

## 技術論文

## ツース脱落／転石検知支援システムの開発

## Development of Missing tooth / Large rocks Detection System

江本 遼平  
Ryohei Emoto  
村上 友哉  
Yuya Murakami  
園山 昌司  
Shoji Sonoyama

コマツのお客さまの事業現場である砕石・鉱山では、昼夜を問わず生産活動が行われており、生産設備の高い稼働率が求められる。今回、お客さまに安心してコマツの機械を使っていただくために、大型ホイールローダ向けの画像認識AIを用いたツース脱落／転石検知支援システムを開発した。ツース脱落による生産設備の破損を防ぎ、またタイヤカットによる積込機の休車を防ぐ本システムについて概要と機能を紹介する。

In the operation sites of crushing and mining of Komatsu's customers, production activities are performed day and night. The production equipment used there are expected to provide high operating ratio. To enable our customers to use Komatsu machines with peace of mind, we have developed the missing tooth / large rocks detection system for a large wheel loader by utilizing AI. We introduce the outline and the function of this system which prevents breakage of the production equipment by the missing tooth and tire cut causing downtime of the loading machine.

Key Words: 砕石, 鉱山, ホイールローダ, ツース脱落, 転石検知, 画像認識, Deep learning.

## 1. はじめに

コマツの商品の大半は、お客さまの事業現場において生産設備として使われている。そして毎日、長時間にわたって高い稼働率と生産性でお客さまに貢献することが求められる。このような商品特性を反映して、お客さまに安心して機械を使っていただくために、コマツでは車両の状態をモニタリングする技術を開発している。これは車両の保身に資するだけでなく、お客さまの現場における生産性と安全性の向上を目的とする。

今回、お客さまの現場の生産性・安全性の向上に向け、大型ホイールローダWA900-8R向けにバケットのツース脱落（※1）や、車両周辺の転石（※2）を自動検知するツース脱落／転石検知支援システムを開発した（図1）。その主な特徴を紹介する。

- （※1）：掘削性能向上のためにバケット先端に取り付けられるツース（爪）が、積み込み作業時に衝撃による破損で脱落すること
- （※2）：採掘現場で発破直後や積込中に落下した岩石のこと。ナイフのように鋭いエッジを持つものも多い。

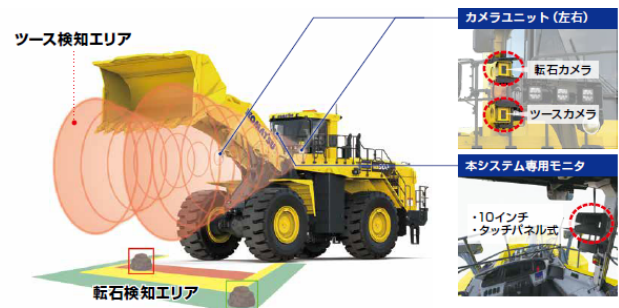


図1 ツース脱落／転石検知支援システム

## 2. 開発のねらいと達成手段

大型ホイールローダの稼働する砕石現場では、ツース脱落によるクラッシャ（破碎機）などの生産設備の故障、転石との接触によるタイヤ破損の恐れがある。ツース脱落は頻度こそ少ないものの、発生時には生産設備の修理コストに加え、生産の停止／縮小による甚大な機会損失を発生させるリスクがある。また、転石との接触によるタイヤ破損は、タイヤが高額な大型機種では高額なタイヤ代、修理時の機械の停止による営業損失を発生させるリスクがある。また、脱落したツースを稼働現場内で探索する作業は大きな危険を伴う。

前述の課題に対し、コマツはツース脱落や危険な転石を画像認識AIを用いて自動で検知できるツース脱落／転石検知支援システムを開発した。本システムは、砕石の原石積み込み現場で多く稼働している大型のホイールローダであるWA900-8Rを対象として開発した。

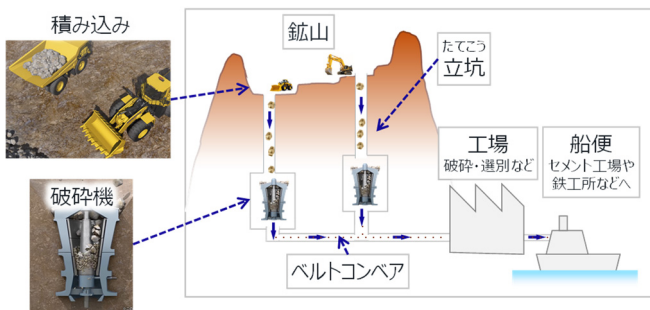


図2 砕石現場の例

**ツースの脱落**

**脱落**

**損害の発生**

- ・探索中に生産が停止
- ・探索による危険作業発生
- ・クラッシャが破損

**破損**

**転石に接触**

**接触**

**タイヤカットによる損害の発生**

- ・修理中に作業が停止
- ・タイヤ交換費用が発生

**破損**

これらの損害を減らすには、ツース脱落/転石を素早く検知することが重要!

図3 ツースの脱落／転石に接触

## 3. 主な特徴

### 3.1 機能概要

ツース脱落／転石検知支援システムは、左右のフロントライト付近に配置した計4台のカメラユニットにより、ツースの状況と転石の有無をモニタリングする。

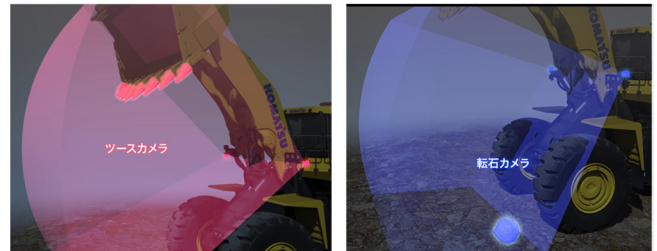


図4 計4台のカメラユニット

検知状況はキャブ（運転席）内の10インチタッチパネル式モニタへの表示と警告音によりリアルタイムでオペレータにツースの脱落、転石の接近を通知し、ツースの確認と転石の回避を促す。警告音の音色や音量、警告範囲は、モニタ上で設定変更可能とした。

**1. モニタメイン画面について**

ツース表示部

表示	通常モード	高感度モード
脱落無し	なし	なし
脱落	ビー	ビピッ 可能値あり
検知していない	なし	なし

ツース脱落検知

転石検知

表示	音
安全エリア	なし
注意エリア	なし
危険エリア	ビピッ

エラー表示部

設定スイッチ

**2. 設定画面について**

画面設定

音声設定

検知転石サイズ設定

音色調整

音量調整

その他の設定項目に関しては、取扱説明書「ユーザ設定画面」をご確認ください。

図5 検知状況と設定項目

本システムはWA900-8Rを購入いただいたすべてのお客さまの生産性／安全性を向上させることを狙いとし、既に使用いただいている車両に後付け（レトロフィット）搭載させることを可能とした。また、システム取付け時の生産機休車によるダウンタイムを最小限

とするため、車体・バケット・ツース・カメラの位置角度に関する調整（キャリブレーション）作業を不要とするシステムとした。

また、転石カメラは運転席から目視では見えないタイヤ周辺の情報をモニタに表示するため、タイヤ周辺の危険をオペレータ自身が確認でき、安全な運転に寄与する。また、既にWA900-8R用のオプションとして市場導入済のKomVisionを同時に装着することで、タイヤの内側をKomVisionで、転石カメラでタイヤの前方、外側を確認でき、転石の回避効果を更に高めることができる。

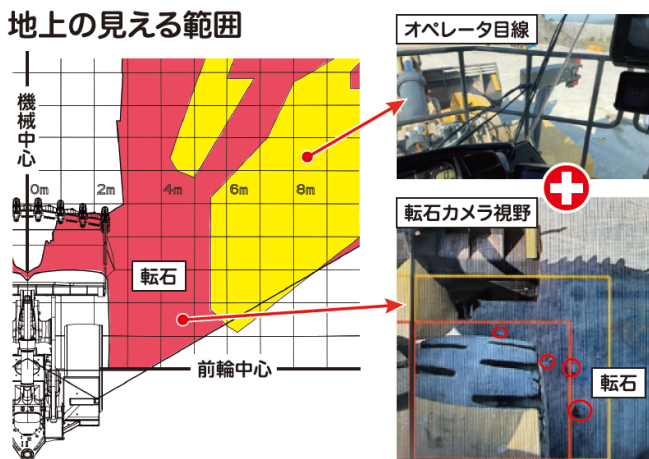


図6 オペレータの目線と転石カメラ視野

### 3.2 検知の仕組み

ツース脱落検知機能および転石検知機能はどちらもAIを用いた画像認識とルールベースの判断から構成する。

画像認識AIは高い検知性能を持つ一方で、条件によっては検知を誤ることがあるなど不確実性も残る。そこで本システムは画像認識AIに検出対象の候補を提案させたのち、ルールベースの判断を行うことで、検出性能を向上させた。

#### 3.2.1 ツース脱落検知の原理

ツース脱落検知はその名の通り、バケットからのツース脱落を検知・通知する機能である。ここでは脱落したツース脱落検知アルゴリズムの概要を説明する。図7にその概要を示す。

ツース脱落検知では、まずカメラで撮影された画像からすべてのツース根本とツース刃先の候補位置を検出する。検出にはDeep Learningのなかでも特に検出性能と計算コストのバランスに優れたConvolution Neural Network(CNN)を採用し、高速な検出を実現した。ここで検出されたツース根本とツース刃先の候補は、画像上の距離に基づきペアリングされる。ペアリングに成功したツース根本とツース刃先は1本のツースとして扱う。

続いて検出したツースの画像上の長さを用いて、ツースの脱落判定を行う。通常、ツースの脱落が発生するとツース装着部が露出し、非脱落状態のツースに比べて短くなる。この特性より、同じ画像中に存在するツースよりも有意に短いツースを脱落ツース候補として判定する。

最後に、ツース状態の時間的な変化を考慮し、各ツースの脱落状態を判定する。本システムの稼働現場では逆光や土埃などの環境要因により瞬間的にツース刃先位置を誤って判定することがある。そこで、ツース状態の時系列変化を考慮し、ツース脱落状態候補を脱落か否か、ユーザが設定した感度に基づき、最終判定を行う。脱落と判定されたツースが1本でも含まれていれば、オペレータに対して、モニタ表示と警告音発報を行う。

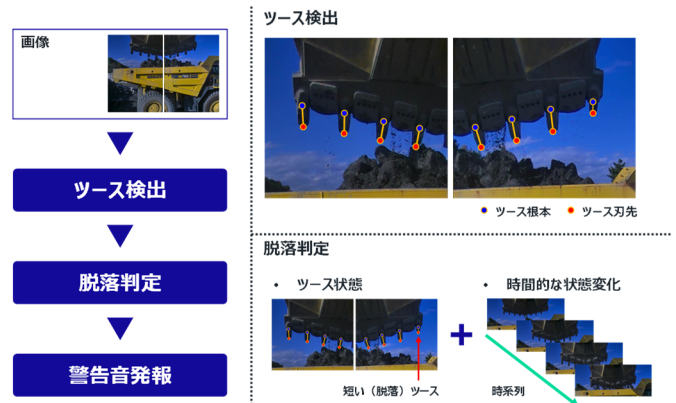


図7 ツース脱落検知アルゴリズム概要

#### 3.2.2 転石検知の原理

転石検知は前輪タイヤ周辺に存在する転石を検出・通知する機能である。ここでは転石検知のアルゴリズム概要を説明する。図8にその概要を示す。

図8にその概要を示す。

まずカメラで撮影された画像から転石の候補を検出する。こちらも検出にはCNNを採用し、高速な検出を実現した。なお、この時点では転石の候補として、粒形の小さい礫や遠くの転石など通知すべきでない物体も含まれている。次の工程で本当に通知すべき転石のみを判断するフィルタリング処理を実施する。

通知すべき転石の条件は、サイズによるフィルタリング、位置によるフィルタリング、ギア状態によるフィルタリングの3つを組み合わせることで実現している。それぞれの役割について詳しく述べる。

##### (1) サイズによるフィルタリング

転石検知ではタイヤカットにつながる大きな転石のみ検出・通知したい。そのためサイズによるフィルタリングは有効な方法となる。設定により指定されたサイズよりも大きい転石のみを通知対象とする。

##### (2) 位置によるフィルタリング

前輪タイヤに近い転石ほど、踏みつけるリスクが高い。そこで転石検知を行うエリアを定義し、このエリア内に存在する転石のみを通知する対象とする。

##### (3) ギア状態によるフィルタリング

転石を踏みリスクが最も高いのはマテリアルをすくい込む一連の動作を行う時である。この時オペレータはバケットに集中しており、前輪タイヤへの意識がそれがちとなる。そこでギアが前進状態のみ通知の対象とする。

上記3つのフィルタリングを適用し、すべての条件を満たしたとき、通知すべき転石と判断し、オペレータに対してモニタ表示を行う。



図8 転石検知アルゴリズム概要

### 3.2.3 データセット構築

Deep Learningでは大量のデータを学習することで高い精度が得られる傾向にあり、特にアノテーションと言われる正解を付与したデータを用いた枠組みが最も精度が出やすいことが認知されている。ただし、類似した特徴を持つデータや一貫性の無いアノテーションが付与されたデータを用いても精度が出ないこともまた知られている。

すなわち、“バリエーション豊かなデータ”と“高品質なアノテーション”を持つデータセットを構築することがDeep Learning技術の肝であるといえる。ここではデータセット構築について私たちの取り組みを述べる。

#### (1) データ収集

開発においてはまずは、学習と評価に使用するデータのサンプル数を確保するため、画像と車両の稼働情報を同時に記録する車載可能なロガーを作成した。本ロガーで記録されたデータは車両稼働情報を用いて学習・評価の対象となるシーンの自動選別を行い、開発効率を向上させた。また、データ収集は社内の実験場だけでなく、お客さまにもご協力頂き、延べ数百時間にわたるバリエーション豊かなデータ収集を実現した。

#### (2) アノテーション

アノテーションは人手によって与えている。人手によるアノテーションは作業者の感覚によるばらつきが発生してしまう。また、同一の作業者が実施したとしても作業タイミングが異なればアノテーションにもばらつきが発生してしまう。そこで、本開発では限度見本を含むアノテーションマニュアルを作成し、高品質なアノテーションを実現した。

### 3.3 ハードウェア

今回、画像認識AI処理には、エッジデバイス向けAIプロセッサを内蔵した車載コントローラを採用した。これにより建設機械に求められる高い耐環境性（温度・振動・電源ノイズなど）と、高速・高精度な画像認識を両立させた。

またセンサには可視光カメラを採用することで、LiDARや遠赤外線カメラに比べ低価格を実現した。

これらのハードウェアをすべて車載し車載上で完結するシステムとすることで、携帯通信網が弱い山奥の碎石現場でも運用可能とした。

### 3.4 使用時の注意事項

ツース脱落／転石検知支援システムは、カメラ画像からツースの脱落や転石の接近を検知するシステムのため、天候や周囲の状況、カメラカバーの汚れなどにより検出性能が低下することがある。そのためツースが装着されているにもかかわらず脱落と誤検知した際や、転石でないものを転石と誤検知した際などに、お客さまにシステムの特徴を十分に理解いただいたうえで使用いただく必要がある。そこで、取扱説明書を熟読いただいたうえでより理解を深めていただくために、安全小冊子と、運転席に備え付けを想定した、システムの“使い処”を解説したクイックリファレンス（早見表）を用意している。取扱説明書自体も理解を促進するため、全面カラーとし画面の説明などをビジュアルで分かりやすく表現した。



図9 クイックリファレンス（上）と安全小冊子（下）

#### 4. 将来の展望

本システムはコマツとして初の商品であることなどから、現在はお客さま限定の販売としているが、今後は一般販売やWA900-8R以外への機種展開を進め、活用の場を広げていきたい。

また今回開発した画像認識AIシステムは、ツールや転石を検知する以外にも、カメラに映る人やダンプ・障害物などさまざまな物体の認識への応用が考えられる。将来的には、このような認識技術を応用してコマツの機械の遠隔化、自動化、デジタル化を推進し、安全で生産性の高いスマートでクリーンな未来の現場をお客さまとともに実現していきたい。

#### 5. おわりに

本稿ではWA900-8R向けツール脱落／転石検知支援システムについて紹介した。世界各地で稼働するWA900-8Rへの本システムの搭載が進み、お客さまの生産性の向上・安全性の向上に貢献することを期待している。今後もお客さまの困りごとをコマツの保有技術で解決する術はないか、常にアンテナを張り巡らせ、お客さまの役に立つ提案ができるよう、精進したい。

#### 謝辞

本システムの開発に当たっては、国内大手砕石ユーザである株式会社戸高鉱業社様、大分太平洋鉱業株式会社様の多大なご協力を賜りました。

両社からはシステム構想時点からのデータ取得、試作システムのPoC、ユーザ目線のアドバイスなど永く多岐にわたるご意見を頂き、その想いを取り込んだ本システム・UIは海外ユーザ様からも褒めの言葉を頂いております。

この場を借りて厚く御礼申し上げます。

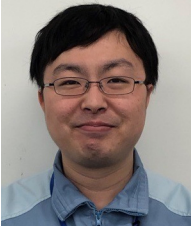
筆者紹介



Ryohei Emoto

江本 遼平 2011年, コマツ入社.

開発本部 デジタルイノベーション開発センタ所属



Yuya Murakami

村上 友哉 2017年, コマツ入社.

開発本部 車両第一開発センタ所属



Shoji Sonoyama

園山 昌司 2016年, コマツ入社.

開発本部 自動化開発センタ所属

【筆者からひと言】

ツース脱落検知や転石検知のシステムはコマツ初の試みであり、また車載での画像認識AIもコマツとして先進的な試みであったため様々な困難があったが、なんとか開発を完了することができた。設計者としては、コマツ技術の種とお客さまの課題解決がマッチし無事お客さまに導入されたことを嬉しく感じている。導入したお客さまからは、現場の課題解決につながるソリューションとして高く評価いただいている一方で、更なる改善の声も多く伺っているので、今まで以上にお客さまに満足していただけるよう進めていきたい。