

# 建設機械の自動運転システム の開発及び実証

株式会社DeepX 代表取締役 なすの かおる 那須野 薫

## 1. はじめに

建設産業では、他産業と比べて高齢化率が高く、現在から将来にわたり、働き手不足の課題感が強い。建設業全体で働き手不足を解消すべく、省人化や自動化を推進する動きが強くなっている。例えば、国土交通省は、「建設機械施工の自動化・自律化協議会」を2022年に立ち上げ、建設機械（建機）の自動施工の実用化に向けた協議を開始した。

技術的に開発を後押しする要素も少なくない。ロボットシステム開発の基盤OSSであるROS（Robot Operating System）の産業利用も進み、建機の自動運転システムをロボットシステムとして開発するハードルが低下した。また、計算機やセンサー等のハードウェアも改善され、ディープラーニング等のAI技術も著しく進展し、周辺環境の認識やそれに応じた適応的なアルゴリズムの開発も盛んである。

建機の自動運転は、現在、開発や実証の段階にあり、普及に向けて課題は少なくない。実現には、「A：建機施工の自動運転時の安全ルールが定まっていない、B：どの工法が自動運転に適しているかユースケースの整理が追いついていない、C：建機の自動運転システム自体がこれまで

になく新規なものであり開発方法が確立していない」等の課題がある。課題Aや課題Bは国土交通省の建設機械施工の自動化・自律化協議会や国立研究開発法人土木研究所の取り組み等で議論されている。課題Cについては、もっぱら民間企業がチャレンジしている。

株式会社DeepXは、「あらゆる機械を自動化し、世界の生産現場を革新する」という野心的なミッションを掲げる東京大学発のロボティクス・AIスタートアップである。現在、油圧ショベルやクレーン、ブルドーザといった大型建機や重機の自動運転システムの開発や実証を事業として展開している。

本稿では、多様な条件下における認識や判断、制御等を含む建機の自動運転システムに関して、当社での事例をもとに、主に課題Cとその解決策を紹介する。

## 2. 建機自動運転システム開発の課題

一般に、機械の自動化の内容は、「①環境、②対象機械、③対象物、④作業内容」が定まるとおおむね一意に定まる。簡便に書くと、例えば、「①締め固められた平らな土の土台の上に、②コンマ5のバックホウがあり、③前方下部にある柔らかい土砂を、④掘削し側方にあるダンプのベッ

セルに積み込む」等のように自動化の内容を定義できる。各要素のばらつきやバリエーションが多くなるほど、自動運転システムが対応すべき条件が多くなり、システム自体が複雑になる。

建設現場では、環境を制御できる工場とは異なり、これらの要素にはバリエーションやばらつきが存在する。例えば、先の例では、ダンプの形や位置、傾き、土の形状や硬さ等、バックホウの駆動系の誤差などが例として挙げられる。建機の自動運転システムは、それらのばらつきに対応するために周辺環境を認識し状況に応じて適応的な判断や制御をリアルタイムに行う必要がある。そのため、従来の工場での自動化システムと比して、システムの複雑度が高い。

また、建機の自動運転システムの開発では、細かい粒度での要件定義と開発、検証を繰り返す必要がある。建機の自動運転システムは、既に世の中に存在し開発方法が確立されたシステムの類ではない。そのため、事前に全ての開発要件を定めウォーターフォール開発をすることは難しい。建機の運転には、安全も関わるため、細かな検証も必要である。

しかしながら、単に、ボトムアップ的に細かく追加機能の開発をすればよいというわけでもない。建機の自動運転システムは複雑なシステムであり、システム内でのあるモジュールの追加や変更がシステムの他の部分に影響する可能性があ

る。そのため、新機能の追加や既存機能の修正を行う中で技術的な負債が蓄積され、機能の追加や修正、それらの検証が困難となることがしばしば起き得る。

そうになると、多くの工数や時間をかけてリファクタリングするか、あるいは、スクラップ&ビルドをせざるを得ず、つまり、それまで開発したのもも全て捨て、一からシステム全体を作り上げるということをしざるを得なくなってしまう。

いずれの場合でも、時間や経済的な損失は大きい。

### 3. システムの拡張性を維持する打ち手

当社では、建機の自動運転システムの開発におけるこれらの課題を解決するために、開発の拡張性の維持を目的として、主に二つの打ち手に取り組んでいる。一つ目が、建機の自動運転システムの設計に共通的に用いられるアーキテクチャの考案及び導入であり、二つ目が、システム統合テストのシミュレータを用いた自動化である。これらの二つの内容を紹介する。

図-1に当社における建機の自動運転システムの開発プロセスを示す。システム開発に際し、開発すべき要素は多岐にわたるが、当社では主にソフトウェア開発を行っている。具体的には、認識、判断、制御等の機能モジュール、それらのシ

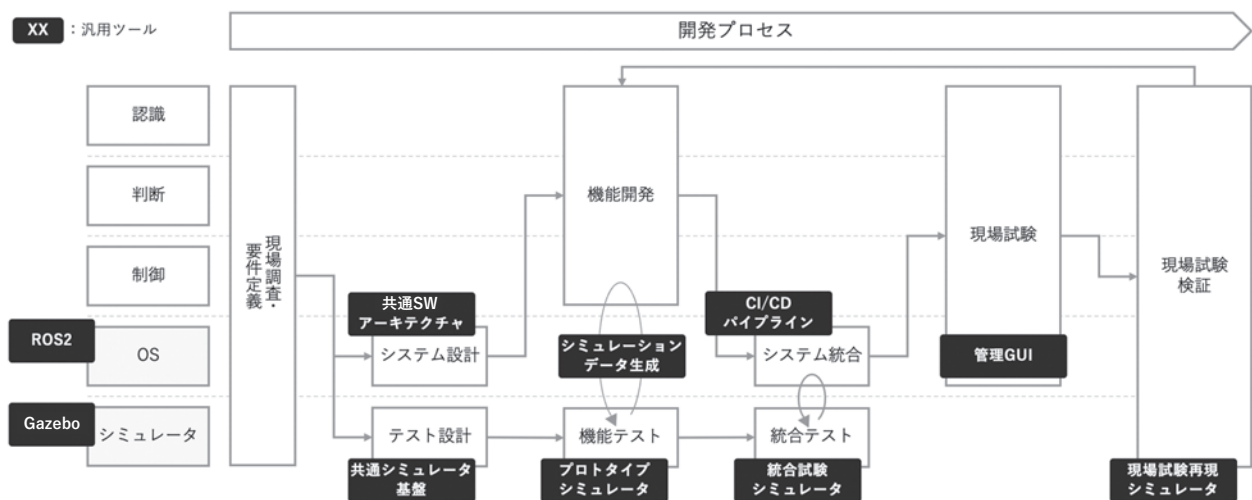


図-1 DeepXにおける建機自動運転システムの開発プロセス

システム基盤である OS (ROS ベース)、シミュレータ (Gazebo ベース) 等の開発を担う。その他のハードウェアの手配や開発等は連携企業が行うこととなっており、ここには記載していない。開発プロセスについては次のとおりである。

- ① まず、現場調査及び要件定義を実施する。特に、環境、対象機械、作業内容、対象物等について理解を深め、開発すべき建機の自動運転システムを具体化する。
- ② 次に、システム設計及びテスト設計を行う。ここでは、当社の過去の知見やノウハウから設計された「共通 SW アーキテクチャ」をもとにシステム設計を行う。同様にテスト設計では、当社が有する「共通シミュレータ基盤」をもとに設計する。これらの特徴については後述する。
- ③ その後、機能開発及び機能テストを行う。これらは、基本的には、開発要素ごとに独立して行われる。そのため、当該テスト時点では、建機の自動運転システム全体に統合した後の要素間の干渉や不適合の検証は必ずしも行われていない。
- ④ 各要素の開発及び機能テスト後に、それらを建機の自動運転システムに統合し、システム全体の検証である統合テストを行う。この統合テストをとおして、追加、変更したシステムモジュールの影響や全体として目的の作業が実現されるか等を評価、検証する。統合テストの課題と当社における打ち手については後述する。
- ⑤ 統合テスト後、現場や試験場で試験を実施する。
- ⑥ 最後に、現場試験での結果を検証、開発要件を修正あるいは追加し、機能開発を行う。その後は、機能開発から現場検証までの一連の流れを繰り返す。

特に、開発プロセス②について、この共通 SW アーキテクチャは、後続する一連の開発ステップ (機能開発、現場試験及びその検証) の繰り返しをとおした継続的な追加機能の開発及び機能修正に耐えられるように設計されている必要がある。

なぜなら、ここでの設計が適切でなかった場合、繰り返される追加機能の開発の過程において、アーキテクチャに沿わない機能要求が生じた段階で、場当たりの開発となり、いずれかのタイミングで開発が破綻してしまうからである。

開発プロセス④について、当社では、この統合テストを現場試験と同様の内容の試験をシミュレータをとおして自動で行えるようにしている。理論的には、この統合テストは実機を用いて行うことは可能である。しかし、実機を用いた試験は準備や実施するのに時間的にも経済的にもコストが大きくなる。

そのため、しばしば頻度を下げたり、あるいは検証項目の一部を省略してテストが行われたりする。実機で統合テストを行うからといってテストの頻度を下げた場合、システムモジュール間の不適合の発見が遅れ手戻りが生じるリスクが上がる。

あるいは、検証項目の一部を省略した場合、アーキテクチャに沿わない部分や不適合の有無が確認されていない部分が蓄積されていき、結果的にシステム全体の破綻や安全リスクの増大につながってしまう。

建機の自動運転システムの複雑性に起因して求められる高い頻度と細かい粒度での統合テストを、実機操作の時間的・経済的コストが高い建機で行うためには、シミュレータを活用した統合テストが有用である。

まとめると、当社では、シミュレータで建機の自動運転システム全体の統合テストを行う前提で事前に「共通 SW アーキテクチャ」及び「共通シミュレータ基盤」を設計及び開発している点、また、統合テストをシミュレータをとおして行うことで、高い頻度で項目を減らすことなく検証できる点、それらによって、安定して拡張性を維持した複雑なシステム開発を実現できている点が特徴である。

## 4. 建機自動運転の事例

以上の開発プロセスに沿って開発を行った事例を紹介する。当社は、さまざまな建機の自動運転に取り組んでいるが、ここでは、ニューマチックケーソン工法で用いられる建機「ケーソンショベル」の自動運転を題材として紹介する。

ニューマチックケーソン工法は、橋梁や建造物の基礎として、また、下水ポンプ場、地下調整池、シールドトンネルの立坑、地下鉄や道路トンネルの本体構造物として幅広く活用される工法である。地上で鉄筋コンクリート製の函（躯体）を構築し、躯体下部に作業空間を設け、ケーソンショベルや排土するためのアースバケットを設置し、掘削と排土及び躯体の沈下を繰り返すことで、縦に掘り進める。

このニューマチックケーソン工法は、次の3点より建機の自動運転の適用に適していると考えられる。

一つ目は、作業空間の気圧が高く多くの場合に遠隔施工が標準で、センサーやアクチュエータのデジタル化が進んでおり、自動化に向けた素地がある点である。

二つ目が、作業空間内には原則として人が立ち入らないため、一般土工と比較し、自動運転時に

安全を担保するハードルが低く、かつ、自動で動く産業用機械の作業半径に人が立ち入ってはならないとする労働安全衛生法の影響も少ない点である。

三つ目は、作業内容において、地山の掘削と運搬、排土の繰り返しが多く、自動化時の経済的なメリットが大きい点である。換言すると、「1. はじめに」で先述した課題 A や課題 B の影響が小さい工法であり、自動運転を実証し、実用化を進めていく上では、望ましい条件が整った工法であるため、他の工法に先駆けて開発を推進している。

シミュレータを用いた統合テストの様子を図-2に示す。左が物理演算を含むシミュレータの様子で、右が当該シミュレータをとおして統合テストを実施している自動運転システムの「GUI」が表示する可視化の画面である。高い頻度でシステム全体の検証ができることで、実機検証時の不具合が生じる頻度が低下し、開発及び検証全体の効率化が確認されている。

次に、開発した自動運転システムの GUI 及び自動運転による掘削や排土の様子をそれぞれ図-3、4に示す。

ユーザは、リアルタイムに地山や建機を可視化する本システムの GUI（図-3①）上で、ショベルごとに掘削エリア及び排土エリアを指定（図-3②）し、自動運転開始ボタンをクリックする。その後、まずシステムが機械を動かす軌道を

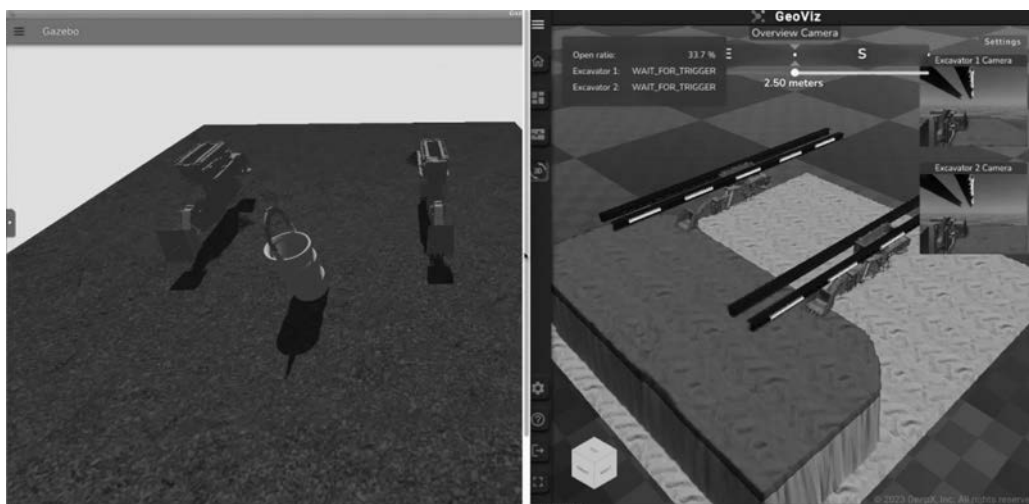


図-2 シミュレータを活用した統合テストのイメージ

地山の形状などを考慮し自動で算出し（図-3③）、次に算出された軌道に従って建機が自動に動き（図-3④）、そして一連の動作として指定された領域で掘削及び排土を自動で連続して行うことができるようになっている。

ユーザは領域を指定した後は建機の挙動の監視だけをすればよいため、図-4のように複数台の建機を1人で動かすこともできる。また、夜間での連続作業によって、工期全体を短くできる可能性もあるとして期待されている。

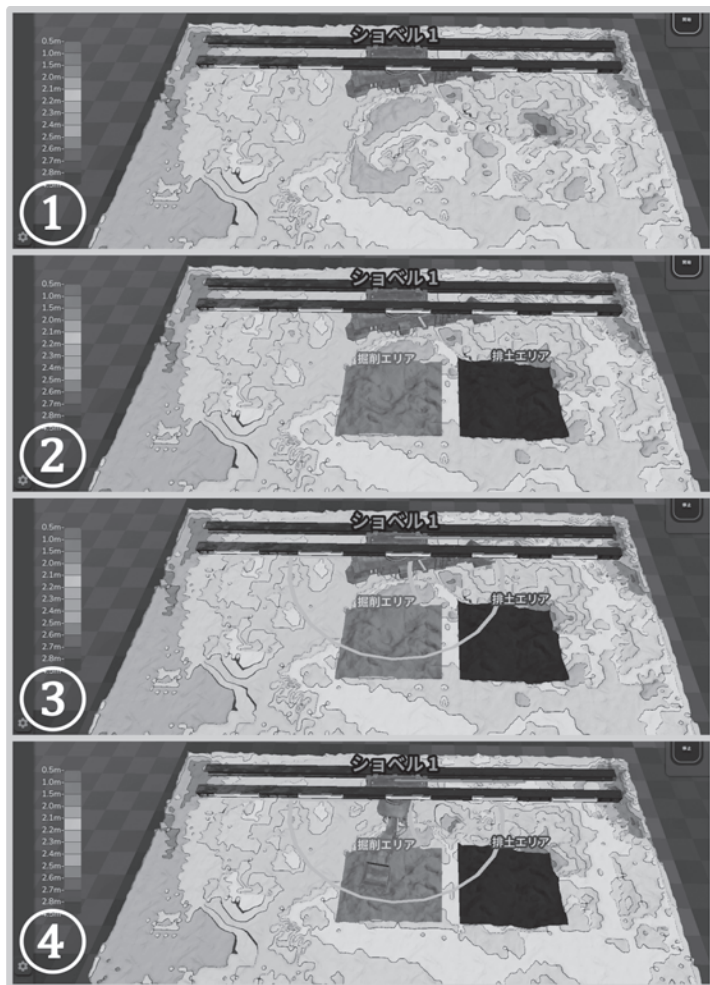


図-3 自動運転システムの GUI 及び自動運転の様子

## 5. おわりに

本稿では、建機の自動運転システムを開発する上で課題となる拡張性を維持した開発の難しさについて説明した。その後、当社で取り組む打ち手として、共通アーキテクチャの導入及び開発、または修正したシステムモジュールの統合テストをシミュレータによる自動化及びその有用性について説明した。建機の自動運転システム開発はいまだにその手法が確立した段階ではなく、本稿で紹介した内容も、今後の開発や検証をとおして改善していくことになると考えられる。

DeepX は、今後も建機の自動運転システムの開発や実証を事業として推進し、中長期的な観点での建設産業全体の生産性や安全性の向上に貢献していきたい。



図-4 1人が2台のケーソンショベルを自動運転させる様子