

製品紹介

ICT油圧ショベル向けステレオカメラシステム
Stereo Camera System for ICT Hydraulic Excavators

松田 豊久
Toyohisa Matsuda
永戸 厚
Atsushi Nagato
菅原 大樹
Taiki Sugawara
厚見 彰吾
Shogo Atsumi
川本 駿
Shun Kawamoto

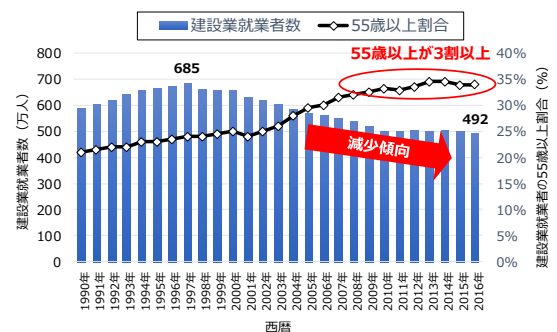
近年、オペレータの減少及び高齢化や新卒就業者の減少に伴い、土木工事現場においても労働力不足が深刻な問題になっている。コマツはその課題に対して、ICTを活用した建機等で建設現場の生産性や安全性を向上させる新サービス「スマートコンストラクション」の提供を2015年に開始した。国土交通省のi-Constructionの提唱による情報化施工推進の効果も相まって、スマートコンストラクションの実現場数は着実に増加してきている。本稿では、スマートコンストラクション向けにコマツが新たに開発したICT油圧ショベル向けステレオカメラシステムについて紹介する。

The labor shortage has become a serious problem in the construction industry, due to the decrease in the number of young new graduate employees and the retirement of the existing mature workers. In response to this situation, Komatsu launched a new service called “SMARTCONSTRUCTION” in 2015, which will improve productivity and safety at the construction sites leveraging its construction machinery with ICT technologies. The adoption rate of SMARTCONSTRUCTION is steadily growing spurred by i-Construction and ICT-aided construction, national programs promoted by the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT). In this paper, we introduce a stereo camera system that is newly developed to be implemented on ICT excavators for SMARTCONSTRUCTION.

Key Words: ICT油圧ショベル, ステレオカメラ, スマートコンストラクション, 3次元点群データ, 施工の見える化, 巡回撮影, i-Construction, 出来高計測, KomEyeMonitor, KomEyeAR, 自動積込み

1. はじめに

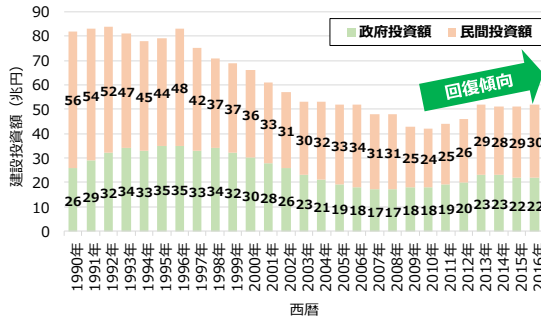
オペレータの減少及び高齢化の進行、新卒就業者の減少といった労働力不足が深刻な問題となっている。実際、建設業就業者数は、1997年度の685万人をピークに2016年度には492万人とピーク時から約28%減少しており、また、建設業就業者の3割以上が55歳以上という状況が続いている（図1）。



<参照> 国土交通省「建設産業の現状」

図1 建設業就業者数の推移

このような状況下においても、建設産業は、インフラの整備や維持管理などを担っていかねばならず、かつ、現場では生産性の向上、安全性の向上（危険作業の緩和）が求められている。実際に、建設投資額は2010年に約41兆円まで落ち込んだものの、その後、回復傾向にあり、建設産業への需要はまだまだ高い（図2）。



<参照> 国土交通省「建設産業の現状」

図2 建設投資額の推移

そこでコマツは、2013年より最新技術を搭載したICT建機を建設現場に提供し、情報化施工の普及に取り組んできた。さらに、どのようにICT建機を活用すれば建設現場の生産性や安全性を向上させることができるかを顧客視点で考え、それを実践するための新サービス「スマートコンストラクション」の提供を2015年に開始した。本サービスの狙いは、建設現場で施工に携わる全ての人・機械・モノをICTを活用して有機的につなげ、日々の施工を「見える化」することにより、現場の生産性を大幅に向上させ、安全でスマートな現場を実現させることである。日々の施工を「見える化」することにより、現場にある全てのモノの動きを、全て情報化し、その情報を基に、PDCA（Plan～Do～Check～Action）を実行し、その都度、見直しをかけ、常に最適な施工計画を現場へ提供していくことができる。

2. ステレオカメラシステムの紹介

日々の施工を「見える化」するために、コマツはICT油圧ショベル向けステレオカメラシステムを開発した。

ICT油圧ショベルキャブ外に搭載されたステレオカメラにて、施工箇所を撮影して専用コントローラで処理することにより、3次元点群データを生成することが可能となる。生成された3次元点群データはカメラ画像とともに、インターネットを経由してクラウドサービス「SMARTCONSTRUCTION CLOUD」に送信される（図3）。



図3 ステレオカメラシステムの概要

ICT油圧ショベル向けステレオカメラは、それぞれ上方と下方を撮影する2組のステレオカメラで構成され、前方約20mの範囲に渡って、左右方向に約30度（図4(a)）、上下方向に約90度（図4(b)）の範囲を計測することができる。

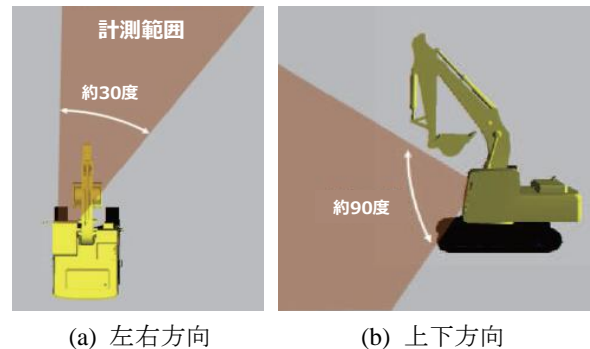


図4 ステレオカメラシステムの計測範囲

このステレオカメラシステムは、施工現場に多数存在するICT建機以外の建機や人による施工の進捗をも管理することができるため、ICTショベルが掘削した刃先位置の軌跡から得られる地形データと統合することにより、現場全体の日々の施工を「見える化」することが可能となる。

ステレオカメラで取得された3次元点群データは、現場内のどこでも、どの端末からでも接続可能なクラウドサービス「SMARTCONSTRUCTION CLOUD」に送信され、日々の施工の進捗状況に反映される。進捗図は切土部分・盛土部分と色分けで表示され、2次元・3次元表示に対応し、任意の断面での進捗も確認可能となる（図5）。

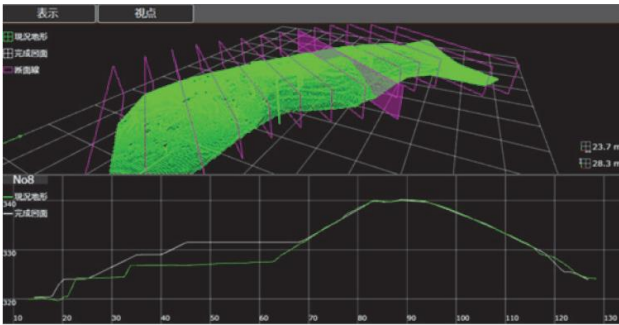


図5 施工進捗断面表示

2.1 ステレオカメラの原理 (三角測量)

ステレオカメラは、人が物を見る原理と同じように、2つのカメラを用いて対象物を撮影して対象物までの距離を計測する。対象物までの距離 D は、左右カメラで撮影した同一対象物の撮像面における画素位置のズレ (視差) Z を用いて (式1) で算出される (図6)。

$$D = \frac{B \times f}{Z} \quad \dots (式1)$$

ここで、 B は左右カメラ間の間隔 (基線長)、 f はカメラの焦点距離を示す。

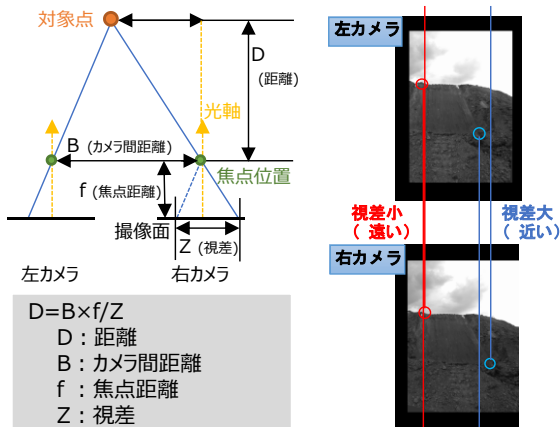


図6 ステレオカメラの原理

2.2 ステレオ処理

左カメラで撮影した対象物と画像特徴が一致する右カメラ画像の画素位置を探索するために、歪み補正処理、平行化処理およびマッチング処理を行って、画素位置のズレ Z から対象物までの距離 D を算出する。

2.2.1 歪み補正処理

カメラのレンズには歪みが存在するため、図7(a)に示す様に、直線が歪曲してしまい正確に視差 Z を求めることが困難である。そのため、視差算出の前処理として、レンズの歪みを取り除く歪み補正処理を行う。

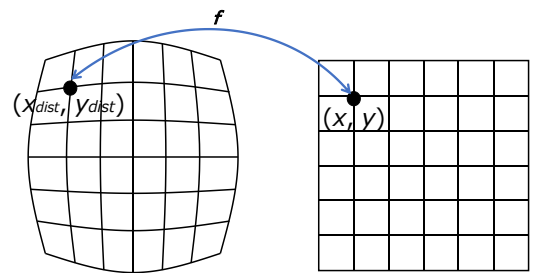
レンズの歪みは、歪み補正前の画像上の位置を (x_{dist}, y_{dist}) 、歪み補正後の画像上の位置を (x, y) 、画像位置 (x_{dist}, y_{dist}) における画像中心からの半径を r 、レンズ歪みの程度を表す歪み係数を k としたとき、下記に示す (式2) および (式3) の通り定義される。

$$x = f(x_{dist}, r, k) \quad \dots (式2)$$

$$y = f(y_{dist}, r, k) \quad \dots (式3)$$

なお、歪み係数 k はカメラ毎に異なるため、生産時に個別に算出している。

(式2)、(式3) を画像上の全ての画素に適用することにより、取得したカメラ画像を歪みのある画像から歪みの無い画像へと変換できる。図7(a)に歪み補正を行ったものを図7(b)に示す。



(a) 歪み補正前 (b) 歪み補正後
図7 歪み補正処理例

2.2.2 平行化処理

左カメラで撮影した対象物と画像特徴が一致する画素位置を右カメラ撮影画像全体から探索するには時間がかかる。そこで、距離計測したい左右カメラの対応画素を同じ行に変換する平行化処理を行う。

平行化処理は、画像特徴が一致する画素位置を探索する範囲を限定するために、物理的には平行関係にない左右カメラに対して、擬似的に平行の位置姿勢の関係になるように画像を再生成する処理である。事前にキャリブレーションを行い、各カメラの焦点距離・画素ピッチ・画素中心 (内部パラメータ) と、左右カメラ間の位置姿勢の関係 (外部パラメータ) を取得する。そして、それらの情報をもとに平行化された撮像面を生成し、その撮像面に対して歪み補正した画像を生成することで平行化処理が実現される (図8)。

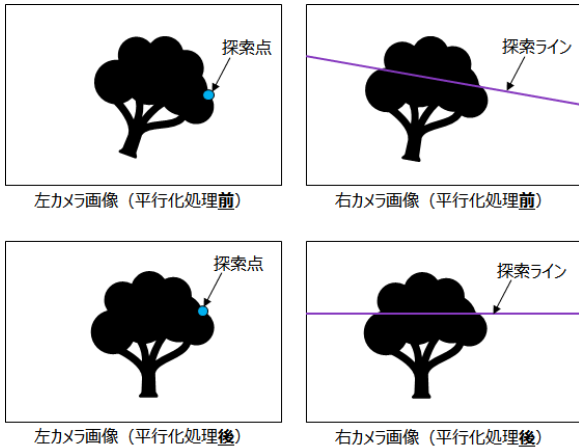
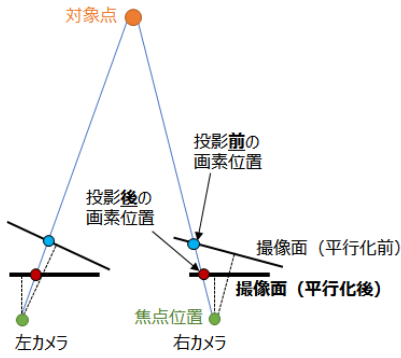


図 8 平行化処理

2.2.3 マッチング処理

平行化処理された左右カメラ画像を走査して、左右カメラの対応画素を探索するマッチング処理を行う。

平行化処理により左右のカメラ画像は平行状態にあるため、左カメラ画像と右カメラ画像で対応する画素は横軸に平行な同一直線上に存在する。そのため、左カメラ画像のある画素（探索画素とする）を右カメラ画像から探索する場合、この探索ライン上のみを探索すればよい。マッチング処理は、探索画素を中心とする所定領域の画素値を参照して類似度を計算し、右カメラ画像から探索画素に対応する画素を探索する（図 9）。

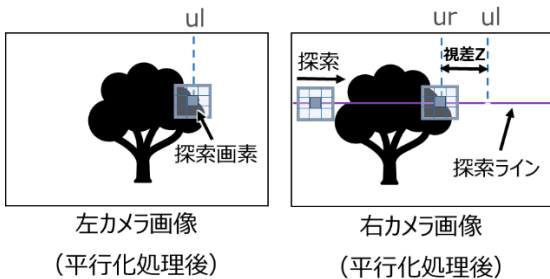


図 9 マッチング処理

2.3 3次元点群データ生成

ステレオ処理により得られた3次元情報カメラ座標を、土木工事現場で一般的に使用される現場座標系に変換する。

ICT 油圧ショベルに搭載された GNSS 受信機により得られる位置情報と、IMU により得られる車体姿勢角、および、キャリブレーションにより求めたカメラの車体設置位置と設置角度に基づいて導出した現場座標とカメラ間の変換行列 R と T を用いて、(式 4) により計測点のカメラ座標 (x_c, y_c, z_c) は現場座標 (x_g, y_g, z_g) に変換される (図 10)。

$$\begin{pmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} + T \quad \dots (式4)$$

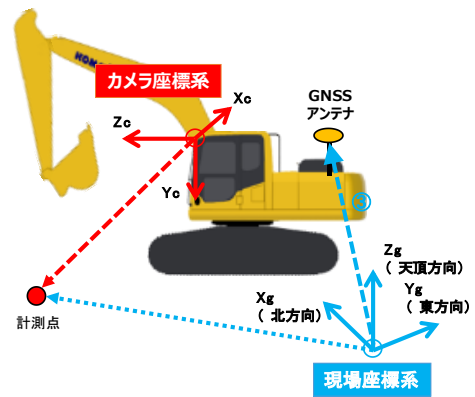


図 10 現場座標系への変換

最終的に、図 11 に示す 3 次元点群データを取得できる。

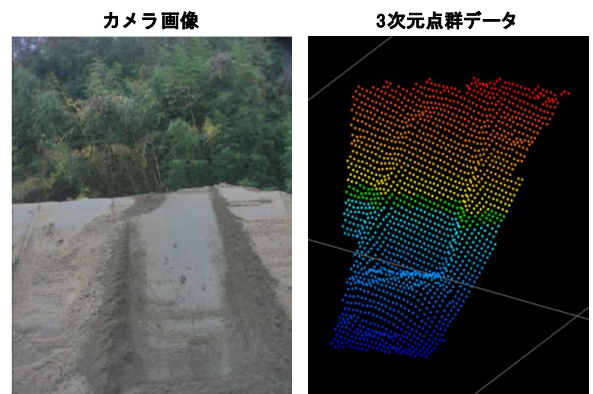


図 11 ステレオカメラで取得した 3 次元点群データ

2.4 旋回撮影

ステレオカメラシステムは静止した状態で撮影スイッチを押下することにより、前方約 20 m の範囲に渡って、左右方向に約 30 度、上下方向に約 90 度の範囲を計測することができる。また、一度の撮影で計測できる範囲を広げるために、旋回しながら連続的に計測できる旋回撮影機能を備える。

旋回撮影機能は、旋回開始時と旋回終了時に撮影スイッチを押下することにより、旋回中に撮影されるカメラ画像の 3 次元地形データを連続的に計測することができる。さらに、オペレータの操作をナビゲーションするためのガイダンス音を準備し、オペレータによる操作を容易にした。

この旋回撮影機能を用いることにより、従来であれば複数回に分けて計測しなければいけなかった建機前方の地形を一度に計測することができるようになり、計測に要する時間の短縮につながった (図 12)。

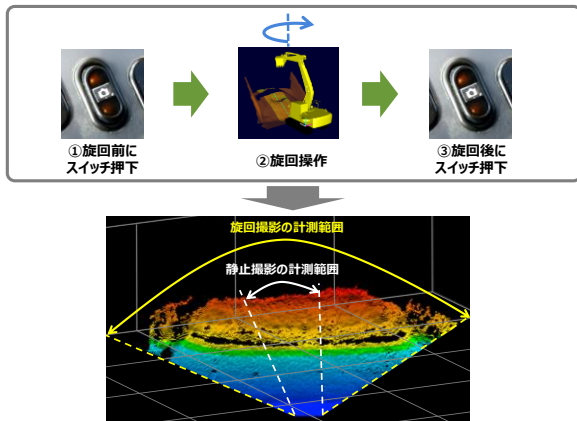


図 12 旋回撮影機能操作フローと計測範囲

2.5 KomEyeMonitorアプリとの連携

タブレットアプリ「KomEyeMonitor」と連携して、カメラ撮影画像を確認できるタブレット連携機能を新たに追加搭載し、どの領域がカメラに映っているのか確認できるようにした。

「KomEyeMonitor」は、無線通信を介してステレオカメラシステムのコントローラから取得した上下方向のカメラ画像を表示するとともに、実際にステレオカメラシステムにより 3 次元点群データが生成される画像範囲やコントローラの状態も表示することができる (図 13)。この「KomEyeMonitor」は、Google Play ストアあるいは App Store からダウンロードして利用することができる。

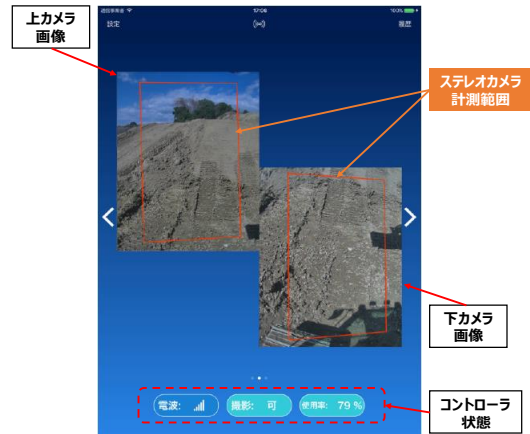


図 13 タブレットアプリ「KomEyeMonitor」表示画面

3. i-Constructionに向けた取り組み

国土交通省は、i-Construction 推進の取り組みの 1 つとして、出来高に応じて部分払いする制度を導入した (図 14)。出来高部分払いが広く普及することにより、企業の財務状況 (キャッシュフロー) 改善、および、部分検査結果がそれ以降の施工計画に反映されることによる品質向上が期待されている。

コマツが開発した ICT 油圧ショベル向けステレオカメラシステムは、地上型レーザースキャナ、UAV による空中写真測量、トータルステーションなどとともに、出来高計測向け計測機器として登録された。

この出来高計測向け計測装置では、実際の計測データを用いること、および、計測精度が水平・標高較差とも 200 mm 以下であることが要求される。そこで、コマツはこの要求を満たすべく、出来高計測向け処理をクラウドサービス「SMARTCONSTRUCTION CLOUD」に追加実装し、前方 20 m の距離まで計測可能とした。

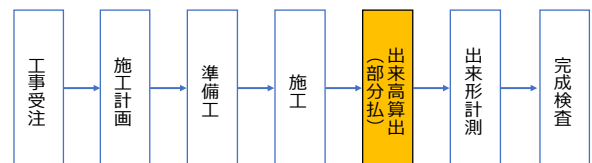


図 14 出来高計測による出来高部分払の流れ

4. 今後の展開

今後は、ステレオカメラシステムを日々の施工の「見える化」以外の用途にも展開し、活用の幅を広げていく。

4.1 応用事例1：KomEye AR

情報化施工が普及することにより、従来必要とされてきた「丁張り」や施工作业中の測量が不要となり、施工効率が大幅に向上した。しかしながら、その一方で、現場から従来あった「丁張り」が失われることにより、施工現場が施工図面の3次元データのどこにあたるのかわかりにくいという声が現場からあがってきた。これは、情報化施工の普及により現場から失われた「丁張り」が、完成地形をイメージする目印になっていたためである。

「KomEye AR」は、従来「丁張り」が担っていた施工現場の目印の役割を代用するものとして、現場の声に応える形で開発された。AR技術により、ステレオカメラで撮影した画像に、3次元設計面データを重ねて表示することで、施工完成イメージや進捗を現場で可視化できるようにした(図15)。



図15 タブレットアプリ「KomEye AR」表示画面

4.2 応用事例2：自動積込み

ステレオカメラシステム搭載 ICT 油圧ショベルの導入により、施工現場を「見える化」することができるようになり、「見える化」の次のステージに進むべき段階にきた。

コマツは CEATEC JAPAN 2018 に出展し、スマートコンストラクションの最新の取組みを中心に、「もっと安全で、もっと生産性の高い、もっとスマートな未来の現場」の実現に向けた新しい挑戦について紹介した(図16)。



図16 CEATEC JAPAN 2018 展示ブース

幕張の CEATEC 会場から 8 km 離れた「コマツ IoT センタ東京」では、自動化建機のデモンストレーションを行ない、ICT 油圧ショベルによるダンプへの自動積込みする LIVE 映像を、展示会場に配信したのである(図17)。



図17 CEATEC JAPAN 2018 デモンストレーション

ステレオカメラシステムを、新たに人工知能(AI)を活用した画像認識技術と融合し、現場の状況を認識する ICT 油圧ショベルの「眼」としての役割を担った。ダンプ荷台位置・姿勢を3次元認識し、ショベルによる土砂積込制御に用いることで、ダンプへの自動積込みを実現した(図18)。

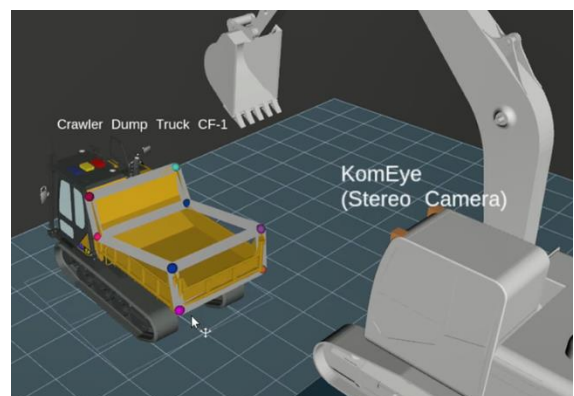


図18 ダンプ荷台位置・姿勢の3次元認識結果

5. おわりに

ICT 油圧ショベルに導入を開始したステレオカメラシステムの機能およびその応用について紹介してきた。ステレオカメラを活用することにより、ICT 建機だけでなく、施工現場に多数存在する ICT 建機以外の建機や人による施工も「見える化」することができる。ステレオカメラシステムにより得られる 3 次元点群データと、ICT 建機から得られる 3 次元データを現場内のどこでも、どの端末からでもクラウドサービス「SMARTCONSTRUCTION CLOUD」で一元管理することにより、日々の施工を「見える化」することができようになった。

さらに、ステレオカメラシステムを活用して、ステレオカメラで撮影した画像に 3 次元設計面データを重ねて表示する「KomEye AR」を開発し、情報化施工の普及に伴い現場から失われた施工図面の 3 次元データのイメージを可視化できるようになった。

今後は、ステレオカメラシステムの活用の幅をさらに広げ、顧客視点に立ったソリューションを提供し続けることにより、魅力ある建設現場の実現および建設業就業者数の増加に貢献できるものと考えている。また、生産性・安全性を向上するために、ソリューションを一步一歩進化させ、施工の「自動化」の実現につなげたい。

筆者紹介



Toyohisa Matsuda

まつ だ とよ ひさ 2013 年、コマツ入社。
開発本部 ICT 開発センタ所属



Atsushi Nagato

なが と あつ し 2003 年、コマツ入社。
開発本部 ICT 開発センタ所属



Taiki Sugawara

すが わら た い き 2011 年、コマツ入社。
開発本部 ICT 開発センタ所属



Shogo Atsumi

あつ み し ょ う ご 2015 年、コマツ入社。
開発本部 ICT 開発センタ所属



Shun Kawamoto

かわ もと し ゅん 2014 年、コマツ入社。
開発本部 ICT 開発センタ所属

【筆者からひと言】

コマツは、ICT 建機を建設現場に提供するだけでなく、どのように ICT 建機を活用すれば建設現場の生産性や安全性を向上させることができるか顧客視点で考え、それを実践するための新サービス「スマートコンストラクション」を提供してきた。

今後も、現場を訪問してお客様と一緒に課題を見つけ出し、課題解決に向けたソリューションを提供し続けることにより、「もっと安全で、もっと生産性の高い、もっとスマートな未来の現場」を実現することが、インフラ整備や維持管理を担う建設産業の支えとなり、延いては、社会への貢献につながると確信している。