

23. i-Construction を加速する遠隔リアルタイム・ダッシュボードに関する研究

株式会社熊谷組
株式会社まざらん

○北原 成郎
西垣 重臣

1. はじめに

災害復旧工事の無人化施工において、働き手の状況認識の向上とヒューマンエラーの未然防止を図る遠隔リアルタイム・ダッシュボードを報告する。ここで、ダッシュボードとは、施工状況を一目で理解できるように、クリティカルな達成指標を整理統合して提示する機能をいう。本研究では、クリティカルな達成指標を安全性と生産性に係る定量的評価指標とインフォグラフィックスで構成する。

ダッシュボードについて様々な定義がある。本研究では、ダッシュボードをつぎのように分類する。

- (1) 様々な仕事をすばやく実行できる GUI (graphical user interface) を構成する部品要素 (Widget という小さなプログラム) の集合体
- (2) 複数の分散したアプリケーション、ネットワーク・デバイス、産業機械などを管理するソフトウェアで構成されたパネル
- (3) 様々な GUI を使い、ビジネス活動で生じた事象を、一目で、分かり易く、リアルタイムにデータを可視化し、要約するビジネス・ダッシュボード

遠隔リアルタイム・ダッシュボードはビジネス・ダッシュボードの範疇に含まれる。

有人操作ではオペレータは自らが操作する建設機械の車体姿勢、振動、衝撃などを体感することができ、自らの the seat of the pants を活かすことができる。ここで、the seat of the pants とは、自分の経験と勘で、計器に頼らず、反射的に判断・操作することをいう。一方、無人操作では、オペレータは遠隔操作する建設機械の車体姿勢、振動、衝撃などを体感することができない。オペレータは、遠隔操作用モニタを通じて、建設機械の振る舞いを推定することになる。現場管理者は、施工現場に立ち入れないため、遠隔操作用モニタをみて、またはオペレータからの口頭報告や作業日報により無人化施工状況を推測することになる。

無人化施工において働き手の状況認識の向上とヒューマンエラーの未然防止を図るために、安全

性と生産性に係る定量的評価指標とインフォグラフィックスを、働き手にリアルタイムに提供することは非常に有意義である。

大規模な斜面崩壊が発生した阿蘇大橋地区において、斜面上部に残る多量の不安定土砂がさらに崩壊する恐れがある。土砂崩壊による二次災害を防ぎ、国道をはじめとしたインフラの復旧を安全に行うため、阿蘇大橋地区斜面防災対策工事が施工されている。この工事に係る崩壊地内での土留盛土工の築造と上部工事用道路の開設に遠隔リアルタイム・ダッシュボードを適用した事例を紹介しながら、その機能と役割について報告する。

2. 関連する研究と本研究の特徴

無人化施工に関連する研究には、ハードウェア、カメラ、通信機器とネットワーク構成などに関するものが多く、情報モデルに関するものは希薄である。一方、the seat of the pants の重要性を論述した研究¹⁾、触知覚の重要性²⁾、触覚を通じて情報を伝達する技術であるハプティックスの研究³⁾などオペレータの五感に注目するものがある。

著者らは、無人化施工の ICT を活用した作業管理⁴⁾、オペレータの操作性向、タスクの困難性、マシンの操作性などに関する定量的指標⁵⁾、機械化土の情報モデル⁶⁾、床固工工事における無人化施工 CIM⁷⁾などを研究してきた。本研究はこれらの研究成果を活用し、安全性と生産性に関する定量的評価指標とインフォグラフィックスを働き手にリアルタイムに提供するという視点で、さらに発展させたものである。ここでは、安全性に係る定量的評価指標として、建設機械の振る舞いにより励起される三軸加速度と三軸角速度、並びに移動速度と移動方位などに基づいた物理的手がかり情報を提供する。生産性に係る定量的評価指標として、建設機械による構内物流を把握することで、重要目標達成指標(KPI :Key Performance Indicators)を提供する。

3. 現場適用概要

遠隔リアルタイム・ダッシュボードの現場適用

イメージを図-1に示す。

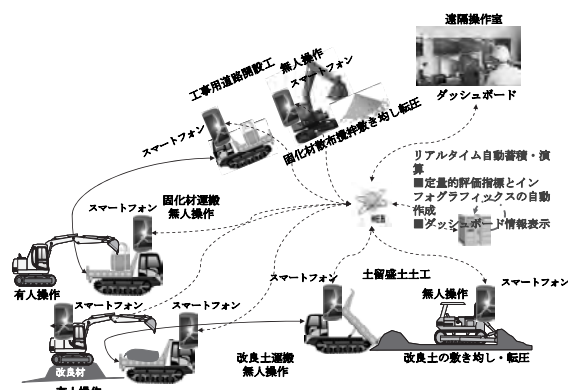


図-1 遠隔リアルタイム・ダッシュボードの現場適用イメージ

工事現場でのデバイス管理の煩雑さを回避するために、スマートフォン Galaxy S3 に組み込まれている 3 軸加速度計、3 軸角速度計、電子コンパス計、GPS 受信器などを使用する。このスマートフォンは、計測データのログ機能とデータ送信を担うアプリケーションを持つ。計測対象とした建設機械をつぎのとおりである。

- ① 固化材・改良土運搬用：11t 級クローラダンプ
- ② 積込作業用：0.8m³ 級バックホウ
- ③ 固化材散布・攪拌転圧用 1.5m³ 級バックホウ
- ④ 敷き均し転圧作業用：10t 級ブルドーザ

サンプリング周波数は 1 HZ～100HZ の範囲としている。この事例ではサンプリング周波数 1 HZ を選択した。スマートフォンの建設機械への車載状況を図-2に示す。

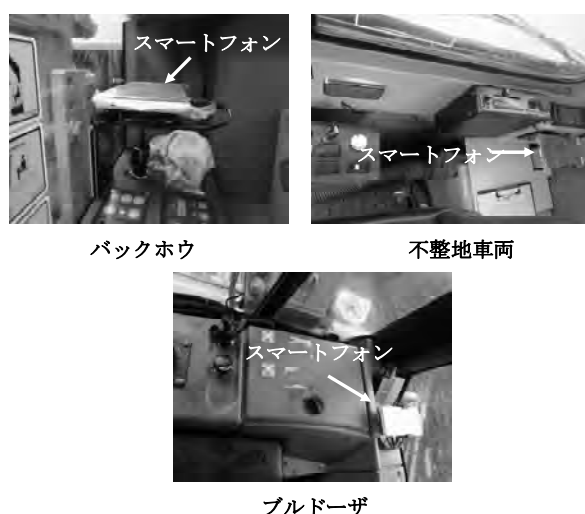


図-2 スマートフォンの車載状況

3.1 システム構成

遠隔リアルタイム・ダッシュボードは、10 分間

隔でフィードバック情報を更新する。その初期画面を図-3に示す。

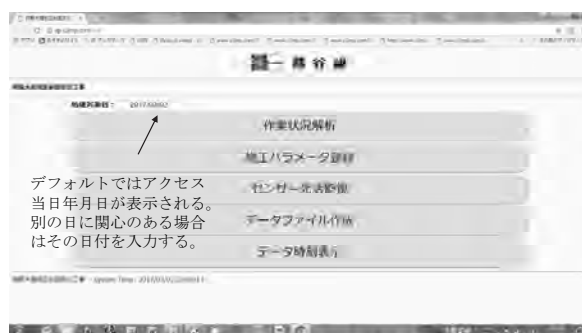


図-3 遠隔リアルタイム・ダッシュボード

メニューの概要を以下に示す。

(1) 施工パラメータ登録

施工パラメータ登録画面を図-4に示す。

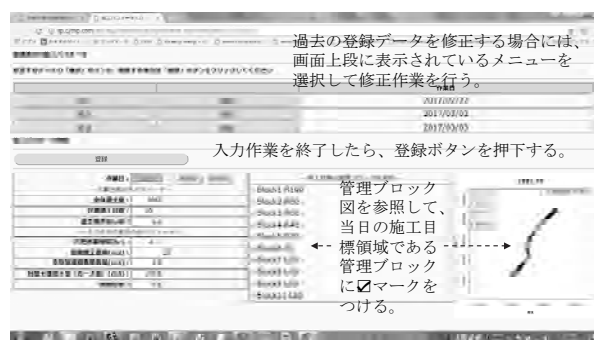


図-4 施工パラメータ登録画面

施工エリアをブロック分けして、管理ブロック図を作成している。管理ブロック図を参照して、当日の施工目標領域である管理ブロックに☑マークをつける。そして、下記の情報項目に関するデータを作業前に登録する。これらは、計測データを解析し、生産性を評価する際に重要な情報項目である。

- ① 全体盛土量 m³
- ② 計画施工日数 day
- ③ 盛土撒き出し厚 m
- ④ 所定作業時間 hr
- ⑤ 目標施工面積 m²
- ⑥ 不整地運搬車積載量 m³
- ⑦ 目標土運搬量（ルーズ量） m³
- ⑧ 締め固め率 比率

(2) センサー死活監視

スマートフォンの稼動状態をモニタリングする画面である。該当ボタンを押下することで、スマートフォンによる計測状態を確認することができ

る。

(3) データファイル作成

指定した日付の計測データのダウンロードを可能にする画面である。処理対象日の計測データファイルの名称が画面に表示される。この名称を押下することで、そのファイルをダウンロードできる。

(4) データ時刻表示

計測しているデータの計測時間とデータ数を確認する画面である。

(5) 作業状況解析

メニュー「作業状況解析」のボタンを押下すると、図-5 に示す画面に推移する。各メニューが提供する情報の概要をつぎに示す。

①施工状況

メニュー「施工状況」を押下すると、施工状況の概要（全体状況図、バックホウ、不整地運搬車、ブルドーザなどの施工状況図、進捗ゲージ、発着累積グラフ、荷下ろし土量ヒストグラムなど）を表示する画面に推移する。施工状況概要の画面を図-6 に示す。

②バックホウ

メニュー「バックホウ」を押下すると、バックホウの施工状況（施工状況図、積込バーチャート、作業時間表、作業時間バーチャートなど）を表示する画面に推移する。バックホウの施工状況画面を図-7 に示す。

③不整地運搬車

メニュー「不整地運搬車」を押下すると、不整地運搬車の走行状況（施工状況図、走行速度ヒストグラム、走行速度時系列グラフ、走行速度記述統計など）を表示する。不整地運搬車の走行状況画面を図-8 に示す。

④ブルドーザ

メニュー「ブルドーザ」を押下すると、ブルドーザの施工状況（走行軌跡によるポリゴンズ図、押土軌跡と押土密度、作業時間表、作業時間バーチャート、押土時走行速度記述統計、押土時走行速度時系列グラフ、押土時走行速度ヒストグラム、進捗ゲージなど）を表示する。ブルドーザの施工状況画面を図-9 に示す。

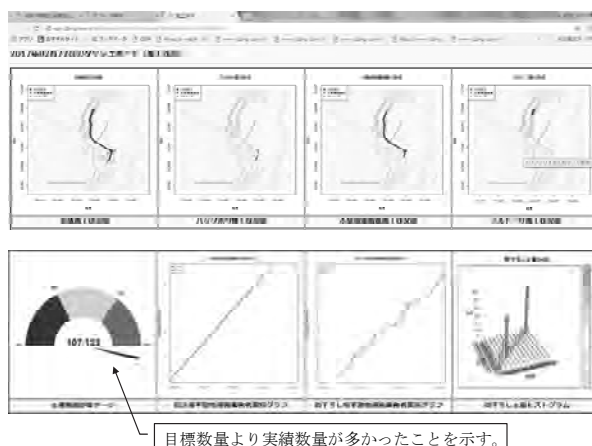


図-6 施工状況概要画面



図-7 バックホウの施工状況画面

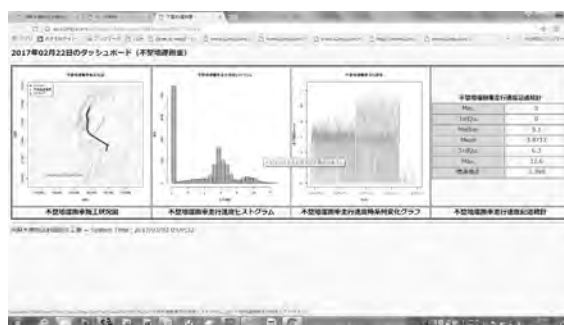


図-8 不整地運搬車の走行状況画面



図-5 作業状況解析画面

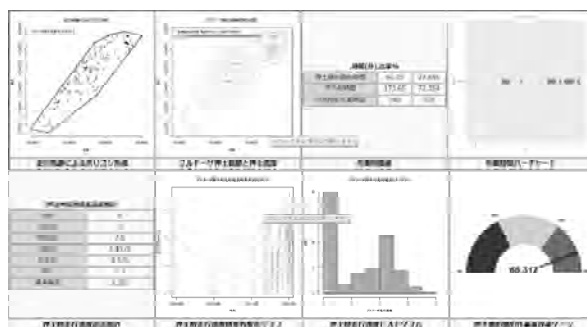


図-9 ブルドーザの施工状況画面

(6) 生産性分析

日常の生産性分析情報を表示する。この情報は当日の作業時間バーチャートとラインバランシング情報、そして積込場と荷下ろし場の特性情報で構成される。作業員や機械に均等に仕事を割当て工程間の流れる速さを均一化していくという技法をラインバランシングという。ラインバランシングの際に活用する重要な情報として、ピッチタイムとラインバランス・ロス率を提供する。ピッチタイムは、実作業時間を当該時間の仕事量で除した値である。ラインバランス・ロス率は(1)式で求める。

$$\text{ratio} = \frac{n \times t^* - \sum_{i=1}^n t_i}{n \times t^*} \quad (1)$$

ここで、**ratio**: ラインバランス・ロス率、**n**: 工程数、**t***: ボトルネックのピッチタイム、**t_i** **i**=1,2,...,**n**: 各工程のピッチタイムである。

ピッチタイムとボトルネック、そしてラインバランス・ロスの関係を図-10 に示す。

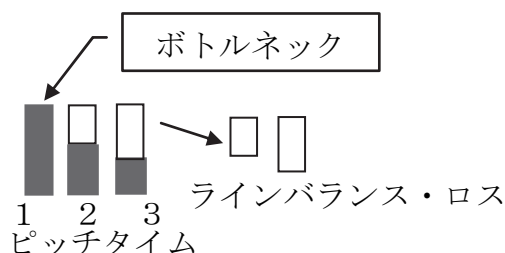


図-10 ピッチタイムとボトルネック、そしてラインバランス・ロスの関係

ピッチタイムの棒グラフの例を図-11 に示す。上図からは積込作業と運搬作業がボトルネックとなっていることが分かる。

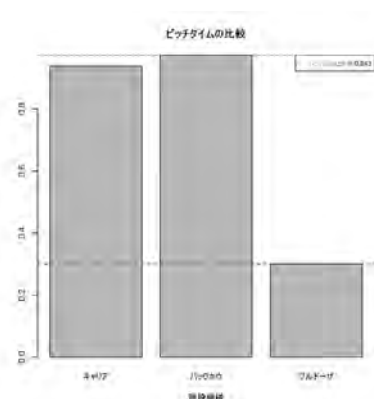


図-11 ピッチタイムの棒グラフ

この施工ラインは、積込、運搬、荷下ろし、押土作業などで構成されるプッシュ生産方式のラインである。このライン数は”1”である。そのため、このライン自体がクリティカル・パスとなっている。

積込場と荷下ろし場の特性情報はクローラダンブ滞在時間のヒストグラムと特性値で構成される。特性値は、計測開始時刻到着回数、平均到着率、平均滞在時間、滞在時間標準偏差などの項目で構成される。これらの特性値を使い、待ち行列シミュレーションを行うことができる。

4. 工事中道路に潜むハザードの可視化方法

工事中道路に潜むハザードの可視化方法について述べる。

4.1 危険警告判断基準

三軸加速度計測値の経時変化を表現する特性値として、平均値と分散の変化、周波数の変化、外れ値、連続的な上昇/下降傾向（トレンド）など、また導出属性として、自由落下・衝撃、縦横段方向の滑り、サイドスリップ角、車体姿勢角などを安全性に係る定量的指標として、遠隔リアルタイム・ダッシュボードは出力する。

これらの物理的手がかり情報に基づいて危険警告を発する。その危険警告発報基準として、簡便な方法であり、高い周波数や外れ値(outliers)の影響を受けないと考えられる連検定(run test)の考え方を取り入れる。

連検定とは、コインの表裏、丁半、Yes か No などのように二つしかない結果や事象において、その生起回数に規則性があるかないかを検定するものである。ここでは、物理的手がかり情報の連続的な上昇または下降を示す連数に注目する。

一般に、連数”5”のときは注意が必要、連数”6”のときはアクションの準備を整える、連数”7”のときは原因究明と対策などのアクションをとる、といわれる⁸⁾。

連数が”7”の事象が発生する確率は、一年内に交通事故に遭遇する確率に近似する。ちなみに、連数が”15”の事象が発生する確率は交通事故で死亡する確率に近似する。

危険事象の判断基準を厳しくする（連数の値を大きくする）ことも考えられる。判断基準を厳しくすると、第二種の過誤確率が大きくなり、検定力が落ちる。一方、判断基準を甘くすると、危険事象の発生という判断が乱発される。本研究では、連数が”7”のとき、危険事象が生じたと判断し、警告を発する。そのときの観測値（計測値、時刻、位置）を物理的手がかり情報に係るハザードが潜在するポイントとする。

4.2 リスク評価の方法

リスク評価の流れを図-12 に示す。

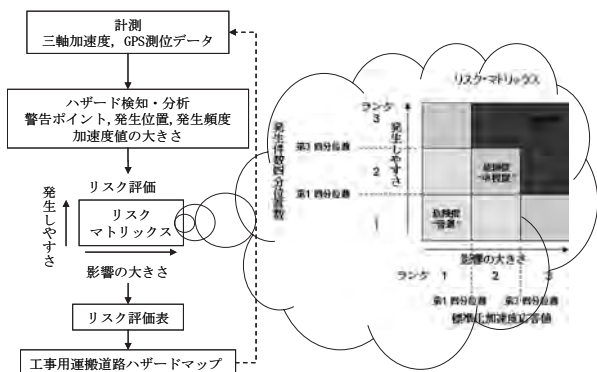


図-12 リスク評価の流れ

危険警告発生件数を発生しやすいさとする。計測値の絶対値の大きさを影響の強さとする。両者の値を四分位数によりランク付けし、スコアを付与する。両者のスコアをリスクマトリックスと突合せ、リスク・スコアを付ける。そして、リスク・スコアをリスク評価表に基づいてリスク評価を行う。リスク評価表を表-1に示す。

表-1 リスク評価表

スコア	リスク評価
33	危険度が高い
32	危険度が高い
31	危険度が中程度
23	危険度が高い
22	危険度が中程度
21	危険度が普通
13	危険度が中程度
12	危険度が普通
11	危険度が普通

4.3 ハザードの可視化例

前述した危険警告判断基準とリスク評価の方法に基づいたサイドスリップのハザードの可視化例を示す。土留盛土工の築造のための運搬道路のハザードの可視化例を図-13に、上部工事用道路開設の作業路のハザードの可視化例をと図-14に、それぞれ示す。

土留盛土工の築造のための運搬道路では、登り口に多くのハザードがみられる。ここは急勾配なところで、道路が傷みやすく、道路の維持改良作業に追われる箇所である。ハザード存在箇所の経時変化をみることで、道路維持改良作業のタイミングを計ることができる。

上部工事用道路開設の作業路では、登り口と曲線部、そして固化材散布攪拌敷き均し転圧施工箇所手前にハザードが存在する。固化材散布攪拌敷

き均し転圧施工箇所手前のハザードは特にリスクが高い。

図中の円の半径は、そのときの計測値をスケール化した値である。

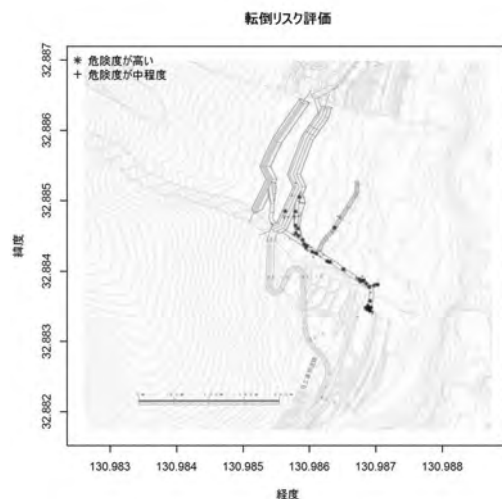


図-14 土留盛土工の築造のための運搬道路のハザードの可視化例

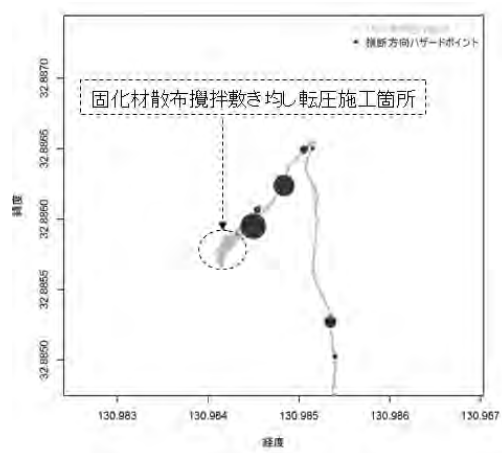


図-14 上部工事用道路開設の作業路のハザードの可視化例

5. 目標管理

5.1 ブルドーザ押土転圧施工の目標管理

まず、ブルドーザの稼動時間把握方法を示す。つぎに、ブルドーザの施工面積を計算することで、ブルドーザ施工の目標管理を行う方法を示す。ブルドーザ施工時の上下方向加速度の分散は大きい。上下方向加速度の分散の変化を求め、分散の(中央値+平均値)/3の値を待機と押土転圧作業の境界線の閾値とした。分散の値が、この閾値より大きいとき、押土転圧作業を行っている判断す

る。そのときの時刻を切り出し、作業時間を計算する。この事例では教師なしの学習データであるため、分散の五要約数、ヒストグラムの形状などから、上記の閾値を採用した。動画記録などをみて、教師つき学習データを生成することが望ましい。

押土面積と進捗率を求め、可視化する方法を図-15に示す。稼動時間、押土面積、進捗率などをリアルタイムに求め、定量的評価指標とインフォグラフィックスとしてフィードバックすることで、ブルドーザ押土転圧施工の目標管理が可能となる。

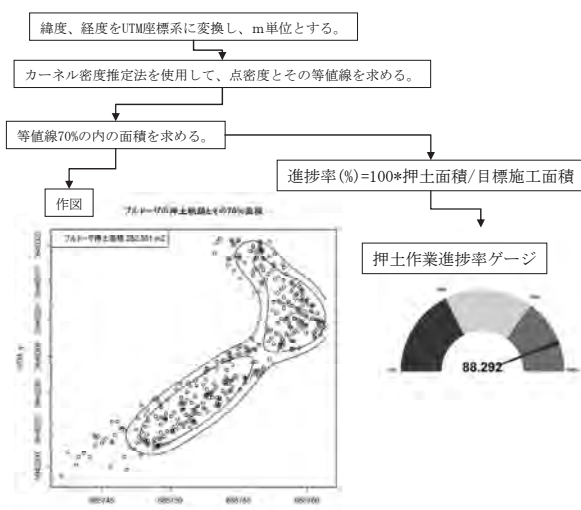


図-15 ブルドーザ押土転圧軌跡と面積、その進捗率を求める方法

5.2 バックホウによる固化材散布攪拌敷き均し転圧施工の目標管理

同様にして、バックホウによる固化材散布攪拌敷き均し転圧についても目標管理が可能となる。固化材散布攪拌敷き均し転圧軌跡と面積の可視化例を図-16に示す。

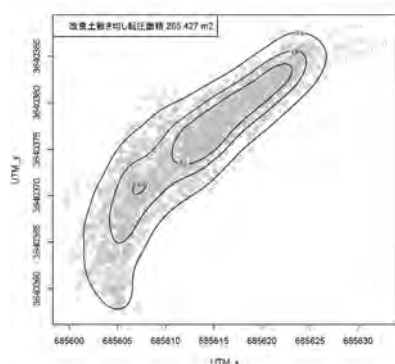


図-16 バックホウによる固化材散布攪拌敷き均し転圧軌跡と面積の可視化例

6. まとめ

安全性に係る定量的評価指標として物理的手がかり情報を提供する建設機械による構内物流を把握することで、生産性に係る定量的評価指標として重要目標達成指標を提供する。そして、これらの指標をインフォグラフィックスにより可視化する。遠隔リアルタイム・ダッシュボードは、定量的評価指標とインフォグラフィックスをリアルタイムにフィードバックする。

このフィードバック情報は、働き手の状況認識の向上とヒューマンエラーの未然防止を図り、適時的確な意思決定と迅速な対策を促す。その結果として、施工品質の向上、トレーサビリティの確保、安全性と生産性の向上などが期待される。

i-Constructionとは、調査・設計から施工・検査、さらには維持管理・更新までの建設分野のプロセス全体の最適化を図る活動であるといわれる。遠隔リアルタイム・ダッシュボードは施工と検査の最適化を加速する。

参考文献

- 1) Yoshio Ban: "UNMANNED CONSTRUCTION SYSTEM: PRESENT STATUS AND CHALLENGES," pp. 241-246, Proceedings of the 19th ISARC, 2002.
- 2) 茂木 正晴, 藤野 健一, 三嶋 博之: "無人化施工による破碎・解体作業時における触知覚情報の必要性と実態 : 媒体を通じた人の触知覚の実態," pp. 64~73, 68巻, 8号, 建設機械施工, 2016.
- 3) Kyeong Won Oh, Dongnam Kim, Nam Hoon Kim, Daehie Hong: "The Virtual Environment For Force-Feedback Experiment Of Excavator Using A Novel Designed Haptic Device," pp. 51~56, Proceedings of the 28th ISARC, 2011.
- 4) Shigeomi Nishigaki, Kazutoshi Saibara, Shigeo Kitahara, Hajime Iwasaki, Kazuhiro Yamada, Hideaki Satoh: "ICT-BASED WORK MANAGEMENT TO SUPPORT UNMANNED CONSTRUCTION FOR POST-DISASTER RESTORATION," pp.508-513, 28th ISARC, 2011
- 5) Shigeomi Nishigaki, Katsutoshi Saibara, Shigeo Kitahara: "QUANTITATIVE INDEXES TO EVALUATE OPERATOR'S BEARING, DIFFICULTY IN TASK, AND MACHINE OPERABILITY WHEN REMOTELY CONTROLLING BACKHOE," pp. 587~594, Proceedings of the 30th ISARC, 2013.
- 6) Shigeomi Nishigaki, Katsutoshi Saibara, Shigeo Kitahara: "Information Modelling on Mechanized Earthworks," pp. 992-999, Proceedings of the 31st ISARC, 2014.
- 7) 北原成郎, 才原勝敏, 西垣重臣: "床固工工事における無人化施工CIMに関する研究," pp. 71~78, 第14回 建設ロボットシンポジウム論文集, 2014.
- 8) 福田祐二: "生産現場の異常を検知, 品質管理に役立つ「C管理図」を使う," 2012.