

技術論文

超大型油圧ショベル遠隔操作システム

Teleoperation System for Ultra-large Hydraulic Excavators

森 永 淳
Jun Morinaga

2021年9月、米国ネバダ州ラスベガスで開催された鉱山機械見本市「MINExpo INTERNATIONAL 2021（以下、「MINExpo2021」）」において、展示会場に設置した遠隔操作席から、約650キロ以上離れた米国アリゾナ州に設置した超大型油圧ショベル「PC7000-11」を遠隔操作して、無人専用運搬車両「Innovative Autonomous Haulage Vehicle」との協調による無人作業のデモンストレーションを実施した。本稿ではその遠隔操作システムについて報告する。

Komatsu demonstrated the teleoperation in Las Vegas, Nevada, at MINExpo2021. From the console installed in the exhibition hall, we remotely controlled the PC7000-11, ultra-large hydraulic excavator located in Arizona more than 650 kilometers away from the exhibition hall. The PC7000-11 loaded soil to autonomous vehicle “Innovative Autonomous Haulage Vehicle”. This paper reports on the teleoperation system.

Key Words: 遠隔操作, 自動動作, 無人作業, 拡張現実, 油圧ショベル, 無人ダンプトラック

1. はじめに

コマツは無人ダンプトラック運行システム（Autonomous Haulage System 以下、「AHS」）を2008年に業界で初めて商用導入した。以来、世界4か国21鉱山で稼働しており、累計稼働台数は2022年12月時点で600台を達成している。鉱山機械における更なる無人化を進める手段として超大型油圧ショベル「PC7000-11」の遠隔操作システムを開発し、MINExpo2021にて無人専用運搬車両「Innovative Autonomous Haulage Vehicle」への積み込み作業のデモンストレーションを実施した。デモンストレーションで紹介した遠隔操作システムについて説明する。



図1 デモンストレーションの様子

2. 遠隔操作システム概要

2.1 コンセプトおよびシステム

本遠隔操作システムは、AHSが稼働している鉱山現場において無人ダンプトラックへの積み込みを行う油圧ショベルを遠隔操作化するものである。油圧ショベルにはカメラ、センサ、無線機などが取り付けられ、遠隔操作席は鉱山現場より遠く離れた場所に設置される。本システムにより、以下に述べる新たな価値を社会および顧客に提供する。

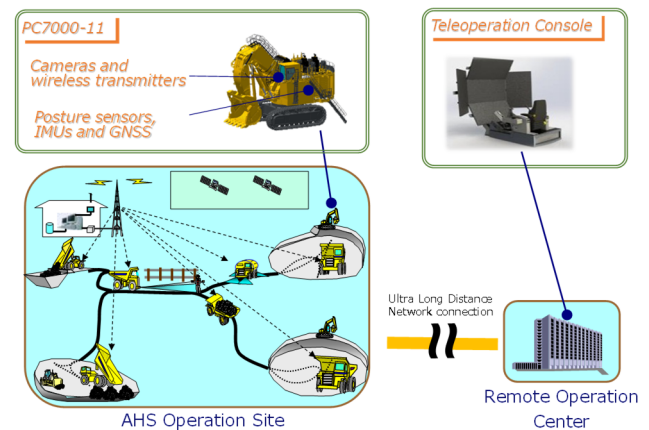


図2 コンセプト

(1) 安全性の向上

- ・ 作業者のいない鉱山作業現場の実現

(2) 生産性の向上

- ・ オペレータの交代、休憩による稼働休止時間の極小化
- ・ オペレータへの操作支援情報の提供
- ・ 追加カメラ、Augmented Reality（仮想現実、以下「AR」）による、搭乗操作以上の現場状況の認識・把握
- ・ 遠隔操作システムにより得られる大量のデータを用いた効率的な鉱山生産管理、オペレータの教育訓練

(3) 働き方改革

- ・ オペレータへの快適な労働環境の提供
- ・ 多様な人々が鉱山で働ける機会の創出

(4) コスト低減

- ・ 居住地から遠く離れた鉱山現場でのオペレータ確保に係わるコストの低減

2.2 機器構成

2.2.1 油圧ショベル（PC7000-11）

遠隔操作化する油圧ショベルは、積み込み対象である無人ダンプトラックのサイズとベストマッチングであり、かつ、標準の車体制御システムが完全電子化されているPC7000-11を選定した。「遠隔キット」と呼ぶ、カメラ、センサ、無線機、専用コントローラなどの追加電子機器一式をPC7000-11に取り付けることで遠隔操作が可能となる。



図3 遠隔キットを搭載したPC7000-11

2.2.2 遠隔操作席

遠隔操作席はPC7000-11のオペレータトレーニングシミュレータを製造販売するイマーシブテクノロジーズ社（Immersive Technologies, 以下「イマーシブ社」）が、トレーニングシミュレータで培われた数々の技術やノウハウを活用して開発した。機器として主に下記のユニットにて構成されている。

(1) 大画面モニタ

モニタサイズ、枚数、レイアウトを機種や用途に応じて変更可能。

(2) シート、コンソール

実車と同じ感覚で操作できるよう、操作に係わる部品はすべてPC7000-11と同一の物を使用。ペダルやレバーの配置も実車と同一である。

(3) コントロールユニット

オフィス環境での設置の為、車載では実装が困難な高性能のCPUやGPUを使用。

(4) 管理者用モニタ

オペレータの現在の作業状況や過去のデータを管理者やトレーナーがいつでも閲覧可能。ARや操作支援情報のサイズ・レイアウトも本モニタ上で設定する。



図4 遠隔操作席（全景）

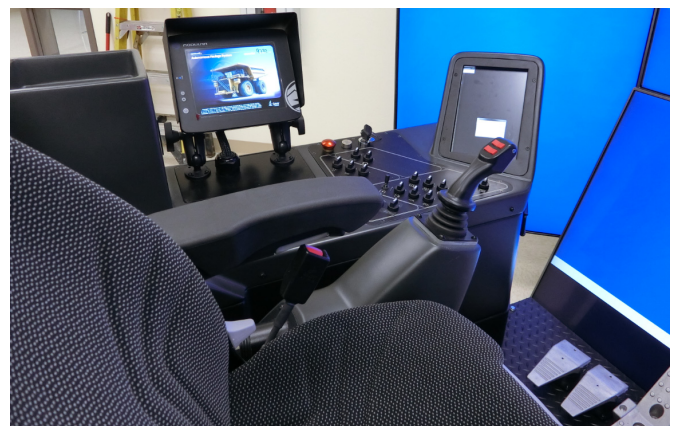


図5 遠隔操作席（コンソール部分）

3. 遠隔操作システムの機能・性能

3.1 概要

遠隔操作システムは、安全性の向上やオペレータへの快適な労働環境提供といったさまざまな利点がある反面、通常の搭乗操作と比較し作業効率が低下する^[1]。搭乗操作と遠隔操作を比較した場合、その作業効率は5割とも言われている^[2]。

本システム開発に当たり、まず最初にイマーシブ社が製造販売しているオペレータートレーニングシミュレータ上にて、遠隔操作のシミュレーション環境を構築した。シミュレータ内の視界、画質、映像遅延時間など遠隔操作のパラメータ水準を振り、作業効率低下の要因とその寄与度を洗い出した。更にその結果を踏まえ、より高い作業効率を得られるシステムパラメータおよび機能追加の効果をシミュレータ上で確認した。これにより実機を使用してのテストと比較し、早いサイクルでトライアンドエラーを繰り返すことが出来た。また、シミュレータと遠隔操作席はほぼ共通のコントロールユニットプラットフォームにて動作するため、シミュレータで作り込んだ操作支援情報などの機能は、ほぼそのまま実際の遠隔操作システムに流用出来た。

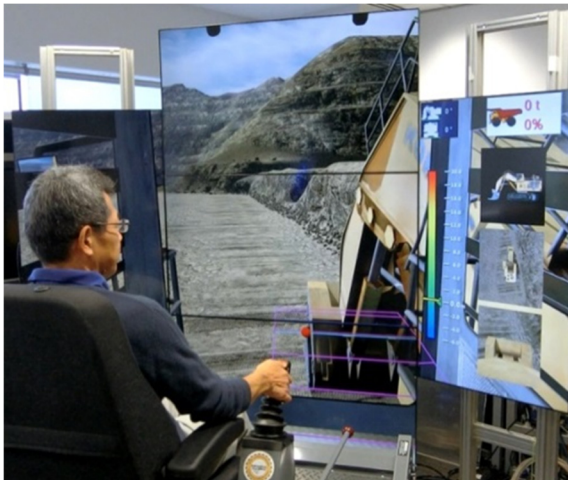


図6 シミュレータでのテスト

シミュレータでのテストおよび作り込み完了後、実機を用いた実システムを構築し、実機試験場にて実機テストを実施した。一連の開発で実装したさまざまな機能を本遠隔操作システムに組み込むことにより、追加機能の無い遠隔操作システムと比較して作業効率を向上させ（37%）、搭乗操作とほぼ同等の時間当たり積み込み作業量を達成した。以降の記述によりその機能の詳細を説明する。

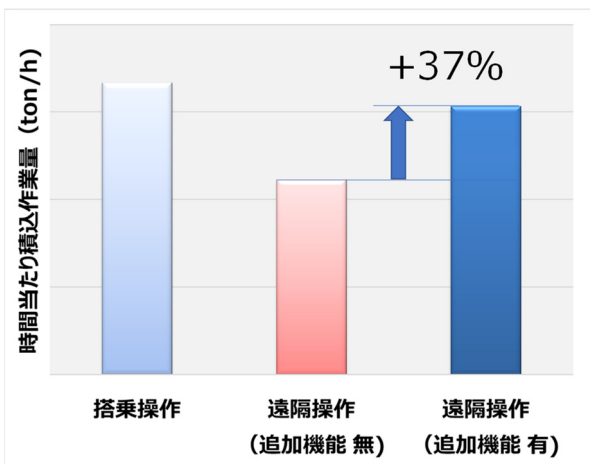


図7 実機作業効率

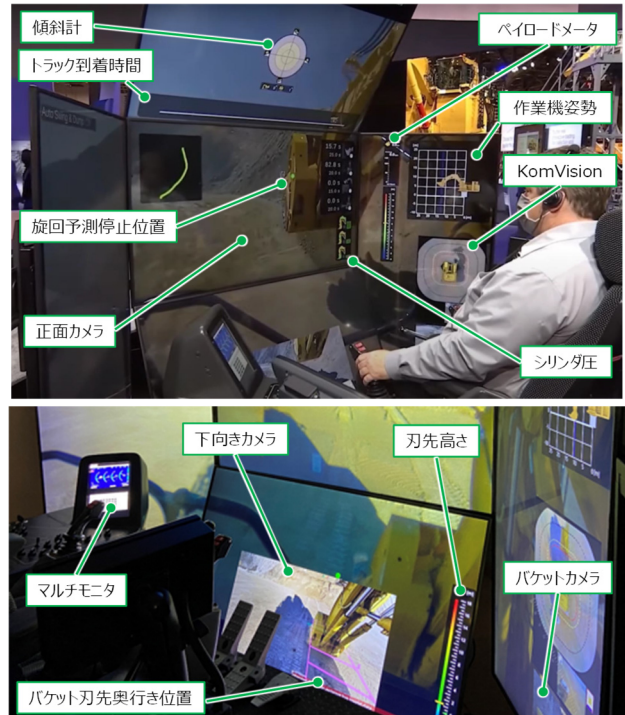


図8 実機での遠隔操作席

3.2 カメラ映像（高画質，低伝送量，低遅延）

前述のシミュレータでの検討・テストにより、オペレータに搭乗相当の視界を提供する「正面カメラ」の画質はHD解像度でも一連の通常操作は可能であるとの結論を得た。しかしオペレータは不鮮明な映像での操作に負担を感じ、官能的な側面でも高い評価を得られなかった。また、掘削場所の細かい礫の大きさや土砂の状態が把握しにくく、鉱山現場によっては掘りたい鉱石とその他の土砂の違いを映像で判断するのが難しくなる点が懸念された。

対策としてカメラ性能（解像度）を上げたり、カメラの数を増やし映像を合成する方法がある。しかし、鉱山稼働現場における外気温・振動・ホコリなどの過酷な稼働環境に適合する高性能カメラのコストや入手性・補給性には一定の制約がある。また、映像を超遠距離で無線を介して送信するため、遠隔操作席に送信可能な映像データサイズ（伝送量）にも上限がある。映像データの圧縮率を高めることによりデータサイズは削減可能ではあるが、背反として映像の圧縮・解凍に時間がかかり遅延時間増加によって作業効率が低下する。

そこで本システムでは正面カメラにフルHDカメラを採用し解像度を高めると同時に、映像の圧縮・解凍を従来のソフトウェアにより行う方式（ソフトエンコードデコード）ではなく、専用の映像処理ICチップを用いたハードウェア方式（ハードエンコードデコード）とした。

結果、「HDカメラ+ソフトエンコードデコード」と比較し、映像解像度が向上（HD→フルHD）しているにもかかわらず、伝送する映像データサイズ増加を最小限に抑え（+53%）、映像圧縮・解凍にかかる時間を短縮（-50%）することに成功した。

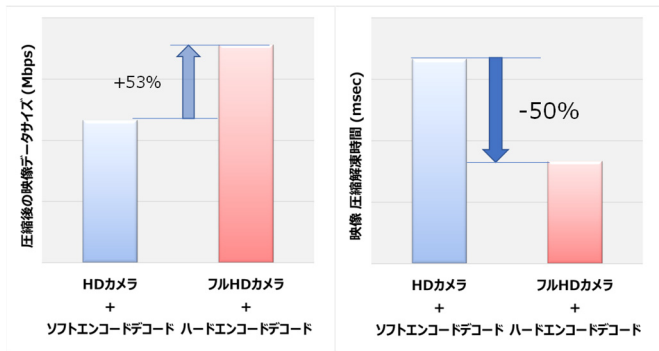


図9 映像遅延時間の改善

3.3 視界の拡大

本遠隔操作システムは、キャブ内に取り付けられた「正面カメラ」にて搭乗と同等の視界性を確保している。それに加えて、履帯周りの状態が確認できる「下向きカメラ」と、バケット内の土砂の様子が確認できる「バケットカメラ」を追加した。大画面モニタの正面カメラ映像内にオーバーラップして追加カメラ映像を表示させることで、新規の表示モニタを追加することなく視界の拡大を実現した。

同様に、標準車で標準装備している機械周囲カメラシステム「KomVision」映像も、大画面モニタ上に表示させている。

3.4 空間認識性の向上

遠隔操作席の正面カメラ映像は3次元的に配置された5面の大画面モニタでオペレータに提供されるが、モニタに表示される映像はあくまで2次元の映像である。また、映像も肉眼と同一の微細さや鮮明度を備えていない。これらの要因により、搭乗操作と比較し奥行き感などの空間認識性が遠隔操作では不十分となり、最終的には操作性の低下を招く。

本システムでは下記に示す補助情報を実映像にAR等にて付加し、オペレータが搭乗と同等の空間認識性を維持できるようにした。

(1) バケット刃先奥行き位置

バケットの奥行き方向の動作範囲および実際のバケット刃先位置を実映像の地面に重ね合わせて表示。

(2) 作業機姿勢

車体横からの視点で見た作業機の姿勢を表示。ダンプトラックが積み込み位置で停車している場合はダンプトラックも合わせて表示することで、バケットとダンプトラックの相対的な距離や高さが一目で感覚的に認識できる。

(3) 刃先高さ

バケット刃先の地面からの高さを棒グラフにてバケット近傍に表示。作業機姿勢表示と合わせ、バケットの3次元的な位置が一目で認識できる。

3.5 体感情報の補償

搭乗操作時オペレータは、視覚から得られる情報以外にも、振動、音、車体の傾きなどの情報を体感により取得している。遠隔操作システムでは基本的に映像情報に頼った操作であり、体感で得ていた車体の状態が把握しにくい。

ただし、遠隔操作では振動、音、車体の傾きなどが伝わらないことによりオペレータは快適な操作環境が得られ、疲労も軽減されることによる作業効率向上が望める一面もある。その為搭乗と同じ体感情報を搭乗と同様の方法で提供するのではなくオペレータに負担のかからない形で提供する必要がある。

(1) 傾斜計

車体の傾きを判りやすい絵で視覚的に認識する

(2) 音響システム

キャブ内の音をマイクで集音・伝送し、遠隔操作席の音響システムで再生する。エンジン音や油圧音により作業負荷などを把握する。音響システムはボリュームコントロール機能を備えている。

3.6 その他操作支援表示

(1) ペイロードメータ

積み込み中のダンプトラックの「最大積載量」、「現在積載量」、「残り必要積載量」や、油圧ショベルの「前回のバケットで積み込んだ量」など、詳細情報をグラフでオペレータに提供する。また、ダンプトラックの積載量上限を超えた場合は「現在積載量」の棒グラフを赤く表示するとともにその旨をメッセージで伝える機能なども備える。

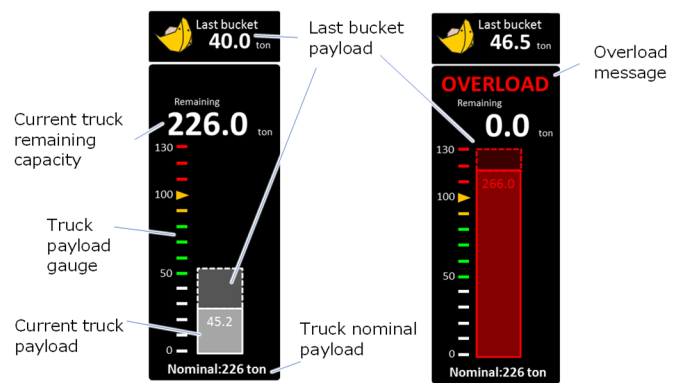


図10 ペイロードメータ

(2) 旋回予測停止位置

遠隔操作システムの映像遅延時間や旋回現在速度、作業機姿勢などの情報を用いて旋回停止位置を予想しその位置を正面カメラ映像上にARの小さな丸で表示する。遠隔操作席のオペレータは旋回操作中に、その丸い点が旋回を停止させたい位置に来た時に、即座に旋回レバーを中立位置に戻すと、表示した丸い点の位置で旋回が停止する。本機能により、遠隔操作システム固有の遅延時間や空間認識性の低下に影響されずに旋回操作を効率よく行える。

(3) シリンダ圧表示

各油圧シリンダの油圧をあらかじめ設定された閾値に従い色と棒グラフでオペレータに表示する。掘削時の各油圧シリンダの負荷状態が感覚的に把握できるため、より効率的なレバー操作となり燃費、作業効率の向上が期待できる。

(4) トラック到着時間

AHSシステムとデータ通信を行い、無人ダンプトラックの走行コースデータ、現在車速、コース混雑状況などの情報を用いて、ダンプトラックが積込機である油圧ショベルに到着するまでの予想時間を表示する。油圧ショベルに向かっている全ダンプトラックのアイコンが表示され、到着までの時間に応じてダンプトラックのアイコンが画面上を左から右に移動する。この情報により油圧ショベルオペレータは次の積み込みまでの時間がリアルタイムに把握でき、整地や積み込み準備などの作業が効率的に行える。

3.7 半自動掘削積み込み

掘削積み込み作業は「掘削」、「ブーム上げ旋回」、「排土」、「掘削位置戻り旋回」の4つのフェーズにて構成される。そのうちの3つのフェーズの「ブーム上げ旋回」、「排土」、「掘削位置戻り旋回」を自動で行う機能を開発し、本遠隔操作システムに実装した。

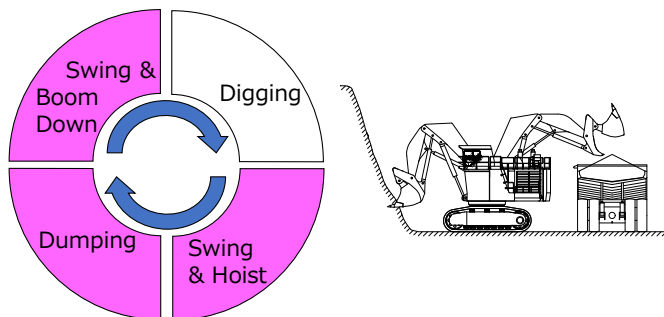


図11 掘削積み込み作業（ピンク色部分を自動化）

半自動掘削積み込み機能実現に必要な技術は下記である。

(1) 排土位置認識

無人ダンプトラックの持つ正確な位置情報より算出可能

(2) 作業機姿勢・バケット現在位置認識

前述のオペレータへの情報機能により算出済

(3) コントローラーからの作業機操作出力

遠隔操作システムにて実装済

以上により、遠隔操作システム上にて半自動掘削積み込み機能を実装することにより、専用機器を追加することなく本機能を実現した。

3.8 油圧シリンダストロークエンドクッション

油圧シリンダが勢いよくその動作端（ストロークエンド）に達すると、大きな音と衝撃が発生し、車体および搭載機器の寿命の低下や故障につながる。

搭乗操作においては、オペレータは音や衝撃が自分自身でも身体的に不快であるため、それを避けるために注意深く操作する。遠隔操作ではシステムの持つ時間遅れや空間認識性の低下により、しばしばストロークエンドにぶつかるまでレバーを操作してしまいがちになり、それを避けるためにより注意深い操作になり作業効率の低下につながる。またはオペレータによっては、音や衝撃が不快

なものとして身体に伝わらないのでストロークエンドにぶつけることにあまり注意を払わず操作を行う。

そこで前述の作業機姿勢情報を用いてストロークエンドに達する直前に遠隔操作席からのレバー指令を自動で絞る機能を追加した。本機能も半自動掘削積み込み機能同様に遠隔操作システム上に実装することにより、専用機器を追加することなく実現した。

4. 遠隔操作システムデータの活用

4.1 概要

鉱山機械は基本的には車体ごとにクローズしたシステムで構成され、車体外部とのデータのやり取りに関しては、稼働管理システム「Komtrax」などで車体情報を遠隔で確認するシステムにとどまっているのが一般的である。

本遠隔操作システムでは、膨大な稼働情報（操作情報、車体情報、カメラ映像等）がリアルタイムで自動的に車体外の遠隔操作席に集まる。また、遠隔操作席は実車のキャブと比較しスペースの制約が低いため、大画面モニタの適用が可能である。また設置場所も車体上ではなく、環境が比較的管理されたオフィス環境であることから、集められたデータの保存方法やデータを処理するコンピュータの選定自由度が高い。

前述のとおり遠隔操作席はイマーシブ社が製造販売しているトレーニングシミュレータとほぼ共通のコントロールユニットにて動作しており、リアルな遠隔操作とバーチャルなシミュレータトレーニングのデータの互換性を持っている。

このように本遠隔操作システムは鉱山オペレーションのデータプラットフォームとして高い拡張性・汎用性を備えていると言える。

MINExpo2021ではこの点を強く訴求したデモンストレーションを実施したので、訴求したデータ活用機能の一部を以下に述べる。

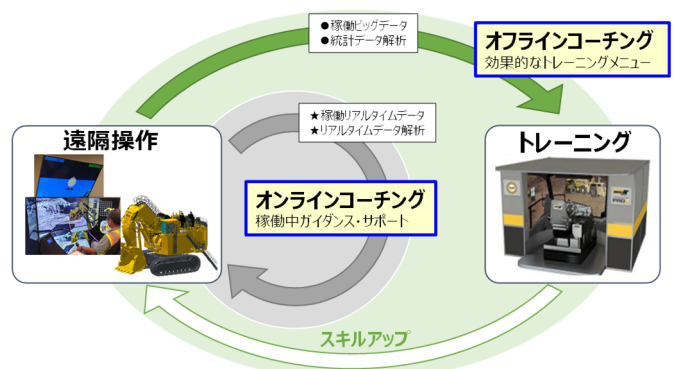


図12 遠隔操作システムデータの活用（コンセプト）

4.2 オンラインコーチング

収集された遠隔操作データをリアルタイムで解析処理する機能を遠隔操作席に実装し、その処理結果をオペレータに操作ガイダンス情報として大型スクリーン上の見やすい位置に実写映像と重ね合わせて提供する機能である。

(1) サイクルタイム

レバー操作や作業機の動きを解析し、掘削、ブーム上げ旋回、排土、戻り旋回にかかった時間（サイクルタイム）を表示する。各項目の真下に鉱山管理者が設定した目標サイクルタイムが表示されており、実サイクルタイムが目標サイクルタイムを超えると数字が赤色で表示され、オペレータは作業が遅れていることを感覚的に把握することができる。

(2) 掘削軌跡

掘削動作時のバケット刃先軌跡を表示し、刃先動作が遅いほどその軌跡線が太く表示される。オペレータは軌跡の形状と線の太さから掘削動作のスムーズさを認識でき、次回の掘削動作の参考にすることにより、より早く、かつ、よりバケット満杯率の高い掘削動作が行えるようになる。

(3) 非推奨操作メッセージ

オペレータが推奨されていない動作を行った場合、即座にその旨をオペレータにメッセージで伝え改善を促す。推奨されない操作内容ごとに点数が設定されており、1日の作業が終了するまでの累積点数も合わせて表示される。

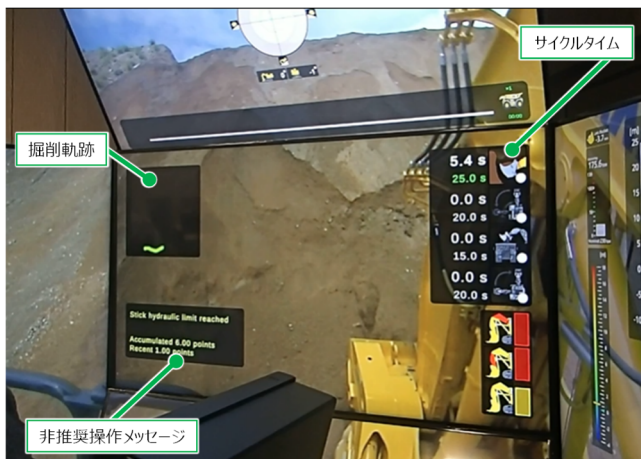


図13 オンラインコーチング機能

4.3 オフラインコーチング

4.3.1 プレーバックデータ

遠隔操作におけるすべての操作データ、車体情報、映像等はサーバーに保存され、鉱山管理者や建機トレーナーが管理者用モニタにて現在および過去のデータをいつでも確認できる。オペレータや作業日時ごとの非推奨操作や作業効率を確認することにより、故障や事故原因の究明、オペレータや鉱山機械ごとの作業改善やトレーニングメニューの策定に利用する。図14にプレーバックデータ画面を示す。



図14 プレーバックデータ

(1) 非推奨操作履歴

稼働中に発生した非推奨操作の一覧が時系列で表示され、項目をクリックすると、それが発生した時間に画面がジャンプする。どのような操作を行い、どのような状態で事象が発生したかが画面で確認できる。

(2) カメラ映像切り替えボタン

複数のカメラ映像が同期された状態で録画されており、カメラ切り替えボタンを押し、その瞬間ごとの作業の状態を複数のカメラ映像により確認できる。

(3) スライダー

スライダーを操作することにより任意の時間のデータや映像に移動が可能

4.3.2 統計データ処理

稼働データはイマーシブ社が提供するサービス Operator Performance Analytics（オペレータ作業効率解析、以下「OPA」）に自動でアップロード・解析され、ダッシュボードと呼ばれる解析結果表示画面に統計データとして表示される。

鉱山管理者は日々の作業実績、中長期にわたる作業量変化、オペレータ毎の作業履歴などを本機能により表やグラフで確認できる。また建機トレーナーはオペレータごとの操作の癖や技能レベルを統計データとして確認し、今後の効果的なシミュレータによるトレーニング計画策定に役立てることができる。

将来的にはOPAとトレーニングシミュレータが自動で連携し、システムが自動で解析結果に基づいたトレーニングメニューをオペレータごとに策定するシステムの構築を目指している。

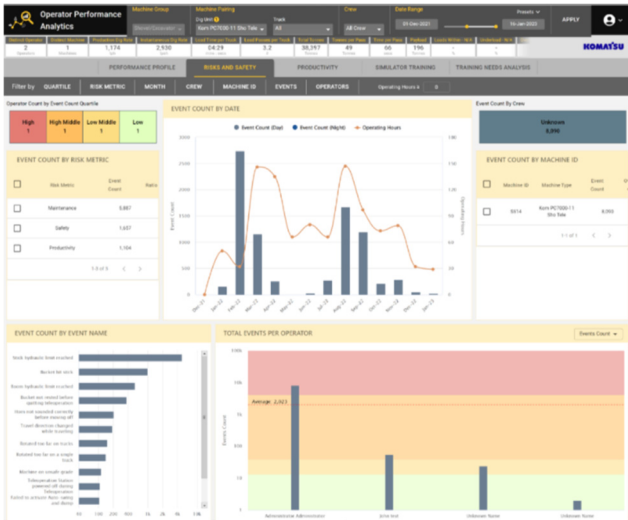


図15 OPAダッシュボード

5. おわりに

MINExpo2021の開催期間中、計6回デモンストレーションを行い、毎回立ち見が出る盛況ぶりであった。一部機能を除き、本システムは既に開発を完了しており、近々お客さまの現場でトリアル稼働を行う予定である。

謝辞

本システムの開発およびデモンストレーションの成功にワールドワイドに丸となって取り組んでいただいたアメリカ、オーストラリア、ドイツ、日本の関係者の皆さまに感謝いたします。

参考文献

- [1] Masaharu Moteki, Nishiyama Akihiko, Shinichi Yuta, Hiroshi Ando, Sadanori Ito, and Kenichi Fujino, "Work efficiency evaluation on the various remote control of the unmanned construction", The 15th Symposium on Construction Robotics in Japan, 2015, O-21
- [2] 新田恭士, 松尾修, 北原成郎, 黒田昇, 田村圭司, 下田孝徳, "超長距離無人化施工技術の適用性に関する考察－雲仙普賢岳における超長距離遠隔操作実証実験の概要", 第13回建設ロボットシンポジウム, 2012年

筆者紹介



Jun Morinaga

もりなが じゅん
森永淳 1992年, コマツ入社。

開発本部 フィールドオートメーション開発センタ
所属

【筆者からひと言】

米国の実機試験場への出張が社会情勢により一時期困難な状況に陥り、開発のやり方もまさに日本からの遠隔操作でありました。普段は出張で家を留守にしがちでしたが、おかげで家族と過ごせる時間が増え、遠隔操作の素晴らしさを身をもって感じました。本稿で紹介した遠隔操作システムが、社会と鉱山で働く方々に更なる幸せをもたらす未来を夢見ています。