

インテリジェント施工システムの開発 — 俯瞰映像上での障害物提示 —

坂井 郁也 千葉 拓史
山本 新吾

概 要

近年、建設生産システムの生産性向上を目的としたICT技術に関する開発が盛んに行われている。特に、筆者らは、災害復旧の迅速化を目的にICT技術を活用した施工システムである「インテリジェント施工システム」の開発に取り組んでいる。本報告では、その取り組みのひとつである俯瞰映像上の障害物提示システムの開発について報告する。

遠隔地から建設機械を操作するオペレータへの建設機械周辺の映像を提示する手法として、擬似的に建機の上空からの映像を俯瞰して提示するシステムが開発されている。その俯瞰の映像は、建設機械の前後左右に設置した4台の魚眼レンズカメラの映像を合成することにより構築される。そのシステムは遠隔操作で用いられる移動カメラ車を不要にする可能性を有するが、地面から高低差を持った障害物が不正確に描画される問題が残った。そこで筆者らは、建設機械の前方に設置したデプスカメラの3次元測域データと既存の俯瞰映像を合成することにより、高低差を正確に描画可能な俯瞰映像提示システムを開発した。そして、フィールド実験から本システムの評価を行った結果、既存の俯瞰映像と比較して適切に障害物を回避できた。また、オペレータへのインタビューから障害物提示機能が建機を安全に走行させる上で有用であるという知見を得た。

Development of an Intelligent Construction System Obstacle Presentation on a Bird's-eye View Image

Abstract

In recent years, ICT technology has been actively developed for the purpose of improving the productivity of construction production systems. In particular, the authors report on the development of an “Intelligent Construction System,” which is a construction system that uses ICT technology for the purpose of speeding up disaster recovery, and an obstacle presentation system on the cover image that is one part of these efforts.

As a technique for presenting an image around a construction machine to an operator controlling the machine from a remote location, a system has been developed that presents a bird's-eye view of an image from above the construction machine. The bird's-eye view image is constructed by combining the images of four fisheye lens cameras installed on the front, rear, left, and right of the construction machine. The system has the potential to eliminate the need for a mobile camera car used for remote control, but the problem remains that obstacles with a height difference from the ground are drawn incorrectly. Therefore, the authors developed a bird's-eye view video presentation system that can accurately draw height differences by synthesizing the existing three-dimensional range data of the depth camera installed in front of the construction machine. As a result of evaluating this system through field experiments, it was possible to avoid obstacles appropriately compared with the existing overhead view video. In addition, we learned from an interview with the operator that the obstacle presentation function is useful for safely running construction equipment safely.

キーワード: 災害復旧、無人化施工、映像提示、建設機械、デプスカメラ

§1. はじめに

土砂災害や火山噴火などの自然災害に対して迅速な復旧対応が重要である。しかし、災害地域における建設機械(建機)を用いた有人での工事作業は二次災害が想定されるため、無人での工事作業(無人化施工)が要求される。その無人化施工を実現する手段として、遠隔操作式建機を直接目視で遠隔操作する方式と、工事現場に設置されたカメラ搭載の台車(移動カメラ車)と遠隔操作式建機とを遠方の安全な操作室から遠隔操作する方式とが用いられている。¹⁾ 特に後者の方式は、建機のキャビン上に搭載したカメラと移動カメラ車から伝送された映像のみでオペレータが遠隔操作を行うため、直接目視よりも安全性が高い。上述のように無人化施工の手段は確立されていたが、遠隔操作用に改造された専用建機の調達と準備に時間を要するために迅速な災害復旧が困難であった。そこで、フジタは、遠隔操作用に改造された専用機の調達性の課題に着目し、災害現場近辺で容易に調達可能な一般の建機へ遠隔操作式ロボット(ロボQS)を後付けで搭載することにより、遠隔操作式建機の迅速な調達を実現した。²⁾ これにより、フジタは、直接目視の方式での迅速な災害復旧を可能としたため、多くの災害対応の実績を保有している。その一方で後者の方式の場合、専用建機の調達性以外に地形的な制約を受ける移動カメラ車の配置問題と有人での搭乗作業と比較して遠隔操作は作業効率が劣ることから迅速な災害復旧が困難であった。フジタは、無人化施工の作業効率は視覚の問題が29%と最も高いこと³⁾に着目し、建機周辺の情報を提供する移動カメラ車の不要化と適切な映像を提示して作業効率向上の両立を試みた。そのために、フジタと東京大学の浅間・山下研究室は共同で無人化施工用俯瞰映像提示システムを開発した。⁴⁾ そのシステムは、建機の前後左右に取り付けた魚眼レンズカメラからの映像を合成し、建機上空からの疑似的なカメラ映像を遠隔操作者に提供するものである。その俯瞰映像提示システムの概念図を文献から引用して図1として示す。フィールド実験の結果、そのシステムは搭乗での作業には及ばないものの建機の掘削作業において遠隔操作に有効な結果を得た。また、バケットの位置決め時には従来の移動カメラ車の映像提示手法と同等以上の精度を得た。さらに、走行作業では移動カメラ車の映像と比較して安全走行や建機本体の位置決め精度の点で有効性が確認された。以上の実験結果から、簡便に建機周囲の環境を提供する俯瞰映像のシステムが構築された。しかし、俯瞰映像提示システムにおける手法の性質から高低差のある障害物が正確に描画されない問題が確認された。

本稿では、俯瞰映像提示システムが障害物の高低差を不正確に描画する問題を解決するため、3次元測域センサの

ひとつであるデプスカメラを用いて、俯瞰映像上に障害物の高低差の情報を提示する俯瞰映像システムの開発と実験におけるそのシステムの評価について述べる。

§2. 俯瞰映像の問題点

複数台の魚眼レンズカメラを用いて構築される俯瞰映像提示システムは、全ての物体が同一の平面状の地面などに存在すると仮定しているため、魚眼レンズカメラより取得した映像をその平面に対して一様に投影している。しかし、災害現場では地面に対して高低差がある盛土や穴、倒木、岩などの障害物が数多く存在する。したがって、俯瞰映像は実際の上空からの視点と比較してそれらの障害物が不正確に描画される。また、魚眼レンズカメラと同等の高さにある障害物が映る場合は、俯瞰映像上に全く描画されないという課題も抱えている。つまり、俯瞰映像提示システムを頼りに遠隔操作式建機が走行するとき、不正確な映像が原因でオペレータが誤った環境認識を行う。そして、誤った環境認識が原因で、遠隔操作式建機が障害物への衝突や落下・転倒で動作不能になる可能性がある。

建機の俯瞰映像システムにおける不正確な描画の具体例を図2と図3に示して述べる。図2の建機前面の魚眼レンズカメラの画像には障害物である赤色のカラーコーンが適切なサイズで描画されている。一方で、図3の俯瞰映像では、カラーコーンは実際のサイズよりも伸長されたように描画がされており、不正確な提示がオペレータに行われる。

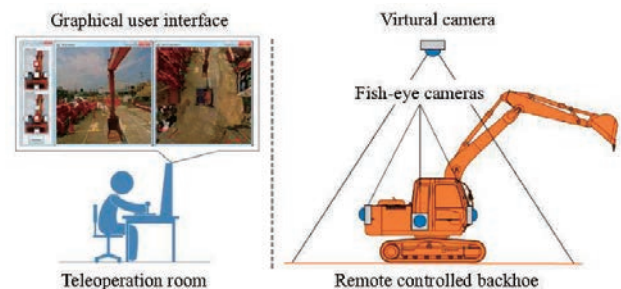


図1 俯瞰映像の概念図
参考文献4)から図を引用

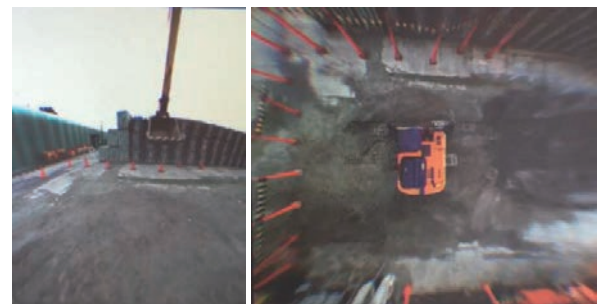


図2 建機の正面映像

図3 建機の俯瞰映像

§3. 3次元測域センサを活用した俯瞰映像

3.1 3次元測域センサの事前検討

俯瞰映像上に障害物を正確に提示する関連研究として、ロボットの遠隔操作を目的に複数台の魚眼レンズカメラに3次元測域センサを加えたデプスカメラを用いたもの⁹⁾やLiDAR(Light Detection and Ranging)を用いたもの¹⁰⁾が報告されている。それらの手法により、障害物が俯瞰映像上で正確に描画されることで、障害物の衝突回避および周囲環境の適切な認識が容易になると述べられている。両者の手法とも、3次元測域センサで取得した障害物の位置情報の点群を俯瞰映像に重畳表示させることにより、障害物を正確に提示している。具体的には、魚眼レンズカメラの画像座標系と3次元測域センサの座標系の対応関係を算出し、魚眼レンズカメラの画像中の障害物の色を障害物の点群に付加している。そして、障害物を色付きの点群として俯瞰映像に重畳表示することによって、ロボット遠隔操作において障害物の正確な視認を可能としている。

前述の関連研究のロボット遠隔操作における結果から、筆者らは同様のシステムを遠隔操作式建機向けのものとして開発することを決定した。そして、実機の場合において、どの3次元測域センサが有用であるかを予備実験により事前検証を行った。具体的には、一般的な中型油圧ショベルを対象とし、3次元測域センサであるLiDARのVelodyne®HDL-32eとデプスカメラのIntel® RealSense™ D435を対象の建機に搭載して障害物の計測を行った。その予備実験の状況を図4に示す。図4に示されている建機から約5m程度の距離に設置した脚立と脚立の上部・下部にそれぞれ設置したカラーコーンを障害物としてみなした。また、図4に示すようにLiDARは建機のキャビンの上部に設置し、デプスカメラは建機の前方部に設置した。

LiDARを用いた予備実験の結果として、LiDARの計測データの点群を描画したものを図5に示す。障害物である脚立とコーンが図5の破線で囲われた領域に点群として描画されている。しかし、計測対象が遠方であるほど計測密度が疎になるLiDARの特性から、障害物形状の全体を捉えることが困難である。一方、デプスカメラを用いた予備実験の結果として、デプスカメラから取得した深度画像を図6に示す。図6の破線で囲われた領域に障害物が深度画像として描画されている。今回のデプスカメラは計測対象が遠距離であるほど計測精度が劣る特性を持つが、対象を面として捉えるために障害物全体をLiDARより計測が可能である。

以上の予備実験の結果から、障害物である盛土や穴、倒木、岩の全体を適切に捉えた上で障害物映像を提示する場合は、デプスカメラが有効であることが考えられる。また、LiDARと比較してデプスカメラは1/40程度の価格であった

め、経済性を兼ねて俯瞰映像の機能を拡張する3次元測域センサとしてデプスカメラを採用した。

3.2 システム概要

建機の前左右に設置する魚眼レンズカメラ4台と建機の前方に設置するデプスカメラにて障害物を正確に描画できる俯瞰映像提示システムを構築する。そのシステムの概念図を図7に示す。今回開発したシステムは、関連研究と同様



図 4 3次元測域センサによる障害物の計測

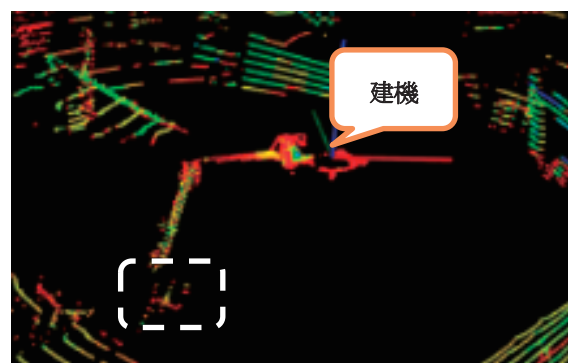


図 5 障害物計測時のLiDARによる障害物計測
※破線部の領域が障害物

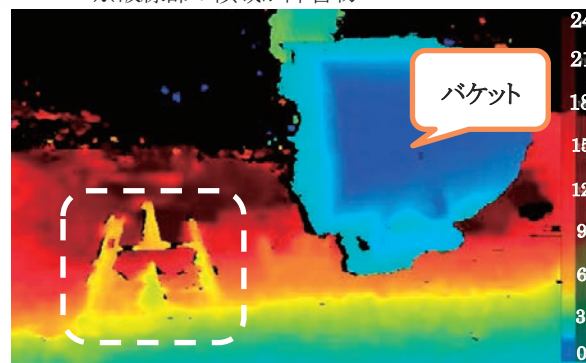


図 6 障害物計測時のデプスカメラの深度画像
※右側のカラーバーはセンサからの距離[m]、破線部の領域が障害物

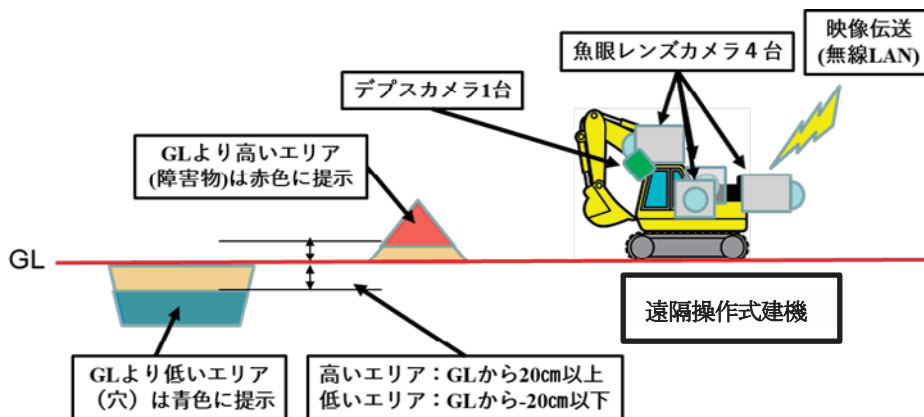


図 7 システム概要

にデプスカメラで取得した点群を俯瞰映像上に重畳して描画するものである。ただし、点群の色情報に関しては、デプスカメラのIntel® RealSense™ D435に組み込まれているRGBカメラから取得する。一方で、本システムの特徴として、地面よりもある一定の閾値以上の高低差を持つものに色情報を付加することにより、容易に障害物の高低差を認識できるよう工夫した。図7に示すように、上空方向を正の方向として定義して、地面より閾値以上の高さにあるものは赤色の点群とし、地面より閾値以下の低さにあるものは青色の点群として重畳して描画している。なお、今回の実験では、建機の履帯の高さを考慮して、高いエリアをGLから+20cmとし、低いエリアをGLから-20cmとして閾値の設定を行った。

本システムの適用例を図8と図9に示す。図8に示すように高台に建機を設置し、人とバケットを地面より高い障害物とし、高台の下り坂を低い障害物としてみなした。図9の俯瞰映像に示すように破線部内の領域にて、人とバケットが赤い点群で描画され、高台周辺が青い点群で描画されている。



図 8 高台の上の建機



図 9 開発した俯瞰映像

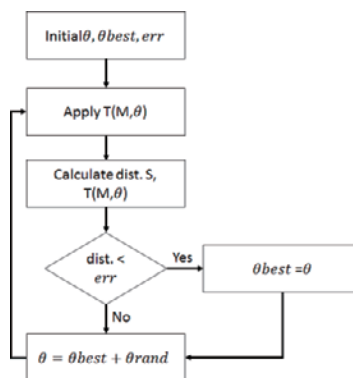


図 10 最適化フローチャート

3.3 俯瞰映像とデプスカメラの点群レジストレーション

本システムは前回開発した俯瞰映像システム⁴⁾がベースのため、デプスカメラのキャリブレーション作業である点群レジストレーション⁷⁾を追加で行うことで障害物提示の機能を有する俯瞰映像が構築される。追加分のキャリブレーションと描画の手順のみを下記に述べる。

- イ) 魚眼レンズカメラの映像で合成された俯瞰映像(ドーム状)を点群情報へ変換する。
- ロ) 俯瞰映像の点群とデプスカメラの点群の点群レジストレーションを行うため、実空間上で同一地点とみなされる両方の点群の組を複数選択する。なお、デプスカメラから選択した点群の集合を M とし、俯瞰映像から選択した点群の集合を S として定義する。
- ハ) 俯瞰映像上にデプスカメラの点群を写像する変換モデルを下記の式で定義する。

$$T(M, \theta) \tag{1}$$

なお、 θ は6自由度の位置・角度とスケールの情報とが含まれる媒介変数である。次に、式(1)にて写像した M と S において、それぞれの組となっている点群の差分から点群レジストレーションの誤差を算出する。その誤差を算出する関数を下記の式で定義する。

$$\text{dist}(T(M, \theta), S) = \sum_{i=0}^n (m_i - s_i)^2 \quad \because m \in T(M, \theta), s \in S \tag{2}$$

式(2)で算出される誤差を最小化するため、 θ の値にランダムな値の θ_{rand} を加算することで、 θ の値を逐次修正させて探索する。その最適化の過程を図10に示す。なお、 err は始めに設定する誤差の許容値であり、 err 以下の誤差のとき θ を θ_{best} として用いる。

- ニ) 最適化が収束した θ_{best} とデプスカメラの全点群と式(1)を用いて、俯瞰映像上にデプスカメラの点群を写像して重畳して描画する。

§4. フィールド実験・実験結果

遠隔操作式建機向けに開発した障害物提示が可能な俯瞰映像のシステムを評価するためにフィールド実験を行った。具体的には、25m×25mのフィールド上に、障害物として段ボール・カラーコーン・盛土・穴が設置された走行フィールドで実験を実施した。そのフィールドを上空から撮影した写真を図11に示す。図中では走行コースの端を破線で示し、カラーコーンがその破線上に一定距離ごとに設置されている。また、図中の矢印が建機の走行ルートである。そして、本システムを搭載した遠隔操作式建機を無人化施工のオペレータ2名(A・B)を被験者として障害物を提示している俯瞰映像を頼りに遠隔操作による走行をさせた。なお、建機の履帯と障害物の距離を容易に認識させるため、履帯についてもデプスカメラで計測して赤く描画している。実験における評価項目は、俯瞰映像上の障害物提示の有無で、走行時間と障害物を回避の可否についてを対象とした。

フィールド実験の実施結果を表1に示す。障害物提示がある場合、いずれの被験者も障害物を回避して走行を終了した。障害物提示ありのとき、被験者に提示している映像を図12に示す。前方の穴が青く描画されており、右側にある段ボールが赤く描画されて障害物が提示されている。その一方で、障害物提示がなかった場合、被験者Bの実験にて履帯が穴に乗り込んだために障害物回避に失敗している。その失敗時の俯瞰映像を図13に示す。図13の破線で示している部分において、履帯が穴に乗り込んでいることが確認できる。一様な色合いをしている地面は凹凸の高低差の情報をカメラで取得して提示することが困難なため、被験者Bは障害物提示なしでは穴を適切に認識できずに乗り込んだ可能性が考えられる。また、障害物を正確に提示している俯瞰映像の方が走行時間を10秒程度要している。障害物提示を有効にすることで走行時間が10秒程度の遅れが生じている要因として、実験中の様子から提示された障害物に意識を取られているためだと考えられる。

また、本実験を通じて2名の被験者にインタビューを行い、下記の意見が得られた。

- 障害物提示機能の切り替えを可能にすべきである。
- 建機の落下と転倒は危険であるため、地面より低い箇所の障害物提示は有用である。
- 地面より高い箇所の障害物提示は、建機が衝突しても走行停止するだけなので、低い方の提示よりは有用ではない。

以上の被験者の意見から、本システムの改善すべき点と有用性が抽出された。

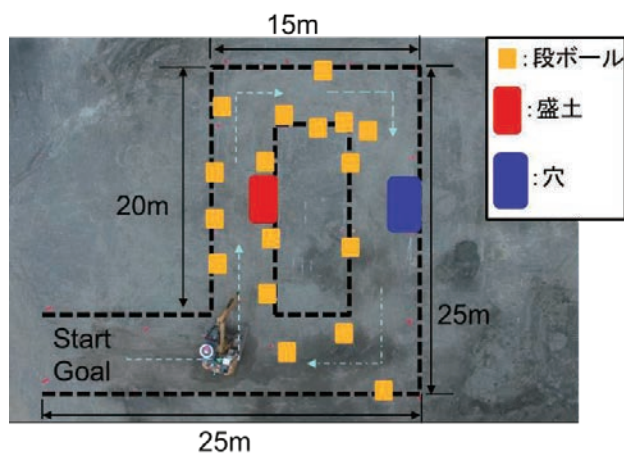


図 11 実験コース

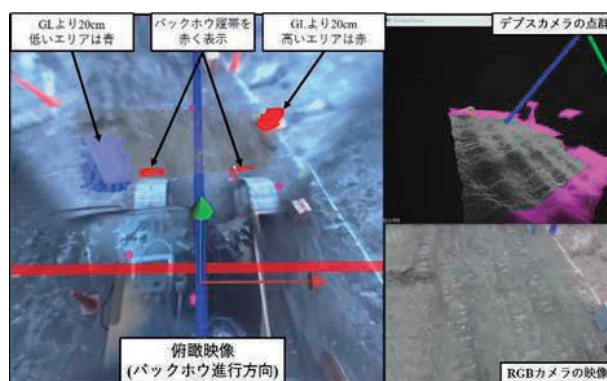


図 12 実験中の俯瞰映像 (障害物提示あり)



図 13 実験中の俯瞰映像 (障害物提示なし)

表 1 フィールド実験の結果

| 被験者 | 障害物提示 | 走行時間 | 障害物回避 |
|-----|-------|-------|-------|
| A | なし | 2分44秒 | 成功 |
| A | あり | 2分55秒 | 成功 |
| B | なし | 2分18秒 | 失敗 |
| B | あり | 2分26秒 | 成功 |

§5. おわりに

本稿は、建設機械の前後左右に設置した4台の魚眼レンズカメラの映像で構築された俯瞰映像とデプスカメラの3次元測距データを点群レジストレーションで合成することにより、障害物を正確に提示可能な俯瞰映像システムの開発を行ったことについて詳述した。そして、フィールド実験とインタビューの結果を通じて、本システムが実際の無人化施工のオペレータに対して有用であることを示した。

今回のフィールド実験では、建機の上空からの視点である俯瞰映像として実施しているが、開発したシステムは任意の視点からの映像を合成して提示できるシステムに改良されている。本機能に関しては、オペレータ自身が望む視点からの映像を提供できるため、高評価の意見を得られている。

今後の展望としては、複数のデプスカメラを用いて建機全周囲の障害物情報を正確に提示すること、インタビュー結果に基づいてより洗練された障害物を提示すること、より詳細な実験を行って課題を抽出すること、容易かつ迅速に立ち上げられる俯瞰映像提示システムの開発が挙げられる。

謝辞

本システムの開発にあたり、有限会社ライテックスには多大なるご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

商標

本文中に記載されている会社名・商品名等は各社の商標および登録商標です。

- Intel RealSenseは、米国及びその他の国におけるIntel, Inc.の登録商標です。
- Velodyne は、米国及びその他の国におけるVelodyne LiDAR, Inc.の登録商標です。

参考文献

- 1) 新田恭士:災害復旧に貢献する無人化施工技術、土木技術、Vol. 67、No. 4、pp. 16-23、2012
- 2) 平野高嗣、坂井郁也:災害復旧のための無人化施工技術の開発、金属、Vol.89、No.8、2019
- 3) 山口崇、吉田正、石松豊:遠隔操作におけるマンマシンインターフェースに関する実態調査、土木学会第59回年次学術講演会概要集、Vol. 59、pp. 373-374、2004
- 4) 佐藤貴亮、藤井浩光、Alessandro Moro、杉本 和也、野末晃、三村洋一、小幡克実、山下淳、浅間一:無人化施工用俯瞰映像提示システムの開発、日本機械学会論文集、Vol. 81、No. 823、2015
- 5) 栗島靖之、小松廉、藤井浩光、田村雄介、山下淳、浅間一:ロボット遠隔操作のための3次元測域センサを用いた俯瞰映像上での障害物提示、第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集、2016
- 6) 栗島靖之、小松廉、藤井浩光、田村祐介、山下淳、浅間一:ロボット遠隔操作のためのLiDARを用いた全方位3次元測距による俯瞰映像上での障害物提示、精密工学会誌、Vol.83、No.12、2017
- 7) Hao Zhu、Bin Guo、Ke Zou、Yongfu Li、Ka-Veng Yuen、Lyudmila Mihaylova、Henry Leung: A Review of Point Set Registration: From Pairwise Registration to Groupwise Registration、Sensors、19(5)、1191、2019

ひとこと

近年、生産性の向上と職場環境の改善とを目的とした建設現場へのICT・ロボティクス技術の導入が活発である。その中で、技術自体の外観に囚われず、建設業のユーザーのニーズ・ウォンツ・シーズとコストとを見据えた価値ある貢献を心がけたい。



坂井 郁也