平成4年度建設施工と建設機械シンポジウム

特別講演「建設ロボットによる建設業の生産性向上ならびに自然災害対応
～できていること・これから期待されること～

講　師：永谷　圭司　氏
東京大学 大学院 工学研究科
ｉ-Constructionシステム学寄付講座　特任教授

日　時：令和4年11月29日（火）
13：00～14：00

場　所：機械振興会館　B2ホール

＊　文中の（ｐ数字）は、令和4年度「建設施工と建設機械シンポジウム　特別講演」同資料編のページ番号を表す

○建山　建設施工と建設機械シンポジウムの実行委員長をしています立命館大学の建山と申します。特別講演会に御参加いただきまして、誠にありがとうございます。

では、掲示していただいているとおり、東京大学の特任教授をしておられます永谷圭司先生をお招きいたしました。

皆さん、ムーンショットって聞いたことはありますか。ムーンショットというのは、技術立国を掲げている日本なのですけれども、どうも最近技術の優位性がどんどん低下してきて、技術でこのまま生きていけるのかという状況になってきているのだと思います。そういう中、日本は科学技術をどんどん奨励して再び技術立国を掲げていくというところに方針を取って、ムーンショットというのは、地球からボールで月に届くようなとてつもない研究をどんどんやってもらおうというのでムーンショットというプロジェクトが動き出したということです。

後ほど多分永谷先生のほうから少し御紹介があると思うのですけれども、9種類ぐらいの目標を立てまして、それぞれの目標でどんなことを目指しているのかということで募集して、それで、それぞれの目標に対していろいろな先生方、研究者の方々、あるいは技術者の方々、そういう方々が集まって大きなグループを作って研究を進めておられるということです。そんな中、我々建設分野に関わるのはこの永谷先生のプロジェクトということになります。建設ロボットとAIをコンバインして、2050年という今から30年近く先を見越して研究を進めていこうということで取り組み始められたというのが今日御紹介いただく内容かと思っています。

建設ロボットの研究というのは、これまではそれぞれ個別に会社であったり研究者であったり、そういったところが個別に行ってきたと思うのですけれども、今回恐らくほとんどの建設ロボットの研究者が参加されて統括的に建設ロボットの技術開発を進めていこうというスタンスで研究プロジェクトが動き出した。これは初めてのことではないかなと思っています。

今日はその辺りの事情、どこを目指していて、さらにどういうところまで行くのかというところで永谷先生にお話を頂こうと思います。

それでは、永谷先生、どうぞよろしくお願いします。

○永谷　東京大学の永谷です。建山先生、御紹介どうもありがとうございます。

今日は「建設ロボットによる建設業の生産性向上ならびに自然災害対応」、副題として「できていること・これから期待されること」。先ほど建山先生に御紹介いただいたムー

ンショットの話もこれから期待されることの中で少し触れながら、できていること、できていないこと、「これからどんなことをしていったほうがいいか」というところについて御紹介をさせていただきつつ議論できればと思っています。まず最初に、よく講演会で私が使わせていただいている導入で「ロボットとは」というところから始めたいと思います。アイスブレーキングということで最初にこの話題から入りたいと思います。

ロボット、これはチェコ語で労働もしくは強制労働という意味をもともと持っていて、チャペックの「R.U.R.」という戯曲のところで最初に出てきたワードなのですけれども、「ロボットとは、人の構造を模擬した人間の仕事を肩代わりする機械です」とか、「入力があって、判断があって、出力があるものをロボットと呼ぶ」なんてことを言っている人もいます。ところが、ロボットに実は明確な定義というのはございません。ですので、建設ロボットと言ったときに何を指すかというのは、実はその建設ロボットに携わっているその人が持っているロボット観に依存するというところがあり、これが結構問題で、こういうことを，まず皆さんに少しお考えいただければなと思ったところです。

定義がないと言っておきながら、実は、定義はあるのです。JISがロボットを定義しています。JISのB0134というのが、もう随分昔、98年ぐらいからだと思うのですけれども、産業用マニュピレーティングロボットというものを定義しています。最近、2015年に新しく言葉を定義し直しました。「二つ以上の軸についてプログラムによって動作し、ある程度の自律性をもち、環境内で動作して所期の作業を実行する運動機構」というものがロボットだそうです。このロボットの定義に対して、多くのロボット学者は反対すると思います。だって、「ある程度の自律性って何？」とか、「軸があるだけでいいの？」とかいろいろあります。ロボット学者の間では、大体「ロボットって何ですか」という話になると、なかなか一致しない。というわけで、「ロボットに対する定義はない」と、まず思ってください。

ロボットの定義の例として、私自身がすごく気に入っているものを紹介します。これは私の大学院のときの師匠の、油田信一教授が定義したものなのですけれども、僕はもうこれが大好きでいつも使わせていただいています。ちょっと想像してみてください。川で50年前に ── 50年前に川で洗濯しているおばあさんは、いないかもしれないのですけれども、おばあさんが川で洗濯をしていました。皆さんがその横に行って、「あなたは早く生まれ過ぎた。50年後の時代には魔法の白い箱があって、洗濯物を入れると洗濯をして乾燥までしてくれる」と。これはおばあさんにとっては確実にロボットです。ところが、こ

れを今の時代で、これを誰もロボットだと言いません。これは単なる全自動洗濯機ですと。それと同じように、腕があって料理をしてくれるロボット、きっとこれが実現するとロボットとは呼ばれなくなる。

ということで、ここでのロボットの定義は「夢の実現の一歩手前」です。これを真面目に解釈すると、ロボットは，世の中に1台も存在しないということになります。できたらロボットではなくなってしまうので。でも、この定義，私は結構好きで、ロボットというのはそういうものだよ、という話を割にいろいろなところでしゃべらせていただいています。一方で、ロボットというのは存在しないのですけれども、「ロボット技術」というのは存在すると思っています。こうなればいいなと出来上がるものを目指して、その途中の過程で作られる技術をロボット技術と呼び、ロボットというのは出来上がってしまったらロボットではなくなるので存在しません。ということで、私としてはロボットとロボット技術というのを、言葉を分けて使うことを提案しています。では、「建設ロボット」といったらどうでしょう？建設ロボットも何となく期待を込めたものであり、きちんと出来上がってしまったらやはり建設機械ではないかなと僕は思っています。

ここまで、ロボットの話をさせていただいたのですけれども、最初にロボットの定義なんていうぐらいなので、私自身、もともとロボット屋です。ロボットの技術開発を大学院の頃からずっとやってきました。ここに年表があるのですけれども、この中で少し薄く抜けているところ、実は僕の年表の中で割に多くの災害に遭遇してしまっております。古くは中学校の林間学校で台風が直撃して帰れなくなった問題というのから始まって、その後、9・11のとき、たまたまアメリカにいたので帰れなくなり、10日ぐらいサンフランシスコでずっと缶詰になりました。ロサンゼルスで事件が起こったのですけれども、その後サンフランシスコまで車でずっと運転して、そこで飛行機が飛ぶかなと思ったら10日飛ばなかった、そういう感じです。3・11のときには仙台に住んでおりまして、これは仙台の私の自宅ですけれども、15階建ての15階に部屋があったらこのようになっていました。このように、割と災害に遭遇してしまっているので、そんな理由もあり、災害対応ロボットというのを割に長くやらせていただいております。

ちなみに、この動画、3・11のときに原発が暴走して「原発の中を探査するロボットを何とかせい」という話が起こったときに、当時、プロジェクトでやっていた災害対応ロボットを原発対応に変えて、建屋に入れました。クインスというロボットなのですけれども、このような仕事にも携わらせていただきました。

1987～1997が筑波大学で、岡山大学、東北大学を経て、今東京大学の「i-Constructionシステム学」寄付講座というところで特任教授をやらせてもらっているというところです。最初は、屋内のロボットからはじめ、今は、この建設ロボット関連をやらせていただいております。

本日の講演内容は、建設分野の生産性向上並びに自然災害対応を目指したロボット技術の現在と未来です。建山先生から「ムーンショットの話をしてください」という御依頼もございましたので、特にロボット技術の話、これから期待されることの中で今やっているロボット技術の話について少し御紹介させていただければと思います。

（ｐ5）まずムーンショットの話です。先ほど建山先生からもございましたけれども、目標を決めて、その目標について長期的に達成すべき目標をいかに達成するか、そのためにはこの期間どういうことをすればいいかというのが、このムーンショット型研究開発の建てつけになっています。

ここに、目標1～目標9までありますが、この中の「2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現」するという、この目標3の中に私のプロジェクトがございまして、その中身としては「多様な環境に適応しインフラ構築を革新する協働AIロボット」となります。このタイトルが長いので略称を考えました。「いろいろなところにいる協働AIロボット、一緒に複数で働いてくれるロボット」ということを目標にしたプロジェクトということで、CAFÉ（Collaborative AI Field robot Everywhere）プロジェクトと呼んでいます。

中身はどういうことをやるかと申しますと、複数のロボットが割にタフな環境でインフラ構築を行ったり、災害対応を行うことを目標としています。今ちょっと申し上げましたけれども、自然災害対応と月面拠点構築、この2つが大きな目標となっていて、その中核になるのは複数台のロボットが協調して仕事をするというところを目標としています。このようなものを実現するフィールドロボットシステムの構築ということで、実際に何をやるのかというのを最近、コンピュータグラフィックス、CGで作りましたので、まずはそれを御覧ください。

（動画再生）

こんな感じのCGを使うときっと分かってもらえるかなと思って、最近やっとできたCGになります。

（ｐ7）プロジェクトの構成を御説明しますと、真ん中に「多様な環境においてインフラ構築を行う協働AIロボットシステムの実現」、これが目標なのですけれども、これを実現するために「土工を革新するAIロボットシステム」、ハードウェアですとか制御とか、そういうところ、それから「複数台ロボットの動的協働システム」、これが複数台で何かやるときにはどのようなアルゴリズムをすればいいかというようなソフトウェア的なところ、3つ目が「現場を俯瞰するセンサポッドシステム」、この3グループで現在研究開発を進めています。

どんなメンバーと申し上げますと、先ほど建山先生からも少し御説明がありましたけれども、いろいろな分野から人を集めています。ロボット工学者と土木工学者、土木のメンバーとロボティクス、機械のメンバーが一緒にやっているというところがポイントになります。そこに建機メーカーとしてはヤンマーさん、ゼネコンとしては熊谷組さんに、一緒に混ざっていただきまして、コンサルとして国際航業さんが入っています。あと国研として土木研究所もいらっしゃいますし、JAXAも宇宙絡みで入っています。メンバーの数はかなり多いのですけれども、結構いいメンバーで一緒にやらせていただいております。

次に、今日の講演の内容、どうやったら生産性が向上するか、そこら辺をうまく絡めまして、これからお話をしたいと思います。

（ｐ4）建設分野のロボット技術で重要なこととして、ロボット側、機械側からの視点ですけれども、3つ非常に大事なことがあると考えています。それが己を知ること、環境を理解すること、動作を学ぶこと、ほかにもいろいろな分け方はあるのですけれども、これが分かりやすいので、3つに分けました。

この己を知ることの中に建設ロボット、建設機械はどこにいるのというポジションと、あとどんな姿勢をしているのという姿勢があります。環境を理解することというのが、センシングですとかマッピングと書いてありますけれども、この中にはエバリュエーション（評価）というのも入っています。動作を行うことというところには、モーションプランニングとか動作計画とか動作のコントロールなんていうところもあります。この3つに分けて、「できていること」、もしくは「できていない」、「これから期待されること」について紹介したいと思います。

（ｐ10）まずポジションの話、建設ロボットが、今、割と自動化できている最大のポイントであり、若干ネックにもなってしまっているかなと思っているのが、位置推定をGNSSで行っているところです。GNSS（Global Navigation Satellite System）というも

のを使うと、非常に高精度に位置が分かるというのが今、建設ロボットを支えているかなり大きなところなのですけれども、このGNSSの数は、現在どんどん増えているので精度も年々向上しているというありがたいことになっています。

表の左側は2018年の衛星の個数で、矢印を書いて右側に書いてあるのは、最近の衛星の個数です。なぜかアメリカのGPSが1機減っているのですけれども、ガリレオ、ヨーロッパの衛星は増えていますし、中国のバイドゥはとにかく倍増しています。 GNSSがたくさん飛んでいれば、基本的には、見える衛星数が増えて精度が上がるということなので、GNSSは毎年、放っておいても精度が上がっていくというのが、今のおいしいところであります。ちなみに、左下に「できていること」と書いてあるのは、現在、実用化されている技術です。できていないことというのはまた出てきます。

（ｐ11）位置誤差についてですけれども、単独測位誤差、これは皆さん御存じだと思うのですけれども、大体5mぐらいなのですが、その5mの誤差の内訳というのは、衛星時計の誤差とか軌道の誤差、電離層の遅延、対流圏の遅延、マルチパスと受信機の雑音というところで、ちょっとずつ誤差が乗って最大今5mぐらいの誤差になります。

固定局があると、つまり「自分の位置は分かっているよ」という機能を使ってやると、誤差がぐっと小さくできるというところなのですけれども、（ｐ12）大体イメージとして単独測位であれば、5mの中に、このようにばらけていますけれども、ディファレンシャルを使うとそれが真ん中に寄って、さらにキャリアスムージングを使うと誤差が小さくなっていき、RTKの技術を使うと、とても小さい誤差になる。この精度の高さが，RTK-GNSSがとにかく今建設業界で使われている最大の理由になります。

これはちょっと飛ばしますけれども、外国でも大きい鉱山で車がバンバン走っているのを見ると、「何でもGNSSを使えばいいかな」と思ってしまうこともあります。しかしながら、（ｐ13）実は難しいところは、現場の方は非常によく分かっているのですけれども、周りに物があると、衛星数が幾ら増えたからといって、本当に正しい位置がわかるとは限らないところがあります。

特にここで書いているのは、可視衛星、見える衛星が直接見える場合には信号が直接来るのですけれども、反射して返ってくる場合もあるし、もっと問題なのは、不可視衛星と言って、装置が見えないはずなのに、反射した信号を拾って見えた気になっているところにあります。こういうことになると、RTKの解が収束せず、位置誤差が大きくなってしまうという問題があります。これは都市部の絵になっているのですが、（ｐ14）実際に

は、山肌ですとかダム現場、そのようなV字になっているところはもちろん、こういう問題があるので、こういうマルチパスを解決するため、千葉工大の鈴木太郎先生らは、可視衛星のみを用いた測位を提案しています。これは、「山がある方向のGNSSからの情報は無視する」といった、あらかじめ地形情報がある程度分かっているという状況で行うGNSSの衛星を選択することで精度を上げるという方法です。（ｐ15）いずれにしても、橋の下に行ったらやはり見えなくなるということがあるので、GNSSが信頼できるからといって、それだけでずっと押すという話はちょっと難しいなと考えています。位置推定はいろいろな方法でやるのがいいというのがロボット屋の感覚として持っているので、そこも考えると別の方法が必要であろうということが分かるわけです。

（ｐ16）では、別の方法として、SLAMという方法を紹介します。SLAMという言葉を聞いたことがある方もいらっしゃるかもしれないのですけれども、SLAMというのは、そもそも、位置推定ではなくて「地図を作っていくための技術」で、Simultaneous Localization and MappingのSとLとAとMの頭文字を取ったものです。この中の「地図を作りながら」の部分を外し、あらかじめ知っている地図の中で位置推定をするという格好で使うやり方が、非常に最近よく使われています。

ちなみに、このSLAMというのと建設現場でググッてみると、トンネル坑内で建機の自動運転を実現ですとか、AR技術を用いた大規模建設現場の3次元位置情報の取得に成功というものがヒットします。このように、SLAMという言葉がどんどん今建設現場のほうにも入ってきています。

（ｐ17）どんなことができるかという部分ですが、この例は、自動車がレーザー距離計を持ったまま走って環境地図を作りながら自分の位置も修正をする、もしくは確認しながら走るので非常に精度のいい環境地図が作れるというものです。こういうものが，最近ではコンピューティングパワーも上がったため、どんどんできるようになっています。こういう技術を使えばSLAMを使って位置推定ができるので、（ｐ18）さっきのGNSSみたいな話はあまり使わなくてもいいのではないかと思う方もいらっしゃるかもしれません。ただし、結構いろいろ問題もあります。先ほどのSLAMの技術の中でスキャンマッチングという方法があるのですけれども、これを使って位置推定をする例を簡単な模式図で示します。今、水色のこういう地図が分かっているとして、自分のダンプトラックの前についているレーザー距離計でこんなレーザーのプロファイル、データが取れたとすると、スキャンマッチングというのは何するかというと、地図の上に合わせ込みます。（ｐ19）合

わせ込むと、こういう格好にするとぴったり合うねと。ぴったり合ったとすると、自分の位置は、本当は最初に思っていたよりもチョット斜めっていたことが分かるので、これにより自分の位置を修正する。これが一番単純なスキャンマッチングによる自己位置推定の説明になります。これは、割によく使われている技術です。このスキャンマッチングを行うと、GNSSがなくても、周りの環境情報が分かれば自分の位置が分かるよねというので、こういうのをロボットに乗せようという話も比較的多く使われているのですけれども、問題もあります。（ｐ20）ちょっと想像していただければ分かるとおり、右と左に同じ壁がずっとつながっていると、実は自分の位置がこのラインの上のどこにいるか分からなくなります。だから、スキャンマッチングをやったからといって必ずしも、いつでも自分の位置が分かるとは限らない。結構環境依存の部分が大きい技術になります。ですので、SLAMというと、何となく最近の技術で自分の位置がぴたっと分かると期待されますが、環境依存であることをしっかりと認識しておく、ここでは使えるけれども、ここでは使えないということを知ることが大事です。それはGNSSも同じです。ということで、適材適所でこういう技術を使っていくというのが大事であろうということになります。

（ｐ21）先ほど少し説明を最初にこんなグループでやっていますと言って説明をさせていただいた私どものCAFEプロジェクトで行っているところでもSLAMの技術は実装しております。これは、先ほど移動体の上にセンサを乗せていたのですけれども、センサを環境に埋め込み、その中で動く分には、建設ロボットがセンサを持っていなくていい、という立ち位置になります。そうすると、このレーザー距離計で挟まれた中で、クローラキャリアダンプの動きが分かり、位置が分かると走行ができる、というものになっています。つまり、発想を少しだけ転換し、外置きのセンサで環境を測るだけでなく、ロボットそのものも測ることによって、ロボットの位置推定の精度を上げる。（ｐ22）これができると、こんな経路を走りなさいということを言ったときに、その経路に従って走行することができるということにもなります。

（ｐ23）さらに、僕自身はこれがすごく好きなのですけれども、環境そのものを常にセンシングしているので、例えば建設機械の周りに間違えて人が入ってきてしまったら、それも見えてしまう。犬が入ってきても見えるのですけれども、そのような安全側に倒す、もしくは安全を確保するという意味でも、このような外側にセンサを設置して、その環境を常にウオッチしてあるというところはかなり重要な技術かなと考えていて、このCAFEプロジェクトで進めております。

（ｐ24）まず己を知ることのまとめとして、GNSSはとても有用で、ちょっと話をしておりませんでしたけれども、最近は非常に安価にもなっています。2周波の――この話をすると時間がかかるからやめかな。とにかく安いGNSSでもRTKができるようになって、しかも精度としては十分確保できるようになりましたというのが最近の話です。ただし、GNSSに頼り過ぎない、冗長のシステムが重要であるということ。

それから、SLAMという技術。これはとても賢そうなのですけれども、やはりこれも信じ過ぎない。冗長システムが重要であると。結局のところ、様々な手法をフュージョンして信頼性を向上させるということが位置推定においては非常に大事だろうと考えているということになります。

（ｐ26）続いて、環境を理解すること。環境を理解することはいろいろな環境の理解の仕方があるのですけれども、ここで最初に紹介するのが形状の取得の例です。これは航空写真測量というやつで、ドローンなどで上空からたくさん写真を撮って、ストラクチャープロモーションで3次元を構築するという技術です。これは、最近は市販のもので、どんどんうまくできるようになってきました。紹介した映像は、雲仙普賢岳の砂防堰堤を航空写真で撮ったものを三次元化したものになります。

（ｐ27）それから、形状を取得するというところでは、非常に安価なRGB-Dというセンサが最近ありまして、このセンサで環境を撮ると、写真だけではなく、奥行き情報も割に精度よく撮れるようになりました。ちなみに、「掘ってみた土砂は、どのぐらい撮れるかな」とやってみたのですけれども、結構凹凸がしっかり撮れるというので、このようなところで形状を取得するということも容易にできるようになりました。

形状を取得するということについては、様々な方法があるのですけれども（ｐ28）実は、地盤を知るということが、作業したりインフラ構築をしたりとするところでは重要になります。ところが、地盤計測については、まだいい方法がそんなにあるわけではなく、1つは振動ローラー加速度応答法、αシステムとかCCVなんていうのが、既存の方法です。また、放射性同位元素を使って土の中の水分、含水量を測定するRIという方法もあります。（ｐ29）今、ムーンショットのCAFEプロジェクトの中では、センサポッド、センサを環境中に設置して測定するという方針で、地盤情報取得を実現しようとしています。

1つ最近いい成果が出つつあるのは、加速度計を用いた地盤の調査です。この手法では、非常にきれいに応答が出るということが分かってきました。この技術は、九州大学の

倉爪先生が玉石重機さんと一緒にやられております。この技術、酒井重工業と共同実験もやってピットでの動作検証を行いながら、今まさに新しい方法として、進めさせていただいているところになります。

（ｐ30）もう1つ、含水比だけでも広域で取れるといいかもしれない、ということで、これは奈良先端科学技術大学院大学の向川先生の技術なのですけれども、赤外線カメラを用いて含水比を取得する技術の開発が進められています。赤外線カメラで、対象とする環境をずっと捉え続けると、すごく湿っている場合と乾いている場合で、気温の変化に伴って地面の温度が変化するスピードが変わるだろう、そういうところを使って見ています。（ｐ31）まだ基礎的な実験の段階ではあるのですけれども、参照物体を用いた環境変動推計をするというテクニックを使うことによって、最近，水が結構湿っているのか・乾いているのかというところについて、観測ができる可能性が出てきました。

（ｐ32）それから、もう1つ研究の目標の中にAIロボットという、そのAIという言葉が入っていたのですけれども、このAIの話について幾つか御紹介させていただきます。これは東京大学の全先生が今、やられているセンシングデータ解析ですけれども、地滑りとかそういうものが起こった、こういう画像をAIに見せることによって、その状況をAIにしゃべらせ、「今こういう状況ですよ」ということを言わせる研究を進めております。これは画像キャプショニングと言うのですけれども、有名どころでは、映画のワンシーンを見せて、今その男の子が走っているとか、野球のバットを振ってボールに当てているとか、そのようなことをAIにしゃべらせる。それと同じように、地滑りを見せると、この部分が非常に危ないから、もう一回再崩壊が起こるかもしれないとAIがしゃべってくれるといいなと、それが目標です。そこが最終目標なのですけれども、（ｐ33）今すぐにそこにひとっ飛びで行くのは大変ですので、橋梁点検というところで、橋梁のデータをたくさん使い、絵とせりふをワンセットでたくさん学習させておくと、橋梁の写真を見せたときに、今こういう状況ですというのをしゃべってくれる。これは、結局のところデータ数と画像とのペアがどれだけ取れるかにかかってくるわけですけれども、このようなデータを集めてAIに食わせて学習させております。これにより、写真を見せることで、「この橋梁のこの部分が、こういうことになっている」というのを熟練者ではなく、AIがしゃべってくれる。そんな枠組みを今進めているところです。

（ｐ34）もう1つ、地盤の推定に関わるところなのですけれども、筑波大学の、西尾先生が今行っている研究が、地盤がこの後どのようになっていくか、を予想するものです。

これはターゲットとして、先ほど少しお見せしたコンピュータグラフィックの中に河道閉塞というのがありましたが、河道閉塞の現場の安定性を予想することを目的としております。入力としては、天然ダムの水位ですとか、地面の形状であり、そのような物性の変化を入れると、あるモデルがあって、その後どうなるかを出してくれる。最近、はやりの方法としては、サロゲートモデルと言って、入力と出力のペアを作っておいて、たくさん学習させることによって、今度新しく入ってきた物性変化を入れたら結果が出てくるというものがありますが、これも実は、たくさんの学習をさせなければいけません。そこで、この間に物理方程式を学習器の中にいれ、サロゲートモデルと組み合わせる方法がPhysics-informed neural networksという考え方です。これは、まだなかなか道のりが遠いので、きちんとした結果を紹介できないのですが、将来的に、この地盤がどうなっていくのか、というのを推定することがもしかしたらこの方法でかなりクイックにできるかもしれないというので今注目しているところになります。

（p 36）環境を知ることのまとめですけれども、3次元点群や画像処理というところについては、皆さんも御覧になったことがあるかもしれないテクノロジーがたくさんありました。地盤情報を取得するというのは、インフラ構築では非常に重要なのですけれども、これが難しい。データから診断を行うとか、データから予測を行うというところについては今鋭意進めている研究が非常に寄与するというので、まだ注目しておいていただけるとうれしいかなと思った次第です。

3番目、動作を行うこと、（p 38）動作を行うことというのについてはコントロールですとかプランニングになります。マシンコントロール、これはもう皆さんよく御存じの部分ですけれども、GNSS情報と施工計画を使ってブレードの高さを調節したりすると、とにかく平らな部分、ここまでの施工面が作れるということができますし、法面の整形なんかもマシンコントロールを使うとできると。この2つ、両方とも基本的にはGNSSを使った位置制御、刃先がどのくらいの位置を通るか、もしくはどれだけ刃先が正確に動かせるかというのがポイントになります。

（p 39）これはまた別のi-Constructionの講座でやっていたプロジェクトの1つなのですけれども、埋設管の位置が分かっていて、レーダーを使って埋設管の位置を検知することができると、（p 40）その埋設管を避ける掘削ができます、このような研究も2年ぐらい前にやっていたのですけれども、これも基本的に位置ベースです。位置が分かるとできるという話なのですけれども、実際に土工をやろうという話になったときに結局のところ

何がポイントになるかというと、掘ろうと思った地盤が硬いか柔らかいか、硬いときにはどうやって掘るか？みたいな、そういうところだと考えています。（ｐ41）位置だけでできる話だったら今のところできているけれども、その先ができていないというのが今思っているところです。

そのようなことを解決するため，このプロジェクトでは「開いた設計」というものを提案しています。この開いた設計の逆の設計は「閉じた設計」です。ロボットが動いている工場を想像していただくと分かりますけれども、場面を想定してロボットのハードウェアを設計することができて、ハードウェアもソフトウェアも場面を想定して設計します。現場では場面に応じた最適作業計画を立てて、あとはセンサを使ってちょっと修正なんていうのがありますけれども、そのようなことができる。これが閉じた設計です。

（ｐ42）一方、災害現場では、工場の中で行うのに比べると圧倒的に考えなければいけないことが多くなります。あらゆる場面を想定しなければいけないというところ。それから、様々な状況に応じて動作を変えなければいけない。人間はすごく賢いので、オペさんが乗っている建機では、それを簡単にできるのですけれども、自律ロボットでは、そう簡単にはできない。

最後に、環境をセンシングしてロバストで作業実施ということはセンサの能力の問題ももう1つあります。ということで、閉じた設計では破綻してしまうということで、開いた設計が重要だと考えます。（ｐ43）ここから先は、ちょっと細かい話になるので今日はお話はスキップさせていただきますけれども、要は、（ｐ44）「もともと、こういうものです」という事前設定でもってできる解決策ではなくて、「どうなるか分からないから、ある程度冗長に作っておいて、いろいろな環境に応じてその場その場で考える」といった設計方法です。最適解を求めるのではなくて、リーズナブルな解をできるだけ求める、そういう設計方法をやりましょうということを大阪大学の大須賀先生が提案されています。ここでは，ヘテロとか計量とか柔らかさとか冗長とか複数台協調、こういう辺りがキーワードになると考えております。

（ｐ45）そういうことを考えながら、今はまだ原理検証モデルとか、実機も実際に役に立ちそうなものでは、まだないのですけれども、そのようなものを考えています。これは河道閉塞のときに環境と戦わずに排水ホースを整備するためのそのようなロボット、「こういうのはいかがでしょう」というのを大須賀先生が提案しています。（ｐ46）実際にコンセプトを作って原理検証をして試作機を作るのですけれども、これでうまくいけ

ばポンポンと最後まで行けばいいのですけれども、ここで問題が発生するので、原理検証に戻ったりしながら、研究開発を進めています。

（ｐ47）もう1つは、東工大の鈴森先生なのですけれども、ハード・ソフトの両立。もともと、ソフトアクチュエータの先生なのですけれども、力も出せるぞということで、災害環境なんかで役に立つものを作ることを目指しています。この動画では、タイヤを持ち上げています。

（ｐ48）あともう1つも、鈴森先生のところなのですけれども、ワイヤーを使って物を移動させる技術です。本当に地盤が緩くて動けない場合には、端っこのところにワイヤーのリールをくっつけて動かしてやるということができるだろうと考え、こんな技術の開発も進めています。

（ｐ49）あと、すみません、ここはゆっくり話をするとすごく楽しいところなのですが、高橋先生がやられている、作業をしながら、その作業をしている油圧の力を見て実際にその地盤がどのようになっているかというものを検知する、そのような研究も進めております。最近は、実際に掘削したときの油圧の圧力だけではなく、掘ったときにどんな感じの掘り方になっているかというところを分類することによって，かなり精度よく地面の性質が獲得できるところまで来ました。

（ｐ50）もう一つ、面白いところとしては、やはり大須賀先生なのですけれども、柔らかく動いてくれるクローラを作って、前に段差があったら、自分のクローラをヒュッと持ち上げるというタイプのクローラ、これは柔軟クローラと呼んでいますけれども、そういうものを作っています。

（ｐ51）ちょっと土研の話はまた別の機会ということで飛ばさせていただきます。

（ｐ52）もう1つ、時間があと短くなってきたのでさっと行きますけれども、複数台のロボットの共同作業が重要であろうということで、東大の淺間先生が今やられているのが、複数台ロボットの協調動作です。ここでは、複数台ロボットが、その状況を考えながらチーム編成を行い、そのチームを動的に変えていくというアルゴリズムを研究しています。これは単に点の状態で動いている建機なのですけれども、（ｐ53）今、シミュレーターでもって地面の状況ですとか、仕事の進み具合によってチーム編成を変えていき、最終的に納期に間に合わせるといった動作計画を進めております。

（ｐ54）この動画は、うちの研究室にあるミニチュア建設機械による掘削運搬ですが、これは普通のラジコンを自律で動くようにしたものなのです。こういうもので，まず

動作をチェックして、ここでうまくいくことが確認できたら、あとは現場に持っていくということを考えています.

（ｐ55）最後に、これは九州大学の実験場ですけれども、九州大学で今フィールドを1個借りておりまして、ここでは今年の10月にやったクローラキャリアダンプ2台とホイールローダ1台の協働動作を実現しております。

（ｐ56）動作を行うことのまとめとして、正確な動作を行うことは比較的今できているのですけれども、臨機応変に対応するというところが将来必要であろうというところ、それから、地盤を考慮した動作が重要、さらに、複数台ロボットによる共同作業というのは重要なコア技術になるだろうと考えております。

最後、「おわりに」なのですけれども、（ｐ58）ロボット技術にできていること・期待されることとして、今日、己を知ること、環境を知ること、動作を行うこと、この3つについて中核のところなのでお話をさせていただきました。しかし、実はすごく重要な周辺技術が追加で3つ、無線通信と電動化の話と安全について、がございます。（ｐ59）無線通信については、5Gが出てきたことで何とかなるかなと思ったら、まだまだ何ともならないです。というところが1つ目です。長距離通信をしようと思うと、結局周波数を低くしたくなるので、通信というのは，何でもかんでもスピードとか容量を上げればいいわけではない。というところで、トレードオフが大事です。（ｐ61）次に、電動化の話なのですけれども、今年BAUMAというところに行かせていただいて見てきたら、世の中はかなりエレクトリック、電動建機が出てきていました。ただ、電動建機というのは、建設機械を大きくすれば大きくするほど稼働時間が短くなるので、今のところ、うまく物を考えなければいけないなと思っております。（ｐ62）最後、安全についてですけれども、これは結局安全を確保しながら研究開発を進めなければいけないので、そのためのいろいろな安全に関する技術開発も必要です。これは大成建設と一緒にやらせていただいている研究なのですけれども、ダンプトラックを止める赤い非常停止ボタンですが、実はこれだけでもいろいろ考えなければいけないところがたくさんあります。例えば、下り坂のときに本当にタイヤをすぐに止めていいのかとか、いろいろ考えなければいけないと思っております。（ｐ63）そういうのも含めて今建設機械施工の自動化・自律化協議会というのが国交省の中で走っていますけれども、こういうところでも安全に関するところで進めて議論を進めているというところになります。

以上で、最後駆け足になってしまって大変申し訳なかったのですけれども、私の講演を

終わりにさせていただきたいと思います。どうも御清聴ありがとうございました。（拍手）

○建山　永谷先生、ありがとうございました。1人の研究者とか1人の技術者ができることは限られているのですけれども、そうした人たち、いろいろな技術とかノウハウを持った人たちが集まると、やはり一段高い、あるいは数段高い技術になっているのだなというのが非常に分かったと思います。

いかがでしょうか。せっかくの機会ですので、もし何か御質問・御意見・コメントでも何でもいいのですけれども、何か御発言がありましたら。

○金森　国土交通省の金森と申しますけれども、大変貴重なお話をありがとうございました。非常にたくさんの技術を御紹介いただきましてわくわくしながら聞いておりました。今後その協働AIロボットシステムというものを作ってくためにはいろいろな技術を合わせていって、全体的なシナリオというか、システムを作っていかなければいけないのかなと思ったのですが、それについては御検討状況とかアイデアがあれば教えていただければ幸いです。

○永谷　幾つか切り口がありまして、1つは、幾つものロボットもしくは建設ロボットを動かすときに、どうやって動かせばいいかという一番根っこの問題があります．それについては2つの考え方があって、中央にすごく賢いコントロール、神の視点があって、おまえ、あれ動け、それ動けというやり方があります．実はそれだと、何か変なことが起こったときにうまく対応できない可能性がある。なので、それとは別に、それぞれの個体というのですか、建設ロボット自身がいろいろなことを考えながら、周りを見ながらうまくやる方法もあります。

建設現場では、人間は賢いため，誰かが上から見て、もっと右とかもっと左とか言わないわけですが，自動化を考えると，中央にすごく賢いコントロールを置く方が，実装は楽です。一方，研究側としては実は個体でやるほうが，自由度が大きくて面白いと考えています。結局，バランスを取りながら、ちょうどいい落としどころで全部動かすという話がちょうどいいかなと思っています.

では、この先、それができたらうまくいくかといったら、センシングの問題がまた別個に出てきて、センシングの問題がうまく解決したら別の位置推定の問題が出てきてみたいな感じで、いろいろな問題が出てきては潰していくという格好がつづきます．それを1個ずつ全部潰して，最終的に動くものを作るというものがシステムインテグレーションであ

り，それがきちんとできるかどうか，が鍵になるかなと。

先ほど建山先生が、いろいろなチームが集まると、と言ったのですが、結局そこら辺のうまいチームワークで技術を解決していくしかないかなと思っています。

すみません、ちゃんとした答えになっているかどうか分からないのですけれども。

○金森　いえ、よく分かりました。ありがとうございます。

○建山　ほか、よろしいですか。

今日は災害現場と月面のお話をしていただきました。なぜ災害現場と月面かというと、条件、環境が過酷で一番難しいのです。災害現場なんかどうなっているか分からないわけです。地盤なんかもどうなっているか分からない。月面なんか電波も通らないし、重力は6分の1だし、空気はなくて制御もできない。非常に条件が難しいわけです。そういう難しいところで実際に作業することができるロボットができたら、将来普通の現場だったらもう自由にできるような、そんなところになっていくのだろうなと思うので、そういう意味でこの2つの過酷な現場、あるいは環境を選ばれたのかなと思って今日お聞きしていました。

ぜひ近い将来ここで得られたいろいろな知見が一般の建設ロボットへも還元されていくことを非常に大きく期待して、永谷先生に改めて拍手で謝意を表したいと思います。どうもありがとうございました。（拍手）

○永谷　どうもありがとうございました。

○建山　それでは、特別講演をこれで終わらせていただきます。