店、2010
- 4) 飛田幹夫、「世界測地系と座標変換」、社団法人日本測量協会、2002