

特集 建設現場へのロボット導入 Application of Robots to the Construction Sites

Summary

The current Japanese construction industry faces the challenges of an aging population and a shortage of new workers. We expect that productivity improvement through robot technology and computer technology, which have been developing in recent years, will be a countermeasure against this labor shortage. From the 1980s to the 2000s, general contractors, including our company, had developed more than 160 types of robots. However, they were never used continuously. In developing the robot, the authors examined these past cases, clarified the reason why they were not used, and set three new policies. (1) Identification of users and true needs, (2) Examination of pinpoint and simple solutions, (3) Collaboration with service providers. This paper introduces five types of robots and one type of remote control system developed for use at construction sites in recent years based on these policies. Specifically, (1) transport robot “Kamon” (2) transport robot “crawler TO” (3) scraping type cleaning robot “TO gather” (4) suction type cleaning robot “AX Kyuiin” (5) self-propelled marking robot (6) tower crane Remote control system “Tawa Remo”. In the future, we will collaborate with rental companies, etc. to promote the spread and development of these technology groups. Furthermore, we will develop lower-cost and easier-to-use robots that can be applied to work that is expected to have a high robot introduction effect.

Keywords: construction robot, transport robot, cleaning robot, floor marking robot, tower crane remote control system

1 はじめに Introduction

宮口 幹太 Mikita Miyaguchi*1

建設業界では、将来の就業者不足の問題が深刻化している。日本国内の生産年齢人口が減少していく中、建設業の年齢別の就労者比率は、Fig. 1に示すように、55歳以上の比率が年々高まっており、全産業に比較しても高齢化の傾向が顕著となっている。一方、29歳以下の比率は減少傾向にあり、ここ数年は持ち直しつつあるものの、全産業との開きは依然として大きい。将来の就業者不足問題に対応するために、「新規入職者の確保」が課題となっている。

就業者不足への対応として、もう一つ重要な課題が「生産性向上」である。就業者が1時間あたりに生み出す付加価値を見てみると、Fig. 2に示すように、製造業はここ20年間ほぼ一貫して上昇傾向にあるのに対して、建設業では低位に推移している。建設業においても、携帯型端末の普及など、業務のIT化が進み、近年は生産性の向上が図られつつあるものの、生産の最前線である建設現場では依然として個人のスキルやアナログなコミュニケーションに依存し、労働集約型の作業も多い。さらなる「生産性向上」の余地が残されている。

このような中、2024年4月には建設業においても労働時間の上限規制が施行されることもあり、「働き方改革」が待ったなしの状態となっており、あらゆる施策をもって、「生産性向上」と「新規入職者の確保」に向けた業界の魅力の向上を目指さなければならない。

これら課題の解決策の一つとしてロボットによる作業の自動化やサポートが期待されている。竹中工務店術研究所では、過去の建設ロボット開発の事例や現状の建設現場の課題を分析し、現場で真に求められ使われるロボットとは何かを考察し、開発の方針を策定したうえで、この方針に沿うようなロボット開発を推進している。本論では、近年のロボット開発の状況を報告する。

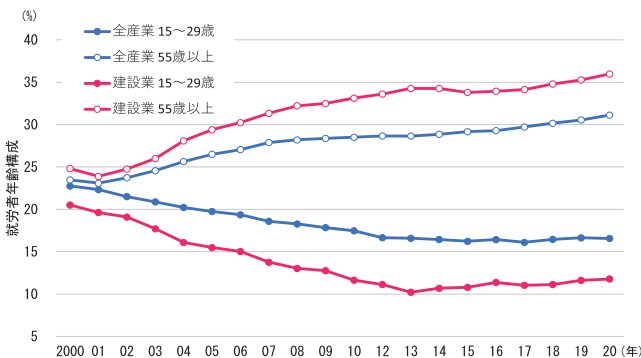


Fig. 1 建設業の高齢化の進展¹⁾
Progress of aging in the construction industry

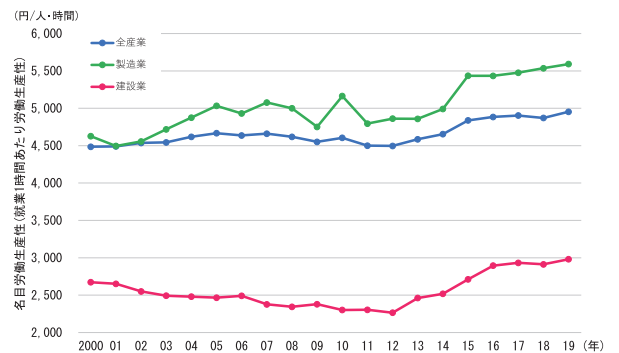


Fig. 2 建設業の付加価値労働生産性の推移²⁾
Changes in value-added labor productivity in the construction industry

2 過去のロボット開発 Past Robot Development

宮口 幹太 Mikita Miyaguchi*1

筆者らは過去に開発された建設ロボットを調べ、普及に至らなかった原因を考察した。記録によると1980年代～2000年代まで、Fig. 3に示す通り当社では20種以上、建設業界では160種以上のロボットが開発された³⁾が、いずれも建設現場での試行までにとどまっており、本格的に普及したものはほとんどなかった。筆者らはこれら過去のロボットが普及しなかった主な原因は以下であったと考えている。

- ・技能労働者の代替を目指し一連の施工作業を自動化しようとしたため、大きく重くなり、運搬設置に手間がかかった。
- ・バッテリーや通信技術が未熟であったため、大きなロボットを長時間駆動するための電源供給や制御のための

*1 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute

ケーブルが必要で建設現場での設置が煩雑であった。

- ・制御技術やコンピュータ技術が未熟であったため、複雑な操作が必要になり、専任のオペレータが必要であった。
- ・複雑で多彩な機能を搭載していたので、ロボットの製造及び運用にかかる費用が高額であった。

これらを考慮しつつ、我々は、最新の先端技術を駆使しながら、現場で真に使われるロボットの研究・開発を進めるべきであると考えた。



Fig. 3 竹中工務店が過去に開発したロボット群
Robots developed in the past by Takenaka

3 将来の建設現場と建設ロボットの位置づけ Future Construction Sites and Robots

宮口 幹太 Mikita Miyaguchi^{*1}

過去のロボット開発から20年以上が経過し、その間にロボット技術は著しく発展しているが、建設作業や工程のロボット化・自動化の難易度は、依然として非常に高いのが実状である。その原因は、建設作業の複雑さにある。建設工事では一品ごとに作るものが異なり、現場では多様で複雑な作業や動作が求められる。広くて変化に富む作業ヤードの移動や、作業する際の臨機応変の判断などは、進化したロボット技術をもってしても容易ではない。したがって、一部の繰り返し生産の工場のように、機械やロボットが主体となるような建設現場の未来を想定することは難しく、今後も「人」の能力に大きく依存することになるのは間違いないと考えられる。将来の建設現場には、「人」を中心としたロボット化が求められている。

「人」を中心に据えた時に、建設現場のロボット化には、単なる省人化に留まらず、さらなる役割が期待される。まず一つは、人にとっての「やりがい」を高めることである。人は常にやりがいを感じる仕事を求めている。「やりがい」につながるのは、建設作業をとおして得られる喜びや充実感である。例えば、何十年と残るすばらしい建物の建設に関わり社会に貢献すること、常に良い仕事を追求し日々成長していることを実感することなどである。したがって、「やりがい」につながる作業を人が行い、そうではない作業をロボットが支援または代替する、という連携の姿が考えられる。

もう一つは、「心身の負担」を軽減することである。建設業は長らく「きつい、汚い、危険」の3K職場とされてきた。例えば近年の夏の猛暑は、熱中症の危険性ととともに、生産効率の低下を招いている。また、建設工事には腰

をかがめるなどの無理な姿勢や、重量物を持ち上げたり支えたりする作業が依然として多い。疲労の蓄積は身体の故障につながり、離職を余儀なくされることもある。これらの心身の負担を人とロボットとの連携で低減する姿が考えられる。

人のやりがいを高め、心身の負担を軽減する「人中心のロボット化」には、働く場の魅力を高める効果も期待できる。将来の人手不足が懸念される建設業が目指すべき姿であると考えられる。

4 建設ロボットの開発方針 Construction Robot Development Policy

宮口 幹太 Mikita Miyaguchi*1

過去の開発事例の分析から得られた教訓を踏まえつつ、「人」中心のロボット化を、一時の流行に終わらせることなく、実効あるものとして実現するために、筆者らは以下の3つのロボット開発の方針を定めた。

① ユーザーと真のニーズの特定

ロボットを使ってメリットを得るユーザーは誰か、そのユーザーにどのようなメリットを提供すればよいのかを特定する。

② ピンポイントでシンプルな解決方法の検討

ロボットに求める機能が過剰になりすぎないよう真のニーズに対してピンポイントでシンプルに解決する方法を検討する。

③ サービス提供者との協業

ロボットを広く普及させるために、ロボットの生産・運用・サポートの体制を開発段階から構築する。

本章では、これらについて解説する。

4.1 ユーザーと真のニーズの特定

Identifying Users and their True Needs

真に活用され普及するロボットを開発するために、どのユーザーを対象にどのようなメリットを提供すればよいのかを開発着手前に徹底的に探索することとした。

まず、建設現場へロボットを導入する初期の段階では、できるだけ多くの技能労働者がユーザーとなるような開発対象を選定するのが効果的であると考えられる。建設現場では50を超える職種の技能労働者が工程の進捗とともに日々入れ替わるように作業をしている。ここで、ある一つの職種に特有の作業にロボットを適用しても、工事全体における効果は限定的となるが、多くの職種に共通の作業にロボットを適用すると、波及効果は非常に大きくなると考えられる (Fig. 4)。

多くの職種で共通して実施されている作業として、墨出し、資材運搬、掃除・片づけなどの付随的な作業がある。この付随的な作業をロボットなどに代替・サポートさせることは、技能労働者の全体の作業時間のうち、より付加価値の高い加工・組立といった主作業に充てる時間を増やすことになるので、労働生産性の向上効果が期待できる。また、主作業は高い技能を求められる作業でもあるので「やりがい」を感じる効果の増大も期待できる。このように、墨出しや資材運搬等のロボット化は、多くの職種に対応する真のニーズであると判断することができる。

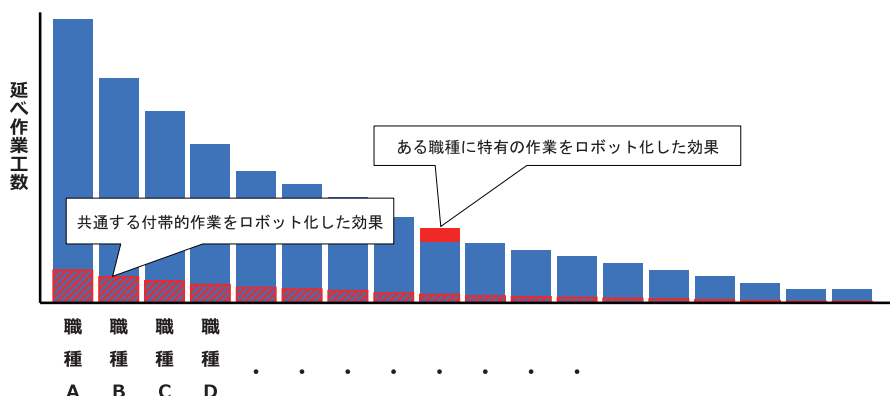


Fig. 4 建設現場の職種別延べ人数のイメージ
Total number of people by job type at construction site

4.2 ピンポイントでシンプルな解決方法の検討

Examining a Pinpoint and Simple Solution

ロボットの機能が過大になりすぎると、ロボットは大きくて重く、操作も複雑になってしまう。さらにイニシャルコストも高くなって、結果的に普及を妨げることになることが過去の事例分析から明らかとなっている。そこで、真のニーズを踏まえ、課題の本質を深掘りし、重要な部分にピンポイントで効くシンプルな解決方法を探索することを徹底することとした。

例えば、掃除なら現場に落ちているごみやチリを収集し分別してゴミかごへ入れるという一連の流れがある。人ならこれらすべてを1人で実施することができるが、ロボット1台に任せようとする、様々な機能が必要となり、難易度が高まる。そこですべての作業をロボットに代替させようとするのではなく、「床を掃いてごみを集める作業だけ」をロボットに代替させることが考えられる。一連の作業の中で最も時間がかかる部分、ユーザーが最も困っている部分などをピンポイントで狙うことで、ロボットの機能を絞り込みシンプルな技術で解決が可能となる。

ロボットに搭載する技術をできるだけシンプルにすると、小型化や軽量化も容易になり、より安価に製造できるようになる。また、操作も簡単になるなどユーザーに対して余計な負担を増やさないことにつながり普及しやすくなる。

4.3 サービス提供者との協業

Collaboration with Service Providers

ロボットを試験的な利用で終わらせることなく、広く普及させていくためには、運用段階までを視野に入れた取り組みとしていく必要がある。そこで、開発後の生産・運用・サポートの体制を開発の初期段階から検討し、これらを担当するプレイヤーのロボット開発への早期参画を進めることとした。

運用段階で必要となるプレイヤーには、ロボットの生産・販売、保有・メンテナンス・貸出、現場での利用サポートなどが考えられる。さらに技術の進歩やユーザーからの新たなニーズに対応して、ロボットのハードやソフトの改良開発も継続して行う必要がある。これらを担う可能性のあるゼネコン、ロボットメーカー、販売店、レンタル会社などが初期段階から協業し開発を進めることが、建設ロボットを普及させていく上で非常に重要であると考えている。

5 現在の建設ロボット開発事例

Current Construction Robot Development Cases

宮口 幹太 Mikita Miyaguchi*1 永田 幸平 Kohei Nagata*2 鶴田 壮広 Takehiro Tsuruta*3

以上を踏まえ本章では近年筆者らが開発した「運搬ロボット」、「清掃ロボット」、「墨出しロボット」、および「遠隔操縦システム」を紹介する。

5.1 運搬ロボット

Transport Robots

建設現場では、重量のある建設資材を台車に載せて人が押して運んでいる。1日の運搬量は非常に多く、1現場で1,000台以上の台車を導入している場合もある。台車で資材を運搬する作業は時間を要し、体力も消耗する重労働であるため、資材を自動で運搬する、あるいは人が運搬するのをサポートするロボットが要望されていた。

そこで筆者らは、異なる状況に対応する2種類の運搬ロボットを開発した。一つは、自動的に人を追従する運搬用ロボット台車「かもーん」、もう一つは、一般の台車の下にもぐり込んで台車の搬送を支援するロボット「クロウラTO（トゥ）」である。

5.1.1 自動追従台車「かもーん」

Auto-following Cart “Kamon”

資材運搬台車を自動で走行させるためには、台車側に自動走行の高度な機能が求められるのに加え、走行経路の

*2 西日本機材センター 課長 Manager, Western Japan Engineering Depot

*3 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute

確保や台車への運転指示などの手間がかかり、導入に至るまでに解決すべき課題は多い。自動追従台車「かもーん」は、自動走行までの高度な機能は求めず、「人やモノに追従する」というよりシンプルな機能で、運搬の効率化、負担の軽減を実現する技術である（Photo 1、Table 1）。

「かもーん」は、車体前方に配置した2次元測域レーザーセンサー（LiDAR）により、最初に認識した人、モノに追従していくことができる。柱などの障害物を自動で回避する機能も有しており、衝突することなく追従できる。また、人だけでなく他の台車にも追従させることが可能なので、1人で複数の「かもーん」を連ねて走行させて誘導することも可能となっている。一方、エレベータへの積み降ろし時など、正確で繊細な動作が必要なケースに対応するため、レバー操作による電動アシストモードを搭載している（Photo 2）。

自動追従時の安全機能も搭載している。「かもーん」は車体の前後に衝突防止バンパースイッチを取り付けており（Photo 3）、人物や障害物などに接触した際は非常停止が作動する。また、追従機能のために前方に取り付けたLiDARを用いることにより、車列の途中に横から人が入ってきたような場合でも自動で回避する機能を実現している。

このように自動追従台車「かもーん」では、資材運搬を効率化しようとロボットにすべての機能を求めるのではなく、搭載する機能をしぼり、走行経路や環境の変化に対しては人が判断することでロボットの導入手間と価格の低減を図っている。



Photo 1 自動追従台車「かもーん」
Auto-following cart "Kamon"

Table 1 主要諸元
Specifications

荷台長	1,250mm
荷台幅	800mm
荷台高さ	360mm
質量	190kg
最大積載量	600kg
走行速度	最大4.5km/h

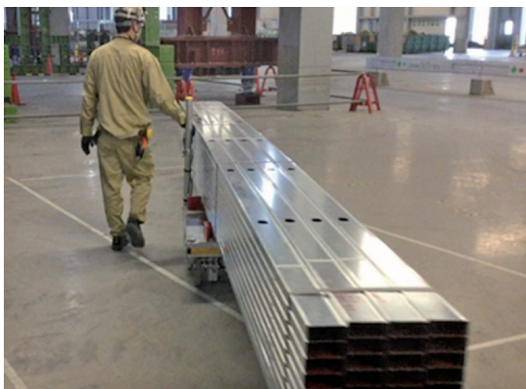


Photo 2 電動アシストモード
Electric assist mode



Photo 3 衝突防止バンパースイッチ
Collision prevention bumper switch

5.1.2 運搬ロボット「クローラTO（トウ）」 Transport Robot "Crawler TO"

一般的に建設現場で資機材の運搬用に使用する既製品の台車は4輪キャスターとなっている。重量物を積んだ台車の移動は非常に労力がかかる作業であり、段差、スロープ等での材料移動には特に労力が必要である（Photo 4）。「クローラTO」は、これら既製品の台車の移動を容易にするロボットである（Table 2）。

「クローラTO」は、4輪台車の下部に潜行可能な高さに設計されている（Photo 5）。台車の下部に潜行後にロボット中央部に設けられたリフター機構を用いてロボット頂部を25mm上昇させ、台車ごと資機材を持ち上げる（Photo 6）。

台車と一体となったロボットは、リモコン操作で移動することができる。これにより技能労働者は、台車に対して力を加えることなく、資機材の移動が可能となる。

「クローラTO」の移動機構には、不整地（段差・登り坂等）、悪路での高い走破性を考慮して、全方向移動クローラ機構「OMNICRAWLER」を採用している（Photo 7）。「OMNICRAWLER」は、東北大学大学院情報科学研究科、多田隈健二郎准教授の研究成果⁴⁾をベースに機械メーカーが実用化を進めた移動機構である。通常のクローラ機構の回転により前後方向への移動を行い、ローリング機構の回転により左右方向への移動を行うことが可能である（Fig. 5）。

「クローラTO」の操作については、スマートフォン（またはタブレット）専用のアプリケーションで行うことができる（Photo 8）。ロボット本体とWi-Fiで接続し、技能労働者が片手で操作できる仕様となっている。走行方向として、前進、後進、右移動、左移動の4方向に、斜め走行、360度旋回の操作が可能である。また、バッテリーの残量もスマートフォン画面上で確認できる。スマートフォン、タブレットでの操作方法以外にジョイスティックを使った仕様も開発中である。



Photo 4 建設現場用台車（通常使用状況）
Cart for construction site (normal usage)



Photo 5 建設現場用台車と「クローラTO」
Construction site cart and “Crawler TO”

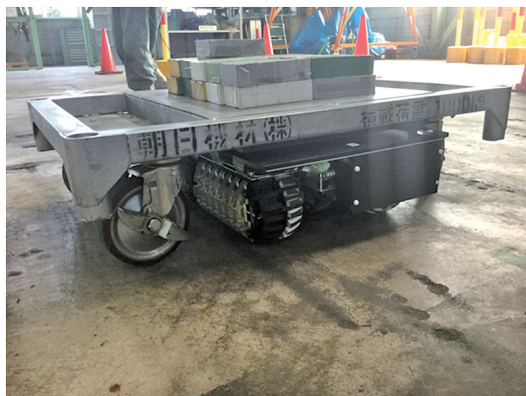


Photo 6 「クローラTO」潜行状態
“Crawler TO” submerged sta

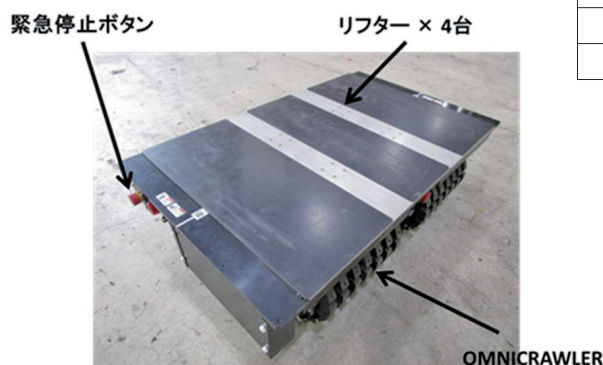


Photo 7 搬送支援ロボット「クローラTO」の機能構成
Functional Configuration of the Transport support robot “Crawler TO”

Table 2 主要諸元
Specifications

項目	仕様
移動機構	全方向移動 OMNICRAWLER
サイズ	W:540×D:920×H:246mm
潜行高さ	250mm以上
リフター機構	電動ラック・ピニオン
リフター上昇高さ	25mm
積載量	最大500kg 牽引最大1,000kg
質量	120kg
走行速度	3km/h
許容段差高さ	25mm
登坂角度	10° (≒ 1/6) ※ロボット単体20°
バッテリー容量	480Wリチウムイオンバッテリー
稼働時間	2～4h
操作方法	スマートフォン Wi-Fi

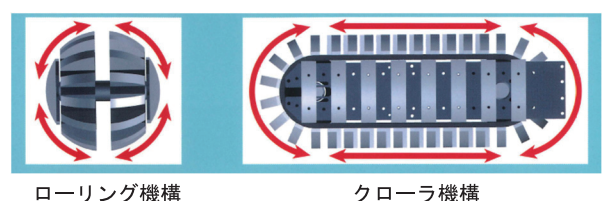


Fig. 5 OMNICRAWLER機構
Mechanism of OMNICRAWLER

5.1.3 運搬ロボットの展開状況と今後

Deployment Status and Future of Transport Robots

これら2種類の運搬ロボットは現場での評価もよく、すでに様々な建設工事にて運用の実績を上げている。レンタル会社による商品としての保有も進み、稼働率も高水準で推移している。今後は同型機を増産することはもちろんのこと、現場のニーズに合わせて小型化や大型化などのバリエーションを増やし、建築、土木問わず他用途にも順次適用していく予定である。



Photo 8 操作用スマートフォン画面
Operation smartphone screen

5.2 清掃ロボット

Sweeping Robots

建設現場で発生するちりやほこり、建材くずなどの清掃作業は、1日の作業の終了時などに技能労働者自らが行っている。清掃作業にかかる時間が多ければ生産性を阻害する要因になるとともに、健康への影響も懸念されるため、清掃作業を省力化・省人化するロボットが要望されていた。

筆者らは、耐火被覆材のような綿状の大きめのゴミをかき集める清掃ロボット「TOギャザー」と細かいチリまで吸引してきれいにすることができる吸引型清掃ロボット「AXキューイン」の2種の掃除ロボットを開発した。

5.2.1 かき集め型清掃ロボット「TOギャザー」

Sweeping Robot “TO Gather”

鉄骨の耐火被覆吹付工事のうち、半湿式タイプの耐火材を使用する作業では、鉄骨に付着しなかった耐火材が綿状になって大量に床上に落下する（Photo 9）。その清掃作業には1日の作業時間のうち5分の1から4分の1が使われており、作業の生産性向上、そして労働環境の改善という2つの側面から解決策が望まれていた。

そこで筆者らはロボットの販売を担う商社と協業して、建設現場や工場等の技能労働者の負担軽減策として、建設現場で発生する綿状のゴミを集めるかき集め型清掃ロボット「TOギャザー」を開発した（Photo 10）。

「TOギャザー」の開発では、技能労働者が自ら使用することを想定し、機能をできるだけ絞ることで操作を簡単にするとともに安価で提供することを目標とした。

建設現場で一般的によく使用されるカラーコーンを、掃除したい場所の四隅に設置しスタートボタンを押すと、ロボットのレーザースキャナーがカラーコーンのマーカーを確認し清掃エリアを自動で判断するとともに、清掃ルートを生成して自律的に清掃を始める。ロボットが一方方向にゴミをかき集めるので、後で人が処理しやすいようになっている（Fig. 6）。

綿状のゴミの場合、従来の吸引型清掃ロボットでは、すぐにタンクが満杯になってしまいロボットのタンク内のゴミを捨てるといった余計な手間が発生してしまうが、「TOギャザー」は、床に落ちているゴミを清掃エリアの一边に寄せて集めるだけなので、ロボットのタンク内のごみを捨てるという手間を増やさない。また、技能労働者は工事の作業時間中にロボットを作動させておき、作業後に一边に集められたゴミを集積するだけでよくなるため清掃時間を大幅に削減することができる。これにより、従来の作業時間全体のうちの清掃にかかっていた時間をより生産的な作業（本作業）に充てることが可能となり、耐火被覆吹き付け工事の技能労働者1人が1日当たりに吹き付ける面積を80m²から125m²と約1.5倍に増やすことが可能となった。

また、吸引型とは異なり大型のごみ吸引タンクや吸い込み用のモータなどが不要なため、ロボットの機体重量が30kg以下と軽量化でき、作業者が1人でも移動できるなど使い勝手の良いものとなっている。



Photo 9 耐火被覆工事における清掃作業
Cleaning work in fireproof coating work



Photo 10 かき集め型清掃ロボット「TOギャザー」
Sweeping robot "TO Gather"

5.2.2 吸引型清掃ロボット「AXキューイン」 Suction cleaning robot "AX Kyuiin"

建設工事では耐火被覆吹付工事以外の工事でも清掃作業には多くの時間を費やしている。そこで産業用清掃機メーカー、およびレンタル会社2社と協業して自動的に床面を清掃する吸引型ロボット「AXキューイン」を開発した。

「AXキューイン」は、「TOギャザー」のように単に大きめのゴミをかき集めるだけでなく、細かいチリまで吸引して床面をよりきれいにしたいという要望に応えるためのロボットである（Photo 11）。使い勝手の良い既存の手押式産業用清掃機にレーザーセンサを取り付け、自動走行用のアプリケーションを搭載することで、自動化を実現している。

開発当初は、「TOギャザー」と同様に四隅に設置したカラーコーン（マーカ）を認識し、その内部を一筆描きで自律走行する機能のみであったが、自動走行アルゴリズムの改良により障害物回避機能（Photo 12）や清掃終了後に開始位置近辺に戻る機能が付加されている。

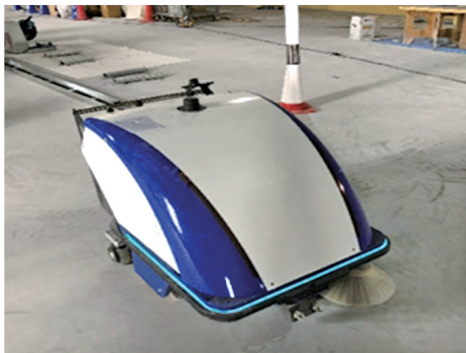


Photo 11 吸引型清掃ロボット「AXキューイン」
Suction cleaning robot "AX Kyuiin"



Photo 12 清掃指定エリア内での障害物回避機能
Verification of obstacle avoidance function in the sweeping area

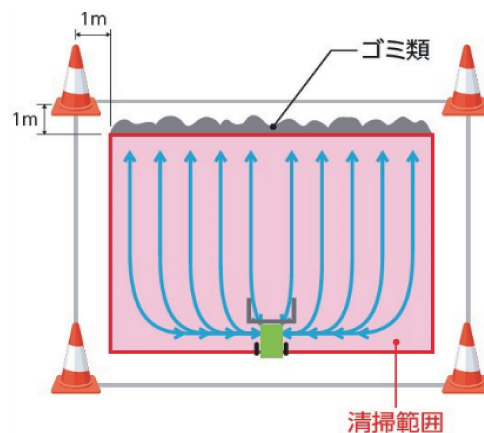


Fig. 6 清掃エリアの設定と清掃ルート
Setting up sweeping areas and routes

5.2.3 清掃ロボットの展開状況と今後

Deployment Status and Future of Sweeping Robots

先の運搬ロボットと同様、これら2種類の清掃ロボットも現場での評価が非常に高く、すでに様々な建築工事に運用の実績を上げている。レンタル会社による商品としての保有も進み、稼働率も高水準で推移している。

今後はさらに保有台数を増やし、市場のニーズに対応していく予定である。

5.3 墨出しロボット

Automated Mobile Marking Robot

建設工事における墨出し作業は、特定の職種に限定的に必要な作業ではなく、建設施工に関わる多くの職種にとって必要不可欠な作業である。様々な職種に共通する墨出し作業を自動化するローコストで使いやすいロボットを開発することができれば、ロボットの導入効果は極めて大きいと考え、墨出しロボットの開発を行った。これまでに試作機の開発が完了しており、すでに幾つかの現場で適用して、その有効性を確認している。現在は、建設機械のレンタル会社と共同で商用機を開発中である。

5.3.1 墨出し精度とローコスト化の両立

Achieving Both Accuracy and Low Cost

墨出しロボット開発における先行他社事例^{5) 6) 7) 8) 9)}では、ロボットの正確な位置制御のために、ロボットに取り付けた計測用プリズムを追尾しながら位置計測を行うトータルステーションを利用しているが、これは安価な製品でも200万円以上するため低コスト化の障壁となっていた。そこで筆者らはトータルステーションよりも比較的安価な3次元レーザー測量機に着目した (Fig. 7)。これは移動するプリズムを追尾しながら位置計測する機能がないため、高精度なロボット移動制御が課題であった。そこで、本測量機とカメラ画像を併用した墨出しロボット制御手法を考案した。墨出しロボットは、独立2輪駆動型の移動台車プラットフォーム上に、床面に文字や図形等を描画するための描画機構を備える (Fig. 8)。レーザー測量機は墨出し位置へ向けて測距用レーザーを照射する。墨出しロボットは墨出し位置へ移動し、到達後に停止する。この時、追尾型測量機による方式とは異なり、移動中に正確な位置情報が得られないので、あらかじめ設定した方向と距離で進むと墨出し位置と停止位置との間にずれが生じるので、停止位置において、受光板に投影されたレーザースポット位置 (Fig. 9(a)) をカメラ画像 (Fig. 9(b)) から計測することで、墨出し位置と停止位置とのずれを正確に算出し、高精度な墨出しを実現する。



Fig. 7 レーザー測量機
3D measuring instrument

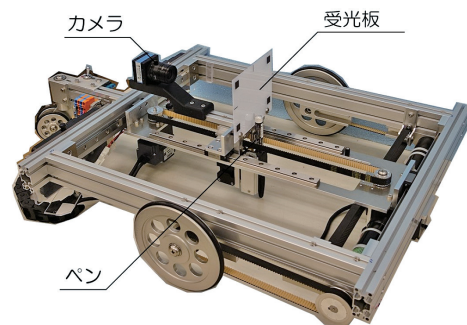
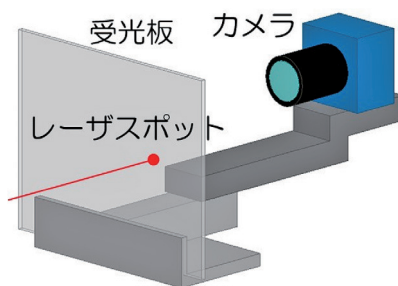
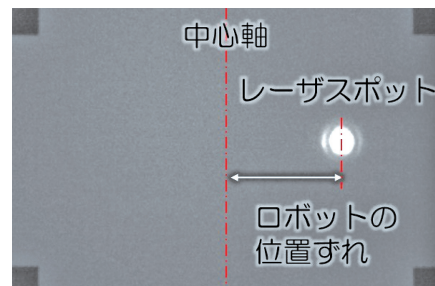


Fig. 8 墨出しロボット (外装無)
Marking robot (no exterior)



(a) 受光板上のレーザースポット



(b) カメラ画像

Fig. 9 位置計測原理
Principle of position measurement

5.3.2 作業開始前準備の簡素化

Simplification of Preparation Before Starting Work

これまで開発されてきた墨出しロボットは大きくて重く、それが現場普及を妨げる要因の一つであった。筆者らは構造が単純なペンプロット方式 (Fig. 10(a)) による描画機構の採用や適切な部品選定等により、外形寸法 (W) 450mm×(D) 730mm×(H) 320mm、重量20kgと、小型軽量のロボットを実現した (Fig. 10(b))。現場へは宅配便での配送が可能で、現場内運搬も容易である (Fig. 10(c))。

墨出しロボットの作業のためには、現場内のどこにどんな図形や文字を描画するかを設定する必要がある。これをオペレータが一つ一つ手動で設定するのは現実的でないので、CADデータを活用して、短時間で容易に墨出しロボット用の作業データを作成できるアプリを開発した。



Fig. 10 小型・軽量の墨出しロボット
Small and lightweight marking robot

5.3.3 作業効率の向上

Improvement of Work Efficiency

墨出し作業を効率化するためには、現場内に点在する墨出し箇所への移動距離の削減が効果的である。作業エリアに点在する墨出し中心に対し、無駄なく最短のルートで墨出し作業を行う問題は巡回セールスマン問題 (Traveling Salesman Problem: TSP) に類似している。TSPとは、地図上に配置された複数の都市に対し、すべての都市を一度ずつ経由して最初の都市に戻る閉路のうち、長さが最小になる順路を求める問題である。本ロボットにTSPを解くアルゴリズムを実装し、最適な順路で作業するようにした。障害物を回避しつつ最短経路が生成されていることを確認できる (Fig. 11)。

5.3.4 墨出しロボットの展開状況と今後

Deployment Status and Future of Marking Robot

墨出しロボットはこれまでに7つの建設現場で実証を行ってきた (Table 3)。最も重要な性能である墨出し精度については、他社先行開発事例と遜色ない。技能労働者1人当たりの作業量と比較した際のロボットの作業量を作業効率としたとき、墨出し種別によって大きく異なるが、自動倉庫用アンカー位置の墨出しの場合、300%と非常に高い作業効率となった。墨出し種別は様々であり、多様な職種に対応可能なロボットであると言える。

今後はレンタル会社と協業し、2022年春のサービス開始を目指し、さらなる利便性向上のための開発を実施している。

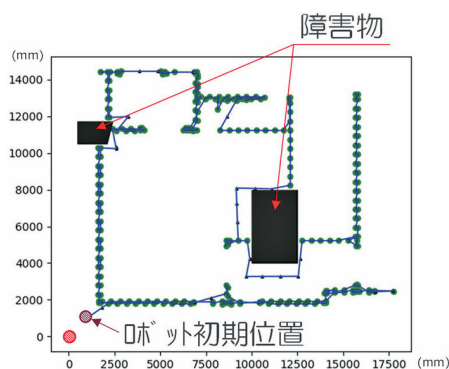


Fig. 11 作業効率改善技術の確認
Confirmation of Work Efficiency Improvement Technology

Table 3 現場実証結果
Results of Field Demonstration

No.	建種	施工面積	墨出し種別	墨出し箇所数	精度	作業効率
1	事務所	40m ²	フリーアクセスフロア	182	3mm	33%
2	住居	20m ²	フリーアクセスフロア 設備用アンカー	92	1mm	—
3	事務所	200m ²	間仕切り壁	62	2mm	—
4	事務所	120m ²	フリーアクセスフロア	524	2mm	33%
5	工場	225m ²	間仕切り壁	249	3mm	—
6	倉庫	350m ²	AGV用床面 貼付QRコード	393	2mm	200%
7	倉庫	100m ²	自動倉庫用アンカー	405	1mm	300%

5.4 遠隔操作システム

Remote Control System

タワークレーンなどの建設機械やロボットの遠隔操作技術は、現場という「場所の制約」から技能労働者を開放する可能性を有している。高齢者や女性など体力に自信がない作業者の受け入れや、複数台の建設機械やロボットを1人で遠隔からオペレーションすることが可能となり、技能労働者の作業環境改善と生産性向上の両面での効果が期待される。

5.4.1 タワークレーン遠隔操作システム「Tawa Remo」

Tower Crane Remote Control System “Tawa Remo”

建設就業者数の減少に伴い、タワークレーンのオペレータの確保が難しくなっており、熟練オペレータの減少が懸念されている。また、近年、高自立型のタワークレーンが多く、オペレータは毎日、旋回部に設置された運転席まで最大50mある梯子を昇降する必要がある。一旦運転席に着くと作業終了まで1日中、高所かつ常に揺れている環境の中で仕事をすることになる。特に高齢のオペレータには肉体的な負担が大きく、早急に身体的負担の軽減や作業環境の改善に向けた取組みが必要であった。そこでゼネコン、建機レンタル会社と協業して、遠隔でタワークレーンを操作できる技術「Tawa Remo」を開発した。

本システムは地上に設置した専用コックピットから遠隔でタワークレーンを操縦することができる。タワークレーン側には高性能カメラや振動センサーを設置しており、実際のタワークレーンの運転席から撮影された映像がモニタ画面に映し出され、音や振動までもコックピット側で体感することができる（Fig. 12）。これによりタワークレーンのオペレータは遠隔からでも運転席と同様の感覚でタワークレーンの操作ができるようになった。さらに、「Tawa Remo」はコックピットを遠方に設置することも可能で、コックピットを様々な拠点に設置することで、現場への移動時間をも削減可能となる。

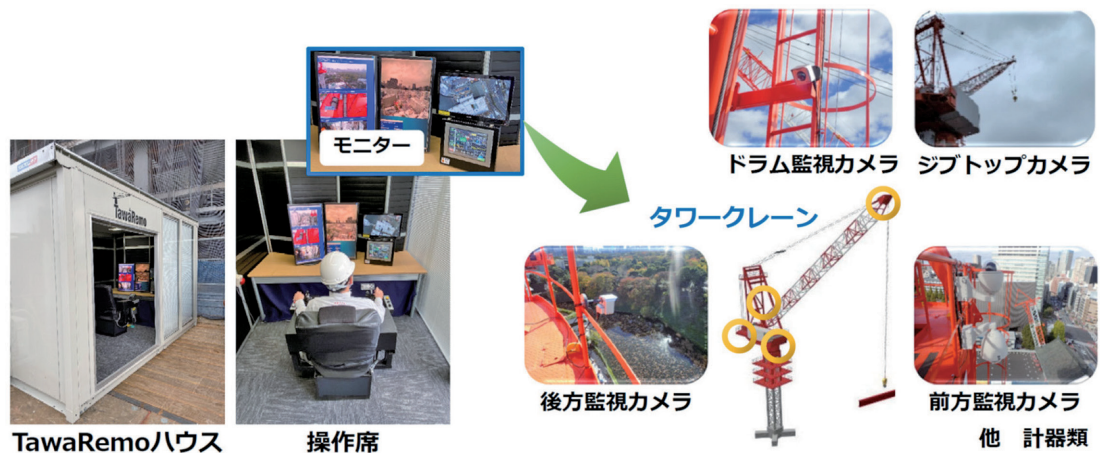


Fig. 12 「Tawa Remo」システム全体
“Tawa Remo” System Overview

5.4.2 遠隔操作システム「Tawa Remo」の展開状況と今後

Deployment Status and Future of Remote Control System “Tawa Remo”

現在、「Tawa Remo」は実際の建設現場での試運転を進めている。レンタル会社2社が保有するタワークレーンへの当該システム導入とコックピットの運用保守を分担し、2021年度内の本格運用を開始する予定である。また1ヶ所に複数のコックピットを配置し複数のタワークレーンを遠隔操縦できることから、1人の熟練オペレータが同時に複数のオペレータに指導教育を行うことで、技術の伝承や向上にも役立てることを目指している（Fig. 13, Fig. 14, Photo 13, Photo 14）。



Fig. 13 簡易コックピット
Simple cockpit



Fig. 14 専用コックピット
Dedicated cockpit



Photo. 13 クレーン稼働の様子
Crane in operation

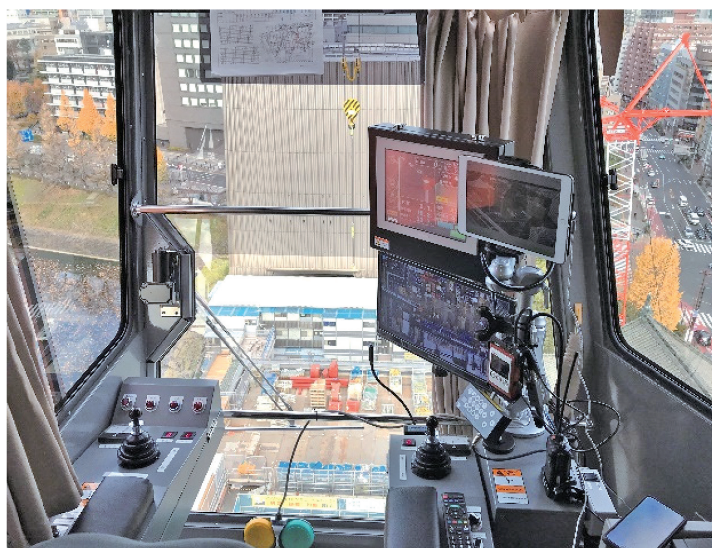


Photo. 14 クレーン上部運転席の様子
Operation seat at the top of the crane

6 おわりに Conclusion

宮口 幹太 Mikita Miyaguchi*1

本稿では建設現場で真に必要とされ導入効果を上げられるロボットとはどのようなものか、過去の事例から得た知見に基づく新たな考え方や開発方針について示した。そのうえで近年新たに開発した運搬ロボット、清掃ロボット、墨出しロボット、および大手ゼネコン同士の連携によるタワークレーンの遠隔操作システムについて概説した。今後は建設RXコンソーシアム¹⁰⁾など他社と協業することで、これらのロボットの普及展開を進めつつ、さらなる改良による利便性向上や性能向上を図っていく。また、これらの技術をさらに発展させ、ロボット導入の効果が高く見込める作業内容に適合させた新たなロボット開発と導入を進めていく。人とロボットが違和感なく共存する新時代の建設現場を実現し、より一層の安全性・生産性の向上が図られた魅力ある建設業の創出を目指して、建設業のDX（デジタル変革）を推進していきたい。

謝辞

本稿にて紹介したロボットおよび遠隔操縦システムの開発、運用、普及に対し、鹿島建設(株)、(株)レンタルのニッケン、トピー工業(株)、岡谷鋼機(株)、豊和工業(株)、朝日機材(株)、(株)アクティオ、(株)カナモトに多大なご協力をいただいた。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 総務省労働力調査より集計（2011年は東日本大震災の影響により全国集計結果がない）
<https://www.stat.go.jp/data/roudou/index.html>
- 2) 内閣府「国民経済計算」、総務省「労働力調査」、厚生労働省「毎月勤労統計調査」より集計
労働生産性=実質粗付加価値 / (就業者数×年間総労働時間)
https://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/data/data_list/kakuhou/files/2019/2019_kaku_top.html
<https://www.stat.go.jp/data/roudou/index2.html>
<https://www.mhlw.go.jp/toukei/list/30-1.html>
- 3) (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 浜田 耕史, これまでのロボット化・自動化の変遷,
日本建築学会 第11回ワークショップ「労働力不足に対応する建築施工支援技術の現状と展望」, (2018年3月)
- 4) 大阪大学 多田隼建二郎, 不整地での転倒に対して機構的ロバスト性を有する超対称型探索ロボットの開発的
研究, 科学研究費助成事業 (学術研究助成基金助成金) 研究成果報告書 (2013年6月)
- 5) Tanaka, K. et al. Development of marking robot working at building sites, Proceedings of the 12th International
Symposium on Automation and Robotics in Construction, 235–242, (1995)
- 6) Jensfelt, P. et al. A Mobile robot system for automatic floor marking, J. Field Rob. 23, 441–459, (2006)
- 7) Inoue, F. et al. Development of high accuracy position marking system in construction site applying automated mark
robot, Society of Instrument and Control, Engineers Annual Conference 2012, 819–823, (2012)
- 8) DPR construction, Laybot Shows Promise in Speed and Accuracy
<https://www.dpr.com/media/news/2013>
- 9) Kitahara, T. et al. Marking robot in cooperation with three-dimensional measuring instruments, Proceedings of the 35th
International Symposium on Automation and Robotics in Construction pp.292–299, (2018)
- 10) 建設施工ロボット・IoT分野における技術連携に関するコンソーシアムを設立, (株)竹中工務店 リリース, (2021
年9月22日)
<https://www.takenaka.co.jp/news/2021/09/03/>