

フィールドロボット技術と、その災害対応やインフラ点検への適用



芝浦工業大学 SIT 総合研究所
客員教授

油田 信一

プロフィール

1948年生まれ。
1975年慶應義塾大学大学院工学研究科（電気工学）修了、工学博士。
1978年から2012年 筑波大学にて、情報工学、ロボット工学などの研究と教育に従事。その間、同理事・副学長、産学リエゾン共同研究センター長などを歴任。2012年に筑波大学名誉教授、および、芝浦工業大学特任教授。2018年より現職。

はじめに

ロボット技術の中には、現場や自然環境の中で動くフィールドロボットと呼ばれる分野があります。私はこの分野の技術を「きちんと発展させるべきである」、あるいは「ロボットが生きるのはそういう分野である」と考えております。本日は、そのフィールドロボットについて説明した後、私が関わってきた災害対応やインフラ維持管理等におけるロボット技術開発の紹介をさせていただきます。



1 建設分野におけるロボット技術への期待

1.1 作業を遂行するロボットへの期待の背景

ロボットには、検査をしたり、重たいものを運んだりという「作業を遂行する機械」という概念があり、それに対する期待が多くあります。

建設分野の場合、ロボットへの期待の背景には、第1に、「人が足りない」「今後熟年エンジニア、労働者がいなくなる」という社会的状況があります。

また、高度成長期に作られた道路、橋、トンネル、さらに国土交通省が作ったものだけではなく、石油プラントや電力系・通信系の設備なども含めた物理的な社会インフラの老朽化が進んでいるという背景があります。今は人が管理している、老朽化しつつある構造物を、コストを抑えて効率的に維持していくためにロボット技術に対する期待が大きいと感じています。

さらに、日本は自然災害の多い国です。災害に対して、昔は我慢せざるを得ない場面が多かったと考えられますが、これからは被害の軽減あるいは事前対処のためにロボット技術が役立つだろうという期待を感じています。現在対処が求められている新型コロナウイルスの問題も、例えば、病院で多くの医療従事者が大変な仕事をしてくださっている中には、人でなくとも出来る仕事が多量に存在するはず。ロボットはコンピューターウイルスには罹患する恐れがありますが、幸いにしてリアルウイルスには罹らない構造です。こういう場面で、ロボット技術を活用したい。つまり、ロボットが人の行けない場所に行き、人にやらせたくない仕事をする。そ

作業を遂行するロボットへの期待



図 1-1 作業を遂行するロボット

ういう働きが期待されると考えます。

1.2 ロボット・ロボット技術に期待される働き

繰り返しになりますが、建設関係の作業に限定した場合、ロボットやロボット技術に期待されているのは、第一に、人を苦しい作業や危険な作業から解放することです。それは同時に、人が働くための環境整備コストが削減されることでもあります。例えば、放射線がある場所で人が働かないといけない場合、被ばくを避けるためには、まず除染をしなければなりません。放射線のある場所での作業をロボットが行うことが出来れば、除染費用つまりコストの削減にもなります。宇宙空間まで含めて、こういった人が行けない場所で、ロボットが人に代わって上手く働くことが期待されています。これらはロボットへの期待の片側です。

もう一方で、ロボットはあくまでも機械です。したがって、人の代替ではなく機械ならではの仕事、例えば、すごく大きな出力を出すこと、あるいは、人に出来ない精密な仕事、素晴らしい記憶力、情報蓄積力による仕事ができます。こういった点を生かして上手く働いてくれることも期待されています。つまり、ロボットに期待される働きは、人ができるとできないことの双方なのです。

2 改めてロボット技術を考える

2.1 ロボットとは何か

今から35年程前、日本でロボット学会がスタートした頃に「ロボットとは何か」という大変楽しいディベートがありました。5年程ディベートをした結果、「結論は出ない」ということになりました。つまり「ロボットに厳密な定義を与えようとするのは不毛だ」が結論でした。

ロボットは「人間や動物を参考にして作られた機械である」と言えます。また、一般社団法人ロボット工業会によれば「センサとアクチュエータ（駆動装置）、情報処理能力を有する機械である」と定義されています。あるいは、「人間程度のサイズの中に多くの機能がインテグレート（集約）された機械」をロボットの定義とする人もいます。また「ロボットというからには、何でも出来て欲しい」ということから、「汎用的な機械がロボットである」という概念があり、一方では「きちんと仕事してくれる機械がロボットである」という概念もあります。さらに「知能を持っている機械がロボットである」という説明がされることもあります。

別の視点で、「ロボット研究者やロボットメーカーが作った機械がロボットである」という見方もあります。例えば、ルンバ（アイロボット社）という掃除機がありますが、あれは自動的に動くとはいえ、掃除しかできません。ロボットというからには、もう少し色々な働きをして欲しい。では、なぜ世の中の人々がルンバをロボットと認めたのか。それはマサチ

ューセツ工科大学の著名な教授であるロドニー・ブルックスという知能ロボットの大御所が、自分の想いに基づいて作った機械だからです。「ロボット屋であるブルックス先生が作ったものであるから、ロボットで間違いない」と人々が同意したのです。ブルックス氏によるロボットだからビジネスが成立した、という性質もありました。その他にも、社団法人日本電子機械工業会に属している会社が作る製品が統計上電子機械として扱われる、といった例もありますので、「ロボットコミュニティから生まれて来た機械がロボットである」というのは、線引きとして間違っていないと思います。

一方、ロボット技術（RT, Robot Technology）とは、ロボットを構成するための技術ですが、ロボット技術の方が一回り具体的にイメージしやすい。そこで、「ロボット技術を用いた機械」という説明が「ロボットとは何か」に対するもう1つの答えともなっています。

2.2 どういう機械ならロボットと言えるか

産業用ロボットは、明らかに世の中の誰もが認めているロボットです。一方で、全自動洗濯機を私はロボットだと思いますが、そうではないと思われる方が多い。昔は川へ洗濯に行きました。暖かいシーズンなら悪くないですが、冬の寒い季節だと川が凍っているので棒で叩いて割って洗濯をしました。すると手にアカギレが出来てひどい目に遭う。そんな時代の人にとって「家の中にある箱の蓋を開けて、洗濯物をその中に放り込んで、ボタンを押して30分待てばピッと鳴って『洗濯が終わったよ』と教えてくれる」というのは、明らかにロボットのイメージです。しかし、それが実現された今は誰もロボットだとは思っていない。「動かず、手も付いていないのでロボットというには無理がある」と言われます。



図 2-1 どういう機械ならロボットと言えるか

ではパワーシャベル、バックホーはどうでしょうか。人が運転するとはいえ、自らが動き回り、手先で重たいものを持ち上げる仕事をやる機械です。人がシャベルで掘る代わりに

効率よく仕事をしてくれるという点では素晴らしい操縦型のロボットです。しかし、現在、これもロボットとは言われません。

全自動洗濯機やパワーショベルが、なぜロボットと言われないのか。それは、すでにきちんと働いているからです。50年前なら明らかに夢の機械だったから、ロボットのイメージにピッタリですが、現在ではもはや夢の機械ではない。今なら二足歩行機械や空飛ぶ機械が夢のロボットの代表格ですが、空を飛ぶ機械といっても、最近のドローンはもはや実用的になり、もうロボットとは呼ばないような状況になっています。

以上のように、夢の機械や開発中の機械がロボットのイメージに重なります。つまり「実現されるとロボットではなくなる」ということです。これは、ロボット産業を国の基幹産業にしたいと思っている行政から見ると大問題かもしれません。しかし、本来求められるのは、夢の機械ではなく、本当に信頼して使える機械なのです。以前、筑波大学の私の研究室では、「今、世の中の人々がロボットと言ってイメージしている機械を、ロボットと呼ばないで使える機械にすること。つまり、ロボットでなくするのが自分たちの仕事です」と言っていたことがありました。とはいえ、ロボットが何であれ「ロボットのための技術」というものはキーとして存在しており、そちら側が重要なのだと思っています。

2.3 ロボットの動き・働き

ロボットは、一方で人の代わりに働くという役割が期待され、もう一方では、機械として人間が出来ないことを行うことも期待されています。人が出来ることも、出来ないことも、全て行うのがロボットです。その中でいったい何をやっているのかという技術的な話をいたします。

ロボットの動き・働き

物体の操作・
マニピュレーション
<マニピュレータ、アーム>
➡ 対象物認識、器用な動作



自分自身の移動
<移動ロボット>
➡ 環境認識、経路計画



図 2-2 ロボットの動き・働き

ロボットの動きや働きには大きく分けて2つあります。

1つはマニピュレータと呼ばれるロボットで、手の動きをします。手先が空間を動いてモノを掴み、動かす。産業用ロ

ボットと呼ばれるものの多くがこの働きをしています。

もう1つが、自分自身が動くというもの。例えば自動運転の自動車もロボットです。そのロボットの働きとしては、自分自身が動くことで目的の場所まで行くこと。そして、遠くまでモノを運びます。

建設分野であれば、例えばパワーショベルは、自分で動くことが出来て、対象物に働きかける仕事も出来ることが求められる。つまり、これらの両方が上手く組み合わさっているのが期待されているロボットです。しかし、学術的・技術的にはマニピュレータと移動ロボットには異なる技術体系が存在しているという状況にあります。

2.4 ロボットの動作制御

ロボットは動く機械です。これをどう動かすか。これも大きく2つに分けられます。

1つは、人が操縦するものです。例えばテレオペレーションと呼ばれる遠隔操作で機械を動かすロボットがあります。搭乗型のロボットというものも存在しています。人が乗っているかどうかに関わらず、とにかく人が操縦する。この場合、いかに操縦しやすいか、いかにきちんと操縦が出来るかが技術的なキーとなります。もう1つはロボットがロボット自体で自動的に動くものです。この技術は、自動化、自動制御、あるいは、自律制御と呼ばれます。

この2つは技術的には異なるもので、「自動化」と「人が操作する」には別の技術的な課題があります。ただし、本当に有用に使えるものを作ろうと思うと「どこまで自動化して、どこを人がやるのか」あるいは「何が自動化出来て、何を人がやらねばならないか」というように、これらを上手く組み合わせることが必須です。

2.5 ロボットの作業環境

歴史的には約40年前に、産業ロボットとして工場の中で働く機械がある意味でブレイクして、様々なところで使われるようになりました。その時に「ロボットというのは役に立

ロボットの作業環境

工場から
自然環境・
日常生活
空間へ

- ・ 工場・生産ライン
- ・ 物流ライン
- ・ 建設作業現場
- ・ 農業・林業
- ・ 市街地
- ・ 公共の建物
- ・ 家庭

- ・ 産業用ロボット
工場内
- 工業生産活動をサポート
- ・ フィールドロボット
建設、農業、災害時
- 人の仕事をサポート
- ・ サービスロボット
家庭内、一般の生活環境
- 通常の生活をサポート

フィールドロボットの例



農業ロボット



調査・探査ロボット



建設系現場のロボット

図 2-3 ロボットの作業環境

つ」と世の中の人々が思うようになり、建設や農業といった他の場面や、家庭などでも使えるものにしていこうと考えられるようになりました。その時点で産業用ロボット工業会と名付けられていた組織は、「やれることを広げたい」ということで今は、日本ロボット工業会と名前を変えています。

(1) 産業用ロボット：大成功した工場内で働くロボット

ロボットを必要なところで働かせるという点では、産業用ロボットの導入は大成功した例です。産業用ロボットの導入により、工場の中から多くの人を減らし、生産性を上げ、かつ、品質の向上も図れて、製造ラインを改革することに成功しました。しかも、産業用ロボットは、ある程度の汎用性があり、様々なものづくりに対応出来る、あるいは作るものが変わった時に簡単なプログラムで対処出来るというもので、見事にロボットの概念の実現でした。

産業用ロボットは、開発され、導入されたあとから見ると、たしかにロボット技術の集大成です。しかし、産業用ロボットを開発した人達には「ロボットを作ろう」という意識はほとんどなかったと想像します。製造ラインの改革を狙い、多自由度のメカニズムの工夫に基づいてマニピュレータを作ったのです。マニピュレータは、片持ち梁を直列に繋いだ構造になっています。ところが、例えば橋などの構造物においても、エンジニアは普通、片持ち梁の設計をしません。つまり、片持ち梁を直列に繋ぐという発想は、基本的には採用してはいけなかった筈です。しかし、この片持ち梁を直列に繋いだが故に、自由度が高く良い動きをする産業用ロボットが出来ました。素晴らしいアイデアだったのですが、当初は、そのおぞましい動きも相まって「自由度が多いからロボットのだ」と思われて、それは必ずしも褒め言葉ではなかっただろうという気がします。

とはいえ、その問題解決に向けた開発努力の結果、産業用ロボットは、様々な製造ラインで使われるようになり、次は「製造ラインではないところでも使いたい」ということで、工場内ではないところでの適用が期待されることになりました。

(2) 実環境で働くロボット：フィールドロボティクスの立場

工場ではない場所でロボットを働かせる際に課題となるのは、自然環境のような広い環境条件の中で動かせることです。整備された製造ラインや研究室内といった良い条件の中ではなく、現場で仕事をさせる。つまり、環境を整備することなく、あるがままの自然環境の中できちんと働く機械を実現することが課題です。

フィールドロボットにおける技術のキーは、作業そのものの困難さより、対応すべき環境条件が広く、様々な条件の中で働かなければならないという点にあります。しかし、「こんな場所でも働くことが出来ました」というのは定量化が難しい。「こんな重い物が持てました」「こんな精密な動きをしました」「これだけ早く動きました」という動きの方が評価される指標になりがちです。これが結果として、建設現場などで働くロボットが思うように実用化されていない1つの理由であると感じています。

90年代のある時期、ビル建設の自動化がちょっとしたブームとなったことがありました。これは、ビル等も工場の中でモノを作るのと同じ作り方で作ろうというものでした。まず環境をきちんと整備し、部品は工場で作って、すべてモデルに従って、計画通りに組み立てて、作り上げていく。それにより効率化を狙ったわけです。

これに対して、ロボットという概念は、むしろ反対の立場にあります。ロボットに、「様々な環境に対処できる」すなわち、複雑だったり、未知だったり、予定外の環境や予定外の状況に対処できる能力をもたせ、大きな環境整備のためのコストをかけないで自動化したい。というのが、ロボット化への期待です。また、完全自動建設の場では、そこに人がいると危険ですし、人は機械から見て思った通りの行動をしないため、自動化の大きな妨げになります。そこを、「人と機械の作業を共存させていきたい」というのがロボットに期待されている話です。それを実現していくことが、建設等の現場を自動化し、効率化していくためには必要なのです。

産業用ロボット:大成功したロボット技術

- 工場の中で働くロボット
- **ロボットマニピュレータの形状による分類**
 - **垂直多関節ロボット**：多関節ロボットと単純に言った場合はこれを指す事が多い。
 - **水平多関節ロボット**：スカラ型ロボットとも言う。
 - **直交ロボット**
 - **パラレルリンクロボット**

用途による分類

- 溶接ロボット
- 組立ロボット
- 塗装ロボット
- 研磨ロボット
- 検査ロボット
- 洗浄ロボット
- 搬送ロボット

図 2-4 大成功した産業用ロボット

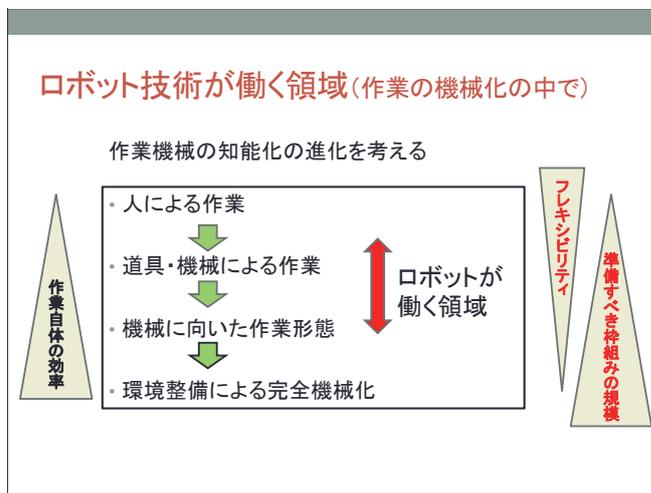


図 2-5 ロボット技術が働く領域

人による作業から、道具・機械による作業、機械に向けた作業形態を経て、環境整備による完全機械化へという流れがあるとすれば、その途中段階がロボットの働く領域です。完全機械化へと向かうにつれて、うまく働けば、作業効率は上がります。しかし、準備すべき枠組みも多くなる。人による作業の方が、より大きなフレキシビリティ（柔軟性）があり、それを活かした作業も求められるのです。

繰り返しになりますが、実世界で働く作業ロボットに期待されているのは、様々な条件で働くということであり、構造化されていない環境で有用に働くことです。そういう意味では、改めて、作業環境への対応が技術的なキーであり、適用分野としては災害対応や建設、農業、宇宙などから始まると考えております。

3 フィールドロボットのための要素・基盤技術

ロボットは、キーとなる根幹の技術があり、そこを膨らませることにより派生的に役に立つロボットが生まれてくる、というものではありません。様々なロボットに適用可能な要素技術が続々と世の中に生まれて来る中で、それを上手に取り込んで、きちんと動く1つのシステムに作り上げていく事が重要です。その要素技術には、様々なものがありますが、最近10年の間でも随分と変化し、進化して来ました。それを活かすことにより、フィールドロボットの分野でも、確実に仕事出来るロボットが増えてきています。

ここでは、それらの要素技術を紹介します。

フィールドで作業するロボットの技術要素(基盤技術)
近年(この10年)、使える要素技術が大幅に進んできた。

<ul style="list-style-type: none"> ◆ アクセス技術 <ul style="list-style-type: none"> - ドローン、地上移動体など ◆ 三次元形状計測 <ul style="list-style-type: none"> - レーザ測距 センシングデータの再構成 ◆ 移動体の自己位置認識 <ul style="list-style-type: none"> - GPS、IMU ◆ 制御・運転の自動化 <ul style="list-style-type: none"> - システムとして労働力を削減 ◆ 作業: 人のスキルの機械への移転 ◆ ヒューマンインタフェース <ul style="list-style-type: none"> - 人・機械(操作)インタフェース技術 - 人への状況情報提示技術 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 通信技術 <ul style="list-style-type: none"> - 無線/有線 ◆ 多機能システムの構築 <ul style="list-style-type: none"> - モジュール化 システム設計論 ◆ 画像処理・認識 <ul style="list-style-type: none"> - 信号・画像処理と認識技術による判断支援 ◆ 大量データの取扱い <ul style="list-style-type: none"> - 学習に基づく認識・制御、Deep Learning ◆ 情報の記録維持 <ul style="list-style-type: none"> - データ表現の標準化と長期に渡るデータの管理 ◆ 実世界指向システム構築技術 <ul style="list-style-type: none"> - フィールドロボティクスアプローチ
--	--

図 3-1 フィールドロボットの技術要素

(1) 目的の場所にアクセスする技術

要素技術の1つとして、目的地に行くための移動ロボットの機能が挙げられます。地上を動かそうとする場合、その路面は不整地だったり階段だったりします。そのような場所をそれなりに自由に動く技術が必要です。そのために、いろいろ

な移動方法の技術開発がなされ、様々な経験が積み重ねられてきています。また、地上の路面上ではなく、壁面や天井面などを動く、船として水上を動く、水に潜って動くことなど、様々なことが求められ、開発されています。さらにドローンなどの、空中を通ったアクセスも実用可能になってきています。

(2) 三次元形状計測の技術

目的地までアクセスするためには、自分が動かそうとする環境や路面がどうなっているかを知る必要があります。それを支えるのが、三次元形状計測の技術です。レーザーを利用し、光が往復する時間を測ったり、反射光の強度から物体までの距離を推測する技術が中心ですが、電磁波のレーダや超音波、赤外光なども利用されています。また、画像を使い、三角測量の原理を用いる技術もあります。

三次元形状計測の技術を情報処理に繋いで、移動しながら計測を行い、広範囲の三次元形状計測をすることも普通になり、ここ10～20年でかなり使えるものになってきました。画像を用いる例としては、視点を変えて画像を多く撮ることで対象物の立体構造も捉えつつ、かつ、カメラがどう動いたのかを知る SfM (Structure from Motion、ストラクチャーフロムモーション) という技術などが普及して来ています。

中距離の三次元形状計測 — センサ技術

- 走査型レーザ測距器
- 電磁波レーダ
- 超音波(とくに水中)
- 画像技術(三角測量) パッシブ・アクティブ
- 移動しながら計測し、繋ぎ合わせるによる三次元モデル生成
 - 計測位置の測定・認識が重要
- SfM (Structure from Motion)
 - 画像のつなぎ合わせによる立体構造の再構成
- SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)
 - 地図を生成しながらその上で自己位置を認識

図 3-2 中距離の三次元傾城計測

(3) 移動体の自己位置推定技術

移動するロボットにとって、自分の周りの三次元の形状と並んで重要なのが、「自分自身がどこにいるのか」の情報です。原理的には、その技術について、ここ10数年間でとくに新しいものはあまりありません。ところが、とにかく精度が良くなり、安くなり、軽くなりました。衛星を使って自分の位置を知る、GNSS (Global Navigation Satellite System)、いわゆるGPS (Global Positioning System)の技術は、広くカーナビなどにも利用され普及しています。GNSS測位は、当初、1mから10数m程度の精度だったのですが、近年RTK (Real Time

Kinematic) 測位と呼ばれる技術により、数cmの精度が出るようになりました。その価格も当初は1000万円した装置が、今では5万円です。また、宇宙を飛んでいる各国の衛星数が増えていることも、精度の向上に寄与しています。

その他にも、IMU (慣性計測装置) があります。これは加速度や角速度を測るセンサを用い、そのデータを積分することで自分の位置や向きを知るといったものです。センサデバイスは、半導体の中に、メカニカルに振動する部分を半導体のプロセス技術で作成したもので、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) と呼ばれ、市販されている半導体チップ自体が立派なセンサになっています。これもどんどん性能が上がり、誤差が少なくなり、ドリフトがなくなってきました。IMUの価格も、以前は100万円程で買った大きな慣性センサと同程度の精度を持つもので、今は数百円で手に入ります。

レーザー測距で基準位置までの距離を正確に測って、自分の位置を知るトータルステーションも、だんだん手軽になってきました。さらに、基準位置をセットせずとも、三次元の環境モデルと三次元のセンサデータをマッチングさせて自分がどこにいるのかを知る技術もあります。このような処理が、大学の卒業研究でも出来るようになり、また、この技術を使っている製品が多数出てきているという状況が起っています。

(移動体の)自己位置認識 — センサ技術

- ・GNSS(衛星測位)
 - ・RTK測位の進歩 廉価な受信機(ハードウェア)とOSSによる低価格化
 - ・衛星数の増加(GPS(米)、GLONASS(ロシア)、BeiDou(中国)など)
- ・IMU(慣性計測装置)など: 加速度・速度と角速度を測定
 - ・移動量を知る(これを積分して、方位や位置を知る)
 - ・MEMS技術の適用により低価格化・普及
 - ・画像技術による移動量計測
- ・トータルステーション
 - ・方位測定とレーザー測距
- ・地図(環境モデル)とスキャンデータのマッチング

図 3-3 自己位置認識

(4) 画像とその処理の技術

近年、ますます大きな要素技術となっているのが画像系の技術です。カメラ自体も画素数が増え、カメラが識別できる明るさの範囲も大きくなっています。しかし、それ以上に、処理等のソフトウェア技術の進歩が著しい。結果として、カメラ画像から自動的に奥行きを計算することができ、あるいは、他の奥行きセンサと結び付けたカメラモジュールも手に入るよ

うになっています。また、例えば、人を認識する機能がカメラに内蔵されているものすらあります。

(5) 環境モデルの構築と三次元情報処理技術

三次元の環境モデルを作り、それをハンドリングする技術も大きく進歩しています。ロボットの側からみれば、事前に準備されるか、センサ情報から作られた三次元モデルが、容易にロボットの動作の計画や制御に使えるようになってきています。

(6) 作業・運転の自動化と自動制御技術

機械を制御する技術としては、いわゆる自動制御、あるいは、制御工学と呼ばれる技術分野があります。この分野は、すでに50年以上の歴史があり、動的システムの理論やフィードバック制御系などを数学的に解析・設計する技術分野です。その基本的な体系は、今も同じフレームワークに基づいています。とはいえ、コンピュータの進歩に基づいて、昔は計算出来なかったことが計算出来るようになり、多くの現実のシステムが扱えるようになりました。現実の複雑な物理的システムについて、より精密なモデルを作り、より精密な計算をして、より精密な制御が出来るようになるという目に見える進歩が起っています。

また、以前はモデル化が難しかった、人による制御操作も、データの蓄積や解析が可能となり、人が持っている制御のスキルを実際の機械に適用した制御系を組むことも可能となってきています。

作業・運転の自動化・自動制御技術

- ・システムのダイナミクス(力学構造)に基づく**自動制御技術**
 - ・システムの数学的モデル
 - ・精密でないシステムモデルへの対応/モデルの自動構築
 - ・フィードバック系による自動制御
- ・人の作業スキルを機械の上に**実現**
 - ・対象物との力学的関わり合い
 - ・力とコンプライアンスの制御
 - ・学習による習熟
 - ・機械操作(建機運転など)のスキルを機械に載せる

図 3-4 作業・運転の自動化・自動制御技術

(7) ヒューマンインタフェース技術、ヒューマンファクタの取り扱い

自動化が進んだとしても、機械をきちんと動かそうとすると、どうしても人が操作する部分は残ります。一方、機械やロボットが進歩して、複雑な動きや複雑な環境の中で様々なことが出来るようになると、その操作はますます難しくなります。それに対処して、ヒューマンインタフェースやオペレ

ーインターフェースとして様々な開発がなされ、それが運転支援や遠隔操作に使われています。

また、機械を操作する際に発生しうる誤操作などに関して、ヒューマンファクタ（人的要因）をどう扱うか、あるいは、人と機械との役割分担をどうするのが良いか、についても多くの研究開発がなされており、人を含むシステムを構成する際のガイドラインも検討されています。

（8）遠隔操作・監視のための無線（+有線）通信技術

通信技術に関しては、ひと昔前、光ファイバーで大量のデータを送ることが出来るようになるという、大きな進歩がありました。その結果、画像、とくに動画をほぼリアルタイムで伝送することができるようになりました。そして、最近の大きな変化は、wifi や、携帯電話、5G 技術などの無線通信の進歩と普及です。また、かつては「いかに長距離の通信を可能にするか」が通信技術の中心でしたが、今は短距離の無線通信も大きく重要な働きをしているという状況にあります。ある意味で通信のパラダイムが変わり、システム作りやロボット技術についても、パラダイムシフトが起こったと言えることができます。

直接的なところで言えば、市販されている通信系において、画像電送の画質が良くなり、あるいは遅れ時間が少なくなって機械の遠隔操作が行いやすくなったのは、ここ数年の出来事です。

一方、通信のためには電波の帯域がないと通信が出来ず、その帯域が混雑すると通信に制限が発生します。今では随分と改善されましたが、かつてはロボット展示会でも「今デモをやっているのだから電波を切ってください」と言って頭を下げて回ることが普通でした。そのため、災害対応やフィールドロボットの分野でも専用の電波帯域が欲しいという要望があり、フィールドロボット用の無線通信帯域の割り当てが行われました。現在、ドローンの制御用に主に使われていますが、災害時に優先的に他のユーザに邪魔されずに使えるロボット用の通信帯域が存在しています。

（9）大量データの処理・利用と学習技術

これは、近年話題のAI（Artificial Intelligence、人工知能）の話です。

CPU（Central Processing Unit）の処理能力の向上や、メモリの性能や大幅な進歩や容量の増大化、並びに、通信技術の進歩により、大量データを記録・蓄積し、処理することが可能となり、その技術も大きく進みました。蓄積された大量のデータを利用して、それを学習したり統計処理したりして様々な活用する。それが実用の域に達したのがIoTであり、また、それがAIブームを引き起こしました。

これにより、丁寧な数学的なモデルを構築しなくとも、蓄積されたデータに基づいて状況の判断やシステムの制御が可能となり、ロボットを動かせる上でも重要な手法となってい

ます。データをどんどん蓄積することで、ロボットがさらに賢くなり、対応できる場面が広がっています。

4 実世界で働くロボットの開発法

～ユーザの主体的参加～

上に述べたのが、フィールドロボットに使える最近の要素技術ですが、「それを使えばそれだけで良いロボットが出来る」というほど単純ではありません。

これらの技術要素を使ってきちんと働くシステムを作ろうと思ったらどうすればよいか。私がいつも申し上げているのは、ロボットを使う人が「何に使いたいのか」「どこで使いたいのか」をきちんと理解し、説明出来るようになること。そして、できれば主体的にロボットの実現を引っ張っていくことが必要、ということです。

建設ロボットに対して現場のニーズがあることは明らかです。現状に満足し、新しい要求がないかということ、そんなことはありません。要素技術もある程度は存在しています。しかし、役に立つロボットが次々と出て来ているという状態ではないのが現実です。何故、次々と新しいロボットが出てこないのか。それは、ロボットに求められる働きが複雑であるため、ちょっとした思いつきで出来るものではなく、じっくり腰を据えて開発しなければならないのが理由です。

4.1 誰がロボットを企画・開発するか

フィールドで役立つロボットを実現するためには、「何に使うか」「どこで使うか」「どのように使うか」をきちんと抑え、さらに、それを実現するためには、「基盤技術でどういうことなら出来るか」も抑えておかなければいけません。

現場で役立つロボットの実現・実用化に対して、誰がロボットの企画開発をするか。つまり、ロボットを主体的に開発するのは誰か、が重要です。

ユーザ側から見ると「座って待っていれば良いロボットが出てきて、自分の仕事を肩代わりしてくれると嬉しい」という期待があります。しかし、現実はそのいきません。私は、実際に役立つロボットは、シーズ側ではなくニーズ側からアプローチをしていくべきだ、と考えています。歴史的にも、産業用ロボットもシーズ側の人ではなくニーズ側、現場側の人を作ったものでした。片持ち梁を直列で繋ぐということもシーズとしてのアイデアが最初にあったわけではなく、ニーズ側が何とかしようとして頑張ったらそういう形に行きつき、結果としてそれがモノになったということだと考えています。

システム開発には2つのモデルがあります。1つはシステム開発者が企画をして製品化し、それをユーザ側が見つけて自分たちのユースケースに合わせて使うというものです。これは量産品モデルと言えるでしょう。

もう1つはユーザ側が企画するもので、こちらは特注品モ

デルと言えます。ユーザ側に目的があり、「こういったものが欲しい」とシステム開発者に投げると、システム開発者が設計して、作って、納めるモデルです。そして、それを活用しながら必要に応じて、要求仕様を修正して、設計にフィードバックする。こういったループにより、実際に使えるものが実現されながら進化していきます。

フィールドで働くロボットにとってこのモデルが必要なのは、「どのような環境に対処すべきか」という点について、システム開発者は基本的に知らないからです。「どのような環境で動くのか」を十分に分かっている人が、良いシステムを作るためのキー情報を持っている。つまり、ユーザによる企画開発が、少なくとも企画に積極的に携わるといえることがどうしても必要となります。そして、建設分野のロボットについても、ユーザである建設側の主体性の下で、ロボット側の人間との良いコミュニケーションと協力関係があって、はじめて十分に使える機械が出来てくると考えています。

4.2 実世界で働くロボットの実現法—実世界問題のためのキー

従来のロボットの開発とその実用化におけるアプローチの多くは、「良いものを作ったので、それが動くように環境を整備しましょう」というものでした。しかし、建設等の分野では、それではうまくいきません。したがって、「現場で働く機械」を考える際には、改めて、「実世界（リアルワールド）の問題」を強く意識する必要があります。

実世界の問題を解決するためのキーは、繰り返しになりますが、「開発者がいかに環境を理解しているか」「その環境の上でミッションやタスクが何かをきちんと分かっているか」です。その上で、必要な様々な機能を上手く結び付けて全体のシステムをまとめ上げていくことが重要です。

ロボットが動く環境を理解すると言っても、そのために「どのような項目を抑えれば良いか」は、普通は分かりません。ユーザ側から見ても、個々の技術を具体的な問題解決に使うために、どれだけの条件が必要かは容易にはわかりません。それを互いに理解するためには、一歩ずつ進んでいくしかありません。

つまり、プロトタイプを作って現場で動かしてみても「こういう問題がある」「こういうことがあると働かない」「こんな事態が起こる」というようなことを見出しつつ、頻りにフィードバックして改善・改良していくというインクリメンタルな開発がどうしても必要です。インクリメンタルな開発は、改良する度に最初から仕様書を起こし、設計のプロセスを踏み、入札をして…、とループが長いとうまくいきません。いかに開発におけるフィードバックのサイクルを短くするかが重要です。このプロセスを速く回すためにも、出来る限り現場で実問題に適応しながら、少しでも使えるものがあればまずは導入してみて、それが「どう意味があるのか」「どう使えるのか」「どういう問題があるのか」というようなことを

経験していく。そういった態度が必要だと日頃感じています。

4.3 ロボットの働きのシナリオの重要性

ロボットを開発する場合、1つの機能だけで満足出来るものではありません。と言っても、全てを一度に作ることも出来ないため、システムの持つべき機能を、要素技術やユニット毎に作っていかざるを得ません。そこで、的を射た開発のために必要なことは、ロボットが働くべき場面と、そこでの動きと働きを、出来るだけ具体的に時間軸に沿って考え定めることです。そして、それをユーザも含めた開発者が共有することです。私たちは、この時間軸に沿った働きをシナリオと呼んでいます。

例えば土を掘るという仕事の場合、ほとんどが繰り返しです。ところが一度掘れば、次は掘る場所が違う。繰り返しと言いつつ、生産・製造現場での単純作業の繰り返しとは異なっており、ほとんど同じ場面には戻ってきません。したがって、例えば、この仕事を自動化するプログラムから見ると、これは決して単純繰り返し作業ではなく、繰り返し部分の外側にある手順の進行をしっかりと管理することの方が重要です。つまり、(戻っては来ない) 時間の流れに沿って変わっていく「動き」を、大きく意識する必要があるのです。

5 建設分野で働くロボットに期待される役割

建設現場で働くロボットを、どう具体化するか。とにかく「具体的な役割を考えよう」ということで、ロボット技術を活かしたい場面（ロボットのユースケース）の例を図5-1に挙げました。これらは、ロボット技術が生きそうなキーワードですが、これに答えるシーズが、すでに存在しているわけではありません。これらの目的について、問題解決の手段として、ロボット技術を使って行こう、というのが私の意見です。

ロボット技術要素を活かしたいユースケース (ロボット導入の目的)

- 仮設足場の削減：作業コストの削減
 - ロボットによるアクセス技術の適用
- 危険地域から人を排除
 - アクセス技術・自動化技術により、人の安全や快適化のためのコストを開放
- (労働者不足のための)自動化
 - センシングに基づく自動制御：システムとして労働力を削減
- オペレータを支援し、その負荷を軽減
 - 人・機械(操作)インタフェース技術
- 点検・診断における情報処理：人間を超える情報処理機能の利用
 - 信号・画像処理と認識技術による判断支援
- 経年変化等のモニタリングとの融合：デジタル情報とすることの意義
 - データ表現の標準化と長期に渡るデータの管理

具体的なロボットシステムは、技術の応用ではなく、問題解決として企画・検討することが重要

図5-1 ロボット技術要素を活かしたいユースケース

(1) 仮設足場の削減

プラントのメンテナンスのために、私は「仮設足場の不要な検査システム」という視点で、ロボット技術の利用を考えたことがあり、このときは、パイプに跨って走行するシステムが開発されました。構造物の点検でも、仮設足場のコストは大きいので、その削減には意味があります。そのためには、壁面を登ったり、例えば橋げたにぶら下がり、目的地まで行き、あるいは、動きながら点検するという、アクセス技術の利用が期待されます。

(2) 危険エリアからの人の排除

目的は、人を危険な状態にしないことです。そのためには人が危険エリアに行かないで済むようにする。つまり、機械やロボットが、そのエリアで単独で働いてくれることが求められます。そのために、どのようなアクセス技術と、機械の遠隔操作や自動化した制御の技術が必要かを、機械が働くべき環境と作業内容に基づいてユースケースとして考える必要があります。



図 5-2 メンテナンスロボットの例

福島原発の例では、原子炉建屋の中に行ってみないとどうなっているかが解からない階段の昇降を、遠隔にいるオペレーターが操作する必要がありました。アクセス技術としては、階段の昇降ができれば良いのですが、オペレーターにどれだけの情報が提供されれば、どれだけの制御操作が出来るかが問題になりました。このような環境では、アクセス技術と遠隔操作は、まさに一対の問題です。

また、人が行けないところで仕事をする例として、無人化施工があります。これは、アクセスのための遠隔操作ではなく、作業自体を遠隔操作で行うものです。こういった1つずつの課題に対して、アプローチしてロボットを実現していく必要があります。

6 無人化施工に学ぶロボット活用技術の開発

無人化施工は災害対応のために重機を遠隔操作によって動かすもので、1990年代の雲仙普賢岳の噴火に伴う火砕流と土石流に対処する必要に応じて生まれ、育ってきた技術です。ここで働いている機械は、メカニカルには基本的に通常の建機です。しかし、これを遠隔操作により働かせ、いろいろな工事・施工を実現しているという点で、ロボット技術の実用性として、まさしくわが国が世界に誇るべき技術になっていると考えています。

無人化施工は技術的にはロボットの技術そのものです。しかし、これを主体的に開発し実用化に至らしめたのは、ロボット研究者や開発者ではなく、施工を行ったゼネコンの現場の施工担当者と、それに協力した機械屋さんや関係企業のエンジニアたちでした。この章のタイトルが、無人化施工に学ぶ、となっているのは、ロボット屋として、この経験からしっかり学ぶ必要がある、と考えているからです。



写真 6-1 無人化施工の様子

6.1 無人化施工の歴史

無人化施工とは、現場で動く様々な建機を遠隔にある操作室で操作するというもので、雲仙普賢岳で使われ始め、その後、各地の火山噴火への対処や、地震や豪雨による土砂崩落現場の復旧、福島原発での瓦礫除去、最近では熊本の阿曾大橋の復旧現場で働いています。

(1) 雲仙普賢岳の被害と作業

雲仙普賢岳の土石流災害は、大火砕流により多くの方が亡くなった後、火砕流の危険性から現地には入れない状況の中、火山灰等の堆積物が雨による土石流となって下の町を押し流したというものでした。



図 6-1 雲仙普賢岳の被害と作業

土石流を防ぐため、現場の除石をしたくても、まだ火砕流の危険性が高いから人は入ることが出来ないという状況でした。そこで、当時の建設省が技術評価制度を作り、その下で「遠隔施工の試験フィールド」として「とにかくこの仕事をしてください」と工事発注がなされて、技術が生まれました。

こうした中で「どんな通信なら使えるか」「どんな機械をどう操作したらいいか」「オペレーターはどれぐらい訓練が必要か」というように、遠隔施工システムの構築とその運用法について、経験が積み重ねられていきました。未だ危険性の残る普賢岳直下の水無川の現場は、その後も、無人化施工の技術開発と確認実証の場として使われ、遠隔操作で作られた砂防堰堤により下流に人が戻ることが可能になりました。

(2) 雲仙復興以後の無人化施工が働いた自然災害の例

雲仙で開発され経験が積まれた技術は、その後、有珠山等の噴火や、紀州豪雨による深層崩壊、地震による崩落などに適用され、「危険な場所における、人が入らない、安全性を確保した工事」が行われました。東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故の際も、直ちに無人化施工の機械が持ち込まれて、高濃度放射性の瓦礫の除去が行われたことにより、目に見えて対処が進みました。遠隔操作による建機による作業は、現在も、原子力建屋の解体などで続いています。これがなければ、作業員の被ばく量がもう1周り多くなった恐れがあったと想像されます。

また、比較的最近では、熊本の阿蘇大橋の現場で、新しい通信システムや自動化等の新しい技術を使った効率の良い無人化施工が実施されました。

無人化施工は実作業で現実的な優れた技術であり、使いながら進歩してきたということがポイントです。それが実現した大きな理由は、「自然災害であり、今後も必ず土砂崩れはあるだろう、その時に対応出来るような準備をしておかなければいけない」という考えに基づいて、それなりに準備がなされる状態にあった事が考えられます。予め、様々な状況を

想定して対処が考えられ、オペレーターも訓練されていました。つまり、非常時といいながら、それなりの頻度で使われていたという状況が、ロボットの視点でも大変すばらしい役立つフィールドロボットシステムが実現された理由であると考えています。

雲仙復興以後の無人化施工が働いた自然災害（代表例）

- **北海道・有珠山噴火災害（2000）**
洞爺湖温泉街 火山灰等で壊滅的被害
- **小笠原 三宅島噴火災害（2000）**
- **新潟県中越地震（2004）**
- **岩手／宮城地震（荒砥沢：2010）**
- **鹿児島県南大隅深層崩壊（2010）**

- **紀伊半島豪雨（2011-2012）**

図 6-2 無人化施工が働いた自然災害例

6.2 SIPプロジェクト「無人化施工の新展開」(2014-2018)

無人化施工は、優れた技術ですが、それは使われないと維持・向上が難しい。とくに、技術やシステムの維持は、施工を行う施工業者の担当となっており、ビジネス的にそれなりの仕事がないと、技術の継承や必要時にそれを実施する体制の継続すら難しいという状況が起こっています。

そこで、今まで無人化施工を担ってきた建設会社等でチームを組み、次世代無人化施工技術研究組合という組織を作り、SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）の中で、新しい無人化施工技術の開発に関する研究開発プロジェクトを実施しました。ここでは、今までの技術を整理して継続させ、実際に災害に対応する体制を作ることも1つの目的でした。



図 6-3 次世代無人化施工技術研究組合による SIP プロジェクト

(1) 研究開発の目的

研究開発の目的は、最近、出水を伴う災害が多い中で、土砂崩れ等の災害現場が水際だった場合にも対処するため、従来ドライな場所に限定されていた無人化施工を、水際でも出来るようにすることです。とくに、緊急対処工事で重要なのは、土石や資材の運搬を仮設道路がなくても行うことです。そこで、2m程度の深さの半水中でも、遠隔操作で土砂等を運搬することができるクローラードンプ型の運搬ロボットを作り、それを用いて、水際の遠隔無人化施工のモデル工事を実施することを、プロジェクトの目的としました。

具体的には、半水中で数百mに渡ってものを運搬することの可能な遠隔操作型の運搬機と、その遠隔操作システムを開発し、これを用いた、半水中環境における無人化施工の実証システムを構築しました。



図 6-4 SIPプロジェクトの研究開発の目的と内容

(2) 開発された半水中運搬ロボット「カストール」

半水中運搬ロボットで重要なのは、気密性、防水性を実現することです。一方、防水性のために密閉すると地上を走る時の放熱が問題となります。また、半水中を走る時に浮力が発生し走破性（トラクタビリティ）が低下します。これらを考慮したシステムを設計、構築しました。

また、水中走行時はどこが走路かわからないため、正しい走路を逸脱してしまい、はまってしまって脱出不可となる可能性があります。そこで、遠隔操作用インターフェースとして、GNSSのRTK測位法で得たロボットの絶対位置座標と、IMUで計測した進行方向・車体傾斜に基づく操作支援システムを開発しました。また、水中を走行する場合、濁りで底が目視出来ないという状況で遠隔操作する必要があります。そこで、濁度に影響を受けにくい電磁波レーダを利用した、路面の地形と地盤を把握可能な非接触型水中探査技術を開発・搭載しました。さらに、それを支える通信システムについても検討しました。走行支援として整地では走行を自動化する試みも実現しました。

さらに、未経験の人でも操作が簡単となるようジョイスティック型の一本レバーを採用した操作インターフェースを実装しています。

(3) 実河川等での無人化施工実験システムの実証

遠隔操作型重運搬ロボットの基礎実験は、施工技術総合研究所が所有する水深1.5mの河床地試験場を使用して半水中走行性能実験を繰り返し実施しました。

また、実証試験用フィールドは、歴史的にも氾濫の多かった富山県常願寺川の河川敷を利用しました。ここで、長時間の耐水試験、長距離の走行実験とともに、遠隔操作によるバックホーと組み合わせた、水際における土嚢やコンクリートブロックなどの運搬を伴う作業を実験しました。

さらに、熊本県球磨川で、河床に堆積した土砂を水中バックホーが掘削し、積み込んだ土砂を左岸側から右岸側へ半水中走行する、繰り返し実験を実施しました。この実証フィールド実験は、最大水深1.8m程度の河川を約100m横断する運搬実験であり、これにより、実際に、1万㎡に近い土砂の浚渫が行われました。この実験においては、水深1.8mで平均2.5ノット（秒速1.3m）の流速の河川を、人が搭乗した運転では最大時速8kmの走行速度で横断し、ロボットの十分な走破性能が確認されました。

7 NEDO インフラロボットプロジェクト (2014-2018) の紹介

最後にもう1つ、プロジェクトの紹介をさせていただきます。2014年から2018年にNEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）がインフラ維持管理更新等の社会課題対応システム開発プロジェクトを行いました。これは技術シーズ開発ではなく、社会課題に対応するシステムを開発する、ソリューションを提供するというものでした。

私は、NEDOから依頼を受け、このプロジェクトのプロジェクトリーダー（PL）を務めました。

7.1 プロジェクトの概要

このプロジェクトは、以下の3つのテーマについて実施されました。

- ①インフラ状態モニタリング用のセンサの開発：振動や加速度計を使ったセンサのネットワークで、橋梁などの構造物の健全性をチェックするシステム
- ②インフラ維持管理のための画像技術：ディープラーニングにより画像の中からひび割れを見つける技術の開発と実用化、および、カメラを固定して遠く離れた場所から微小な動きを検出し、例えば、鉄橋を鉄道車両が走ったときの振動を定量的に測定する技術
- ③インフラの維持管理のためのロボット技術

以下、③のインフラ用ロボットのテーマについて説明します。

本プロジェクトの前年の2013年に、国交省と経産省は連携して次世代インフラ用ロボットの開発導入に関する検討会を開きました。その結果、経産省が技術シーズを担当し、国交省側が現場で評価するという枠組みで、進めることが決まりました。そして、具体的課題としては、維持管理として橋梁の点検、トンネル点検、河川ダムの水中部の点検、災害対策として、災害調査と応急復旧の5課題が選ばれ、各々について「ロボットがどう使えるか」ということをきちんと評価して、開発・導入を図ることになりました。それに基づき、経産省が担当するシーズ開発の部分として、このNEDOプロジェクトが計画されました。

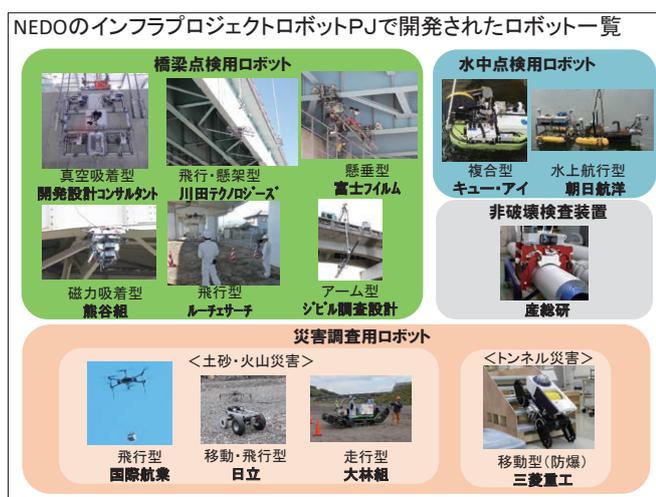


図 7-1 プロジェクトで開発されたロボット

7.2 プロジェクトで開発されたロボット

このプロジェクトでは、公募により開発実施者が選考され、11テーマのロボット開発がなされました。技術開発として重要だったのは、個別の点検対象等に対応するアクセス技術と、その上で計測する技術、ならびに、目的の点検を達成するための総合システムの開発です。

アクセス技術としては不整地を走るため、加重が上手く分散されるよう工夫されたクローラ型の車両や、可燃性ガスが噴出した中で探査することを想定した防爆性を持つクローラ車両、あるいは、ワーム型で形を変えながら進行するメカニズムや、真空吸着で壁面に張り付いて移動するメカニズム、さらに、磁石による吸着で鋼橋の橋げたに張り付いて動く機構などのアクセス技術の開発がなされました。

また、橋げたをレールとして使い、そこを走行しつつ三次元の直交軸上を移動する移動機構と、その先につけたカメラの方位を自由に動かすメカニズムを有し橋梁をくまなく点検する実用的なシステムも開発されました。

水中の点検のためのアクセス技術については、水中を自由に泳ぐという課題とともに、点検のためにいかにダムの堤体と適切な距離を保って操作をするかという課題があり、そのための水中移動機構の工夫がなされました。



図 7-2 開発例 (水中のアクセス技術)

さらに、空中を飛ぶアクセス法として、ドローンに関するも様々な開発が行われました。監視や調査のためのドローンの利用には、遠くの目的地まで飛行する、という課題と、橋梁等の構造物に沿って一定の離隔を保ちながら飛行し写真や画像を取得する、という使い方があります。その各々に適したシステムが開発されました。また、通信路をいかにして確保するか、通信が切れたときにいかに安全に動くためのフレームワークを作るかという研究開発もありました。墜落という課題についても、現場の状況によって持つべき機能が異なります。例えば噴火等を観測する場合、コストが低いドローンが使用できれば、複数台を飛ばして、そのうち1機がデータを持って帰ってくることが出来れば十分情報が得られます。一方、民家や道路の近くの点検等では、それらへの墜落はどうしても避ける必要があり、いかに安全を確保するかが重要です。ロープで係留をして飛ぶ技術の実用化や、強風の中で構造物に安定して近づくための方法について様々な工夫がなされました。

これらのアクセス技術を用いて調査や点検を行います。取得する情報としては、写真や画像が基本ですが、それ以外のデータを取ってくるシステムもあります。調査や点検のために、いかに確実に欲しい情報が得られるかについて、いくつもの工夫がなされました。

7.3 プロジェクトのアプローチ

私は本プロジェクトのマネジメントをする立場として、PLとして、各開発チームに対し以下を求めました。

- ①ユースケース指向のシステム開発を行こと
- ②開発体制の中にユーザ企業も必ず入れること、あるいはユーザ企業が中心になって開発すること
- ③シナリオを定め、ユーザと開発側でシナリオを共有し、それに沿ってどれだけ動くかという議論をすること
- ④現場での実証を繰り返しつつ開発を推進すること

- 現場でシステムを使用するユーザを開発チームに含め、連携して開発を進める
- 実用化開発と実証試験を協力して行う体制を構築。



コンソ名	実証試験に参加・協力のユーザ
川田テクノロジーズ	大日本コンサルタント
ルーチェサーチ	建設技術研究所
富士フィルム	首都高速道路技術センター
ジビル調査設計	ジビル調査設計(自社使用)
開発設計コンサルタント	J-POWERおよびグループ会社
熊谷組	西日本高速エンジニアリング
キュー・アイ	キュー・アイ(自社使用)、ノダック
朝日航洋	朝日航洋(自社使用)
国際航業	国際航業(自社使用)
日立製作所	エンルート、八千代エンジニアリング
三菱重工業	(自社オペレータによる操作)

図 7-3 開発体制

図7-3に開発チームの一覧があります。ここで「自社使用」と書いてあるものは、ユーザが開発企業の協力を得て開発した例です。そうでないところは開発企業が中心だったのですが、それを使うユーザと一緒にになってチームが組まれているところです。現場における実証実験は、前半は国交省の現場

News Release

防爆性能を備えた探査ロボットを開発
—国内認証を取得、災害現場での実用へ—

2016年7月12日

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 理事長 古川一夫

NEDOプロジェクトにおいて、三菱重工業(株)は、千葉工業大学と共同で引火性ガス雰囲気内探査ロボットを開発するとともに、移動ロボットとしては国内で初めて防爆電気機器の検定機関による防爆認証を取得しました。これまで引火性ガスの充満が懸念される災害現場への電気機械の投入の判断は困難でしたが、防爆認証の取得により災害現場での実用化が期待できます。



開発した引火性ガス雰囲気内探査ロボット

NEDOムービー (MHI)

図 7-5 防爆性能を備えた探査ロボット

検証事業に重ねて実施し、後半は実証する現場を独自に見つけて行いました。

7.4 代表的な成果

ここで、このプロジェクトの成果としてNEDOにより



図 7-4 実証実験の様子

ニュースリリースされたものの代表例をいくつか紹介します。

(1) 防爆性能を備えた探査ロボット

防爆機能を持った探査ロボットです。八箇峠トンネル工事現場における可燃性ガスの噴出の事故が問題設定の背景でした。

引火性ガスの中で動くために、自身が発火源にならないように、モーターも含めて電気が通っている箇所は完全に遮断し、外気を一切入れない構造となっています。このシステムは、開発後、洋上の石油リグの検査などにも使われるケースがいくつか出てきていると聞いています。

(2) 橋げたをレールとして用いる橋梁点検用ロボット

橋梁の2本の橋げたをレールとして使い、その間を渡す補助レールと上下に伸縮する機構により直交型の三次元移動機構を作り、その先にカメラを搭載しています。このため、安定して確実に橋梁の各部を観察することができるのが特徴です。補助レールなどは分解でき、15キロ以下のいくつかのユニットを人が背負って持ち運ぶことで、点検孔などを通して持ち込み、現場でセットすることが出来ます。



図 7-6 橋梁点検用ロボット

(3) 橋梁点検用マルチコプタ

ドローン技術を利用した高橋脚や橋げたの点検用システムです。ドローンを使って橋脚等の写真を撮りに行く際に重要なのは、風が吹いても安定して飛行出来ることです。風によって橋脚に衝突して機械が壊れるのであればまだ良いのですが、道路上で交通を障害したり、他の場所に落ちたりする事態は避ける必要があります。そのため、安全策をセットしてこれに沿って飛行するもので、見事にニーズに基づいた開発がなされました。

(4) アーム型橋梁点検用ロボット

橋梁点検のため、橋の上にベースマシーンを置いて、そこ

からカメラ等を搭載した軽量のロングアームを伸ばして橋の下を見に行くロボットシステムです。ベースマシーンから遠隔操作でアームを動かして点検作業を実施します。必要に応じて水を噴射して狭隘部の清掃もできます。これはすでに多くの地方自治体の橋の点検現場で使われています。

(5) 実測データに基づく土石流予測システム

火山噴火の後、ドローンを使って降灰量等を測り、そのデータに基づくシミュレーションによって、土石流を予測するシステムです。背景には、新燃岳の噴火の際、土石流が発生することが予測されて下流の人たちが退避をしたのですが、結果として土石流は起きなかったことがありました。土石流の予測の精度を上げるためには、降灰量と灰の性質を知ることが必要です。ドローンから、色々なサイズの色を塗った正四面体を撒き、次に行った時にそれがどれだけ見えるかで降灰量を推定したり、着陸して火山灰を採取したり、あるいは、水を撒いて浸み込む様子を観測するなどの機能があり、土石流シミュレーションの精度の向上に寄与するシステムが実現されました。

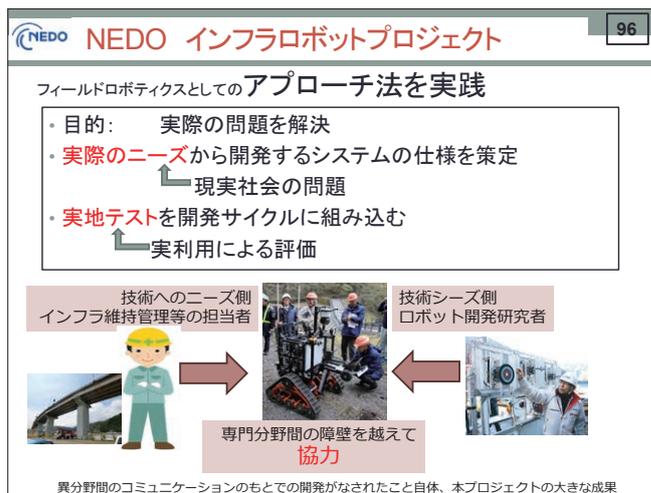


図 7-7 フィールドロボティクスとしてのアプローチ法

このプロジェクトでは、インフラ構造物の点検や災害時の調査に関して、具体的なニーズに基づき解決すべき問題を設定し、それをロボット技術で解決しようとしたものです。開発においては、現場による実証実験を開発サイクルに取り込んで、「どれだけ使えるか」を評価しました。プロジェクトの成果として、具体的に現場で動く、実用に近いシステムが多く開発されたと感じています。

また、この現場実証の様子を多くの方に見て頂くことによって、使えるか否かを判断して頂きました。これは、ポテンシャルユーザを広げることにも役立ったと考えています。

なお、このNEDOのプロジェクトの成果紹介は、NEDOのホームページ http://www.nedo.go.jp/library/pamphlets/RB_201803_project.html (※1)

にあり、また、動画が、YouTubeのNEDO Channel <https://www.youtube.com/playlist?list=PLZH3AKTCrVsXbC-wFJDNMFV7Tlxk1Qlmd> (※2)にあるので、一度ご覧いただければと思います。

8 作業するロボットで考えるべきこと ～まとめに変えて

現場で作業するロボットに求められる機能は複雑であり、一般に量産化は難しく、個別のシステム開発をニーズ主導で進めていく必要があります。ここでは、ユーザの主体性が重要です。

一般的な話ですが、鉄腕アトムなどのロボットアニメの場合、敵から攻められて頑張ったけれどもどうにもならない場面で、「ロボットさん助けて」というと、ロボットが来て敵を蹴散らしてくれる。そして、「良かったね」と言って終わる。これが、ありがちなストーリーです。これは、最後は「ロボット」と唱えさえすれば、自分は考えて努力をしなくとも、ロボットが助けてくれる話になっています。しかし、実際にそのようなロボットはいません。それより、「ロボット」と唱えることによって思考停止が起こる方がよっぽど弊害があります。

解決すべき問題に対処するためには、(『ロボット』と唱えるのではなく)「どう解決すればいいか」を自ら考えることです。具体的な方法については、ロボット技術者と協力するのが良いでしょう。その一歩が踏み出し、「使いながら改良していく」サイクルを回すこと。それが重要なキーです。思いつきや流行は多くの場合で上手くいかない上に、継続して進めるべきプロセスの芽を摘みます。「現場を見ながら、1つずつ問題を解決していくしかない」というのが、ロボット屋として感じているところです。

9 会場との意見交換

【質問者 A】

昨今の建設業界一般の大きな問題として労働者不足というのがあるのですが、労働者不足解消に役立つようなシステムで近々に「例えばこういうモノが実用化しそうだ」というものがございましたら、ご紹介頂きますでしょうか。

【油田】

正直なところ、ご期待に添える答えは持っていません。例えば、人がシャベルで土を掘っていたという状況に比べて、パワーショベルは圧倒的に人を減らしています。そういう意味では、うまく人を機械に代替出来るものについては、実はもう見事に、すでに代替されている気がいたします。様々な工夫がされている中で、例えば重機の運転が初心者でも出



るようなアシスト機能といったものも、それなりに実用化しているように思います。いわゆるマシンガイダンスやマシンコントロールですが、以前は熟練を必要としたものが、熟練しなくても扱えるようになってきています。そういうところからコツコツと進むのではないかと思います。

もっとも最近、「これは使い物になるな」と思われたのが、先の国交省がやった橋梁点検等の現場検証でした。橋梁点検は「近接目視」が規則として定められているので、現状では、どうしても人が行なわなければなりません。つまり、ロボットが優れていても、近接目視のルールがある限り、人手不足の解消にはなりません。しかし、良い写真をきちんと撮ることが出来るということが確認されつつあり、それにより人がやらなければいけないことを機械に置き換えるということが、進むだろうと確信させられました。ロボットメーカーは、「人手不足解消を直接的に妨げているのは、技術ではなく近接目視というルールだ」と指摘しますが、逆に「これだけきちんと見えます」ということを示せば、ルールも変わってくると私は感じております。その意味では、このプロジェクトそのものがそういう性格でした。例えば、今は人がロープアクセスでぶら下って検査しに行かなければいけない部分などはかなり機械に変われば、作業時間はずっと短くなるだろうと感じております。

しかし一方で、重たいものを動かすような作業については、自動化は簡単ではなく、すぐに効率を向上させる機械が生まれるという話にはなりにくい。むしろ、「人にとって便利な道具」という面で、様々な要素技術が生きていくように思います。

【質問者 B】

中小河川の維持工事のような、地味な仕事に対するものについての開発は、注目されているのでしょうか。

【油田】

はい、むしろ小さな規模の仕事の方がロボットの出る幕は大きいと感じています。今、人が行っている部分を少しアシストしながらどう自動化していくか、どう省力化していくか

という場面が、ロボットの出る幕だと思うからです。そういう意味では、様々な現場で各々の困ったケースについて色々と聞かせて頂きお手伝いをさせて頂いて、ロボットが働くケースを増やしていくのが良いと思います。

例えば、畔の除草の話ですが、農業の方の話では「くたびれてくると、何となくロボットの仕事が雑になるので、ひっくり返らないように、危険な角度まで傾いたときにピッと音が鳴ってくれるようにしてくれるだけでいい」と言われたことがあります。「それぐらいなら出来そうですね」と申し上げたのですが、そういう場面で使える機械を作れば、「じゃあ、これももっとこうしたい」というような要望が出てきます。そこから進めていくのが現実的なアプローチだろうと感じています。

日本中の若手のロボット研究者のネットワークの中には、この種の具体的なテーマを見つけたいと思っている者が間違いなくおります。そういった具体的な問題を聞かせて頂いたり見せて頂いたりしながら、その解決法にアプローチしていくのが良いのではないかと考えています。

※1 NEDOのホームページ

http://www.nedo.go.jp/library/pamphlets/RB_201803_project.html



※2 YouTubeのNEDO Channel

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLZH3AKTCrVsXbC-wFJDNMFV7Tlxk1Qlmd>



本内容は2020年5月18日に国土政策研究所講演会として収録した内容によるものです。