

AI・IoT を活用した造成工事における デジタル施工管理システムの構築 ダンプトラックの運土情報記録システム

大貫 奈々美・藤井 攻

造成工事において土運搬管理は必須項目である。従来、ダンプの運土記録は人の手で行われている。複数のダンプが配備された現場では、各ダンプが土を運搬した回数及びその土量を手作業で集計しているが、数え間違いや記録の欠損により信頼性が欠如する課題がある。そこで、今回、ダンプの運土状態を自動で認識・記録し、運土情報を施工管理者向けに提供する運土情報自動記録システムを構築した。本システムは、ダンプの運転席の頭上に設置するダンプ運土状態認識システムとクラウド上に構築される運土状態管理システムの二つから構成されている。

キーワード：ICT, クラウド, GNSS, 3DLiDAR, 点群データ, AI, デジタル施工管理

1. はじめに

建設業界において、少子高齢化による人手不足や労働環境改善が叫ばれる中、生産性向上は早急の課題である。また、2024年には働き方改革関連法が適用された。これにより、罰則付きの残業規制がかけられた。これら問題の解決に向けて、ICT (Information and Communication Technology) や AI (Artificial Intelligence) などの技術を駆使した生産性の向上は必要不可欠である。造成工事において土の運搬管理は必須事項である。土を掘った場所と土を運んで積み上げた場所の施工記録から施工の進捗を把握し、施工計画の策定や品質管理に活用する。従来、ダンプトラックがどのエリアからどのエリアに土を運搬したかは、ダンプ運転手など人の手で記録されている。複数のダンプが配備された現場では、それぞれのダンプの運土記録を回収し、施工現場内の土を運搬した回数及びその土量合計を手作業で集計している。これらデータは施工計画の策定や品質管理には必須のデータであるが、運転手による手作業の記録なため運土した場所の正確な位置を把握できない課題がある。加えて、数え間違いや記録の欠損によるデータの信頼性の欠如といった課題がある。

これらの課題を解決すべく 3DLiDAR で計測した点群データからダンプの状態（土を運んでいるか、降ろしているか）を AI で認識させ、その認識情報と GNSS の位置情報を組み合わせた運土情報自動記録システムを構築した。運搬土量の算出について、ダンプトラッ

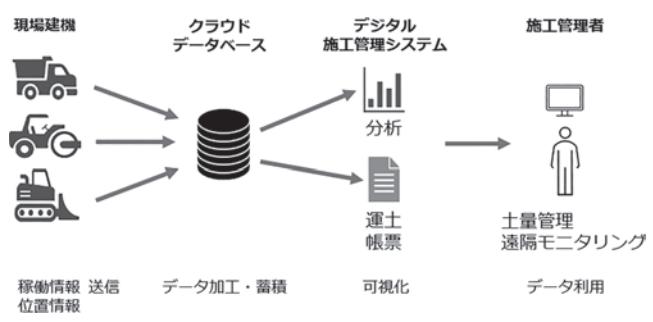
クの最大積載量は既知の値であるため、最大土量を運搬していると仮定すると、（積土場と盛土場の往復回数）×（最大積載量）で大まかな運土量が導きだせる。運土情報はダンプに備え付けられたデバイスによりクラウドシステムに送信され、クラウド上で複数ダンプの運土情報を集中管理する。クラウド上の運土情報は以下のような用途で活用される（図-1）。

- ・クラウド上で運土状況をリアルタイムに把握
- ・クラウド上に蓄積された運土情報を用いて、施工管理に必要な運土帳票の自動作成
- ・施工計画に必要な運土情報の自動集計

2. システム概要

(1) ダンプ用デバイス

ダンプトラックの運搬状態の認識と土砂の運搬位置把握のため、3DLiDAR と位置測位センサー (GNSS) を用い専用のデバイスを構築した（図-2）。



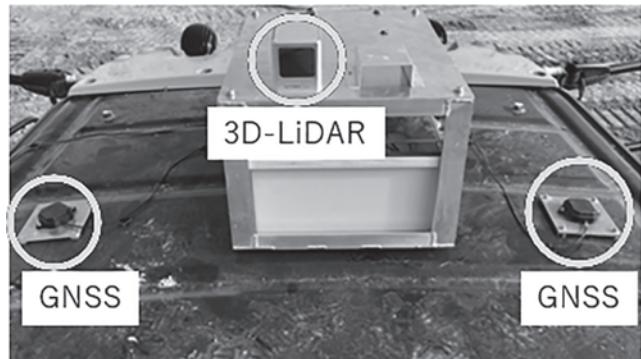


図-2 機器設置状況及びデバイス寸法

3DLiDAR はダンプのベッセルを点群データとして計測し、計測データを点群情報処理用 PC に送る。点群データを受け取った処理用 PC は、Neural Network に点群データを入力しダンプの状態推定を得る。この時、Neural Network はダンプが土を積んでいるか (carry)，土を下ろしているか (dump-up)，土が空の状態 (empty) であるかの 3 状態のどれであるかを推定する。

(2) 位置情報送信デバイス

本デバイスの構成は、GNSS 受信機、LTE 通信機器、位置情報処理用 PC、点群情報処理用 PC で構成され、建機のシガーソケットにより電源を得ることで動作が可能となる (図-3)。推定したダンプの状態 (carry, empty, dump-up) と GNSS より得られる位置情報をクラウドに送信する。

3. AI による状態遷移識別

ダンプトラックの状態を識別する AI モデル作成は、以下の (1)～(4) の手順で実施した。

(1) 訓練データ作成のため点群データ取得

①AI がダンプの状態を認識するための訓練用点群データを取得する。



図-3 デバイス内部構成

②施工中のダンプトラックに図-3 のデバイスを搭載し、実施工中の点群データを保存する。

(2) 取得した点群データへのラベリング

取得した点群データに対してダンプトラックの状態のラベリングを実施する。ラベリングは手作業でも実施可能であるが、膨大な数のデータへのラベリングは多大な労力を要するため、今回はラベリングを自動化した。まず、点群データを保存する際、目視でダンプを監視し、手作業でダンプの状態変化記録した csv ファイルを作成する。例えば、13:00 carry → 13:05 dump-up → 13:06 empty → … のように記録する。次に、この記録を用いて、ある時間におけるダンプの状態を把握し、点群データとダンプ状態を時間データから紐づけることで自動ラベリングを可能とした。上記に示したダンプ状態の記録に即すると、13:00 から 13:05 の間に取得した点群データに carry のラベリングを自動的に付与する。このように点群データ取得の際に手作業で作成したダンプの状態記録 csv ファイルを用いることで、点群データへの carry, dump-up, empty のラベリングを自動化した。

(3) Neural Network を用いた点群データの加工

3DLiDAR は、ダンプのベッセル以外にもレーザーを照射し点群データとして計測するため、不要な情報が点群データに含まれる。そこで Neural Network が点群データを入力する前に、点群データを次の手順で加工する。

手順 1

ダンプの状態認識に不必要的ベッセル以外の点データを削除する。不必要的点データを削除するために、ダンプのベッセルが点データとなり得る座標の範囲を

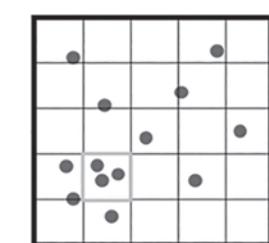
手動で見つけその範囲をパラメータ ($-5 < x < 5$, $y < 10$ など) とし, パラメータで定めた範囲以外の点データを点群データから自動的に削除する。

手順2

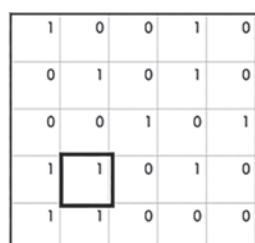
Neural Network に入力する点群データのデータ構造を一定にするためのデータ変換を行う。

Neural Network にデータを入力するには, 入力するデータ構造を一定にする必要がある (例えば, 100 pixel \times 100 pixel の画像)。一方で, 3DLiDAR により作られる点群データは, 複数レーザーを照射して跳ね返ってきたレーザーのみから点群データを作成する特性から, 点群データの数が一定にならない。

そこで, グリッドデータに変換するために xyz の座標空間を正立方体で表現し, その立方体に計測した点データが存在するかを確認する。例えば, 図-4 (a) のような二次元グリッドで原理を説明すると, 図-4 (a) 内の黄色枠のようにグリッド内に点データが存在する場合, 図-4 (b) のグリッドにて 1 と表現する。点データが存在しない箇所は 0 として表現する。このような操作を三次元グリッドで同様に行う。図-4 (c) にベッセルの状態画像と, その時に計測した点群データをグリッド化変換したものを図-4 (d) に示す。青色や緑色の点が 3DLiDAR で計測された点データであり, 白色の立方体が点群データをグリッドデータに変換した際, 1 のフラグが立った箇所になる。このようにグリッドで点データを表現することで, 3DLiDAR で取得した点データの数に依存しない不变な構造で表現でき, Neural Network に入力できる形になる。



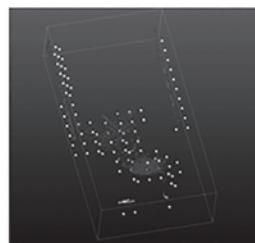
(a) 空間のグリッド化



(b) 点群データのグリッド変換



(c) 点群データ抽出時画像



(d) 点群データとグリッド化

(4) AI による Neural Network の学習

最後に加工されたデータを用いて, ダンプ状態の認識 AI を作成する。学習により構築された AI モデルをダンプに取り付けられるデバイス内のエッジ PC にコピーし, ダンプの状態がリアルタイムに認識されるシステムを完成させる。この時, Neural Network に入力するためのデータ変換プログラムも併せてエッジ PC に導入し, 3DLiDAR が生成した点群データを Neural Network へ入力する前にデータを変換する。エッジ PC 内に設置された AI は, 一定の周期でダンプの状態を推定し続け, 推定能力は PC スペックに大きく依存するが, 今回は 0.1 秒ごとにダンプの状態を推定した。AI が点群データから状態を推定した時の例を図-5 に示す。

さらに, ダンプ状態認識の精度を向上させるため, AI による認識とステートマシンを組み合わせた。(ステートマシンとはステート「状態」とトランジション「遷移」によって制御する仕組み)

ダンプの状態が「empty」 \rightarrow 「carry」 \rightarrow 「dump-up」 \rightarrow 「empty」と循環する性質を利用し, ステートマシンがある状態で, AI が移行可能な状態を認識した場合に, ステートマシンを次の状態に変更する。例えば, ステートマシンの状態が empty で AI が carry を検知した場合 (実際にはダンプに土を詰め込み始めたタイミング), ステートマシンの状態を carry に変更する。一方, ステートマシンの状態が empty の時に, AI がダンプの状態認識を間違え dump-up と誤認識した場合, AI の認識結果を誤認識としてステートマシンは empty に留まる。このようにステートマシンで状態を管理することで, AI が誤認識した場合 (例えば, 空の状態ダンプが移動している時, ベッセルの上に木が覆って間違えて dump-up と認識するなど) でも, システムはダンプ状態の誤認識を減少させることができになる。エッジ PC は, ステートマシンの状態が変化した時に, 変化した状態とその時の位置情報をクラ

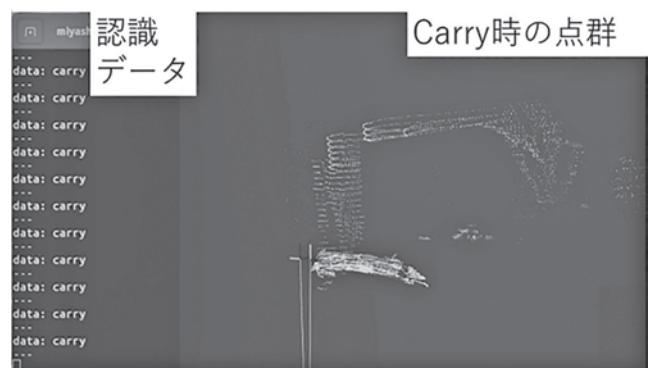


図-5 AI による状態認識及び点群

ウドシステムに送信する。

4. デジタル施工管理システム

デジタル施工管理システムでは各デバイスから得られた施工データを Flask と呼ばれる Python の Web アプリケーションフレームワークを用い可視化した(図-6)。

Flask を採用した理由は、現場ニーズに合わせて柔軟に施工データをダッシュボード化することが可能であるからである。例えば、BI (Business Intelligence) ツールと呼ばれる分析ツールが近年、採用される傾向にある。データ可視化する際、用意されたテンプレートを用い、与えられた枠内でプログラミング知識を有していない人でも簡単に表示・分析することができるからである。しかし、BI ツールでは、後述する施工高さマップや建機リアルタイム監視をするためのテンプレートが用意されておらず、実装不可であると結論づいたため、Flask を採用した。

システムから得られる情報は以下の (a) ~ (f) であり、図-7 は、各種、分析例である。

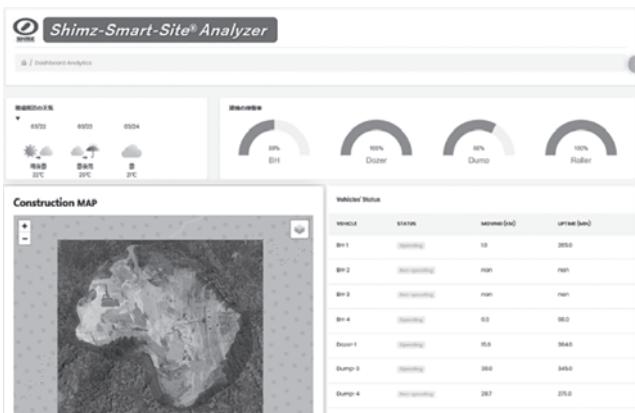


図-6 デジタル施工管理システム（ダッシュボード全体図）

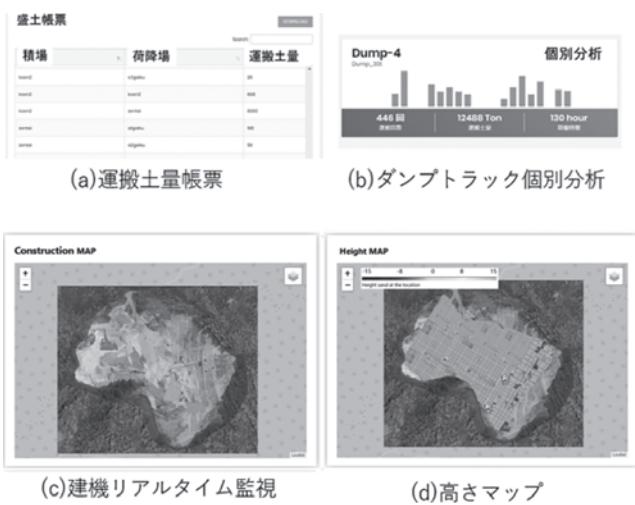


図-7 デジタル施工管理システム分析例

(a) 運搬土量帳票

(b) ダンプトラック個別分析（運搬回数、運搬土量、稼働時間）

AI による状態遷移判定及び GNSS からの位置情報の組み合わせにより、得られたデータであり、現在、ダンプトラックの運転手が手作業で記録している運搬土量帳票をデジタル化したものである。

(c) 建機リアルタイム監視

建機アイコンが現場図面上にプロットされ、どのエリアでどの様な建機が作業しているかが、リアルタイムで把握可能である。

(d) 施工高さマップ

施工高さマップは、現場のある箇所を基準点とし、その基準点の高さからどれくらい高いかを色の濃淡で表しており、今後、振動ローラで転圧した際の出来高管理に使用することを念頭に作成した。

(e) 建機稼働状況把握（稼働率、稼働時間、移動距離）

建機稼働状況把握は各建機の累計稼働時間などの情報が得られる。用途として、例えば、長期間使用されていない建機を返却、若しくは、常に 100% 近く稼働しているのであれば、建機が不足していることを意味するので、追加するなどの計画に利用予定である。

(f) 気象情報

気象庁のデータベースを基に表示しており、直近 3 日間の情報を表示している。このように、現場で必要な外部情報を表示させられることも本システムの特徴である。

5. おわりに

本システムの導入により今までダンプトラックの運転手が手作業で記録していた帳票をデジタル化することが可能となり、従来の手法よりも確実でかつ、効率的に把握することができるようになった。また、GNSS からもたらされる位置情報を組み合わせることにより、どのエリアにどれくらいの土を運搬したかの情報を得ることができ、施工管理者は信頼性の高いデータを基に施工計画の策定・修正が可能となった。

デジタル施工管理システムにおいてはあらゆるメーカー建機を対象にデバイスを取り付けることで、デジタル施工管理システムを導入することを可能とし、UAV による測量や人の手によって記録された運搬帳票を基に把握していた運搬土量や建機の稼働状況（稼働率、稼働時間、移動距離、施工高さマップ）などの情報がリアルタイムで得られることを確認した。

現在のダッシュボードに表示されているグラフなど

のデバイスから得られる時間情報・位置情報などは継続してデータの蓄積及び分析を実施していきたい。

本システムの活用により重機から排出されるCO₂を可視化・分析することで余分な排出を抑え、環境面においても貢献できるよう、システムの継続運用・改修していきたい。

現場に本システムを導入することで、建設業界における少子高齢化による人手不足問題や労働環境改善に寄与できれば幸いである。

J|C|M|A

【筆者紹介】

大貫 奈々美（おおぬき ななみ）
清水建設（株）
土木技術本部 機電統括部
ロボティクスグループ



藤井 攻（ふじい おさむ）
清水建設（株）
土木技術本部 機電統括部
兼 地下空間統括部水力計画G

