

耐火被覆吹付けロボットの高機能化

上 田 航 平

坂 上 肇

瀬 川 紘 史

池 田 雄 一

Updating Fireproof Coating Spraying Robots

Kohei Ueda

Hajime Sakagami

Hirofumi Segawa

Yuichi Ikeda

Abstract

At construction sites, fireproof coating spraying is particularly affected by a shortage of skilled workers because of the harsh working environment. Hence, a growing need exists for technologies that reduce the labor requirements in fireproofing operations. In this study, fireproof coating-spraying robots were developed and used in building construction projects. The autonomous movement function of the robot was improved, and a beam-recognition function was developed. The following conclusions are drawn from the study: (1) The improved autonomous mobility function enables full-day onsite operation. (2) The beam recognition function stabilizes the spray quality by correcting the spray path based on the relative position between the robot and the beam. Although positioning time increased, having each operator operate multiple robots improved overall productivity by approximately 1.4 times. We plan to continue these efforts toward practical implementation and further expand robot applications in building construction.

概 要

建設工事の中でも耐火被覆工事は、特に夏場の劣悪な作業環境等の理由から技能工不足が顕著であり、耐火被覆工の省人化を目的とした技術開発を建設各社が進めている。筆者らは耐火被覆吹付けロボットを開発し、複数の建築工事に適用してきた。それらで得られた課題からロボットの高機能化（自律移動機能の改良、梁認識機能を開発）を行い、超高層複合施設工事へ適用した。その結果、以下に示す知見を得た。(1)改良した自律移動機能は、ターゲットの自動認識率が向上し、現場環境においても終日安定して運用できた。(2)梁認識機能は、ロボットと梁との相対誤差を計測して吹付け軌道を修正することで吹付け出来形が安定した。ロボットの位置決め時間は増加したが、耐火被覆工1人で複数台を運用できるので、約1.4倍の生産能力を得られる見込みが立った。今後も実用化に向けた取組みを経て、建築工事への適用をさらに進めて行く方針である。

1. はじめに

耐火被覆工事は、特に夏場の劣悪な作業環境等の理由から技能工不足が顕著であり、耐火被覆工の省人化を目的とした技術開発を建設各社が進めている¹⁾。大林組では、半乾式吹付けロックウール工法の耐火被覆（以下、耐火被覆）工事のうち、吹付け作業の自動化を目指し、耐火被覆吹付けロボット（以下、ロボット(Fig. 1)）を開発した²⁾。ロボットは自律移動機能を備えており、あらかじめ吹付け経路と吹付け対象梁を登録することで、一連の作業（吹付け対象梁までの移動、吹付け、次の吹付け対象梁までの移動を繰り返す作業）を自動で行う。これまでの現場適用の結果³⁾から、ロボットオペレータ1名でロボットを複数台運転することで、耐火被覆工1人と比較して生産性が向上する見込みがあることが分かった。そこで、前報⁴⁾では自律移動機能を2D LiDAR(Light Detection and Ranging)を利用したSLAM(Simultaneous Localization and Mapping)ベースの自己位置の推定手法か

ら、既知点に設置した専用ターゲットを計測する後方交会法ベースの自己位置を算出する手法に変更したことを報告した。しかし、実際の現場では、光環境の変化によってターゲットを認識できない場面があり、ターゲットの自動認識率の安定性の向上が必要となった。また、建



Fig. 1 耐火被覆吹付けロボット
Fireproof Coating Spraying Robot

設現場では様々な施工誤差が生じるため、設計情報を基に一連の作業を実施しても吹付け出来形が安定しないことがあり、この点も課題となった。そこで、自律移動機能については、ターゲットの自動認識率の安定性を向上させる改良を行い、吹付け出来形については、施工誤差を計測してロボットへフィードバックすることで出来形を安定させる機能（以下、梁認識機能）を開発した。

本報では、自律移動機能の改良と梁認識機能の開発を高機能化と定義し、その開発内容と超高層複合施設工事への適用結果について報告する。また、高機能化の有効性や実用性を検証するため、機能を有効にした場合と無効にした場合で吹付け出来形について比較検証した。

2. 得られた課題に対するロボットの改良

2.1 得られた課題の整理とロボットの改良

自律移動機能の概要をFig. 2およびFig. 3に示す。ロボットにレーザー距離計、カメラおよび回転台からなる計測ユニットを搭載し、ロボットと既知点に設置した2つのターゲットまでの距離、角度を計測することで自己位置を算出する。作業フローをFig. 4に示す。最初にロボットとターゲットを初期位置に据えて位置関係を登録する。次に、移動経路と吹付け対象の梁の情報（梁せいや幅、階高など）を登録する。ロボットは登録された経路を移動した後、ターゲットを計測し、自己位置を算出する。算出した自己位置（ロボットの中心位置）が登録した停止位置に対して一定以上の差がある場合、登録した停止位置に向かって補正移動を行う。その後、梁の吹付けを行い、吹付け終了後、再度登録した経路を移動する。これら作業を繰り返す。

建設現場では作業エリアの光環境の変化が大きく、計測ユニットでターゲットを自動認識できないことがあった。この結果、自己位置が算出できないため補正移動を行うことができない。停止誤差分ずれた位置でそのまま吹付けを行うと、吹付け品質に悪影響を及ぼす。また、高精度に自律移動した場合でも梁やスラブの施工誤差に

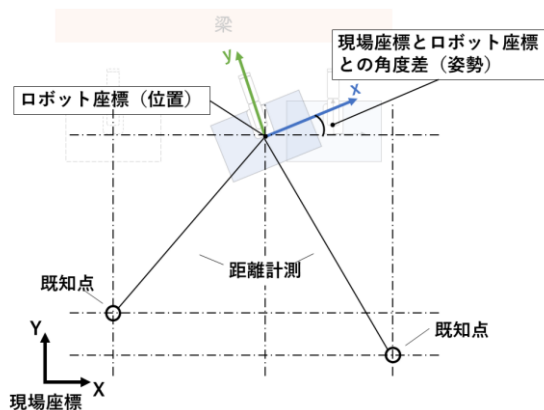


Fig. 2 自己位置推定手法の概要
Outline of Self-Location Measurement Method

より、吹付け対象梁とロボットとの相対位置・相対角度が設計値に対してずれてしまうため、吹付け品質が低下する場合もあった。

そこで、自律移動機能については、ターゲットの自動認識率の安定性を向上させる改良を行い、また、吹付け品質の低下については、ロボットと吹付け対象梁の相対

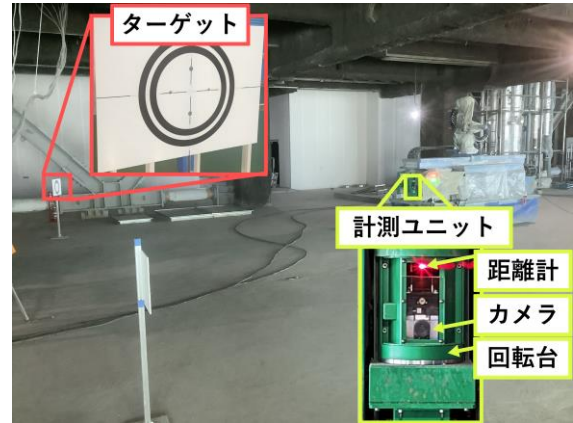


Fig. 3 ターゲットと計測ユニット
Crafted Target and Measurement Device

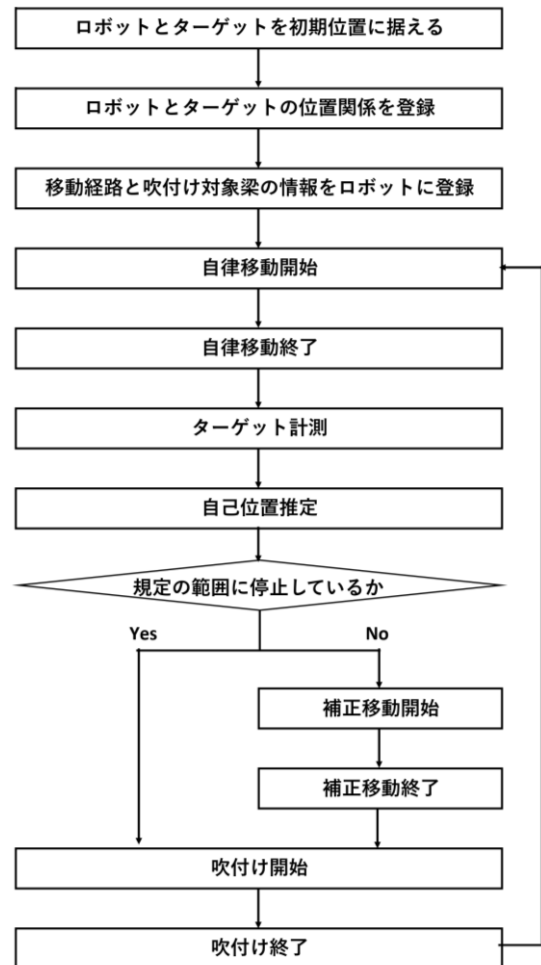


Fig. 4 自律移動機能の作業フロー
Autonomous Mobility Function Flow

位置・相対角度を計測して、吹付け軌道を修正する機能を開発することで、吹付け品質を向上させる計画とした。

2.2 自律移動機能の改良

ターゲットを自動認識できなかった主な要因は、屋内の開発環境(Fig. 5)と建設現場の作業環境(Fig. 6)に大きな差異があったことである。例えば、屋内の開発環境では光源が一定であったが、作業環境では天候(快晴と曇りなど)や時間帯で明るさが大きく変化した。照明などの光源の位置の違いや明るさの変化を想定した上で開発を行ったが、作業環境では、明るさの変化が度々想定を超えた。そこで、実際の作業環境において様々な条件(天候、時間帯など)でターゲットを撮影した画像データを収集し、これらを分析して画像処理の閾値を調整することで自動認識率の安定性の向上を図った。

2.3 梁認識機能の搭載

吹付けに使用しているロボットアームの先端にレーザー距離計を取付け、ロボットアーム・横行軸・昇降軸をFig. 7のように移動させながら梁までの距離を計測することで、梁とロボットとの相対位置(Δy , Δz)と相対角度(ΔRx , ΔRy , ΔRz)を算出し、吹付け軌道を修正する機能を搭載した。梁認識機能で算出した値から、ロボットの吹付け軌道を修正することにより、梁とロボットとの相対位置・相対角度に関して設計値通りの吹付け品質が得られる。梁認識機能実装後の検証実験では、ロボットを数パターンの相対位置・相対角度で停止させ、梁認識機能によって算出した値が停止位置と概ね一致したことを確認した。

3. 超高層複合施設工事への適用

3.1 適用工事の概要

工事概要をTable 1に示す。対象の建物は地上31階建ての複合施設である。

低層階は商業施設等であり、事務所エリアの基準階は8～30階である。被覆厚さと耐火時間については、17階までが60mm(3時間耐火)、18～27階が45mm(2時間耐火)、28階以上が25mm(1時間耐火)であった。

3.2 適用計画

3.2.1 ロボットの施工対象 ロボットを8階から26階の偶数階に適用した。対象階は、3時間耐火と2時間耐火仕様である。各階におけるロボット施工の対象エリアをFig. 8に示す。吹付け対象については、エリア内の小梁と大梁とし、同図のように基準階の事務所エリアの一部をロボットの適用範囲とした。適用範囲の床面積は1階あたり約400m²とした。

3.2.2 施工体制 施工体制はロボット1台、ロボットオペレータ1名、相番の清掃員1名とした。ロボットオペレータは、吹付け作業中のエラーや不測の事態への対



Fig. 5 開発環境
Indoor Environment during Development



Fig. 6 作業環境
Spraying Work Environment

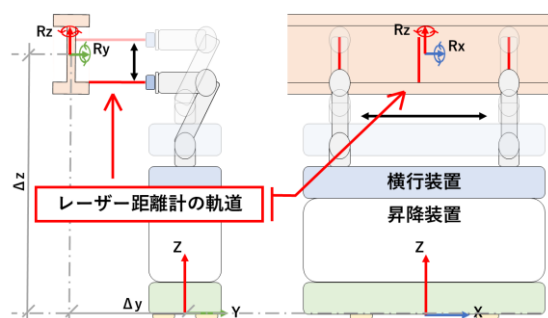


Fig. 7 梁認識機能の概要
Outline of Beam Recognition Measurement

Table 1 工事概要
Outline of Construction

建物階数	31階
建物用途	事務所, 商業施設
ロボット施工エリア床面積	400 m ² / 階
ロボット施工対象階 (耐火時間)	8～16の偶数階 (3時間耐火) 18～26の偶数階 (2時間耐火)

応と、作業エリアでターゲットが置けないなど高機能化を実施できない箇所ではロボットの移動を行う計画とした。事務所エリアは天井内チャンバーの区画であるため、耐火被覆材の吹付け後にコテ押さえを行い、スラリー吹付けが必要になる。全体の作業性を考慮してFig. 9のようにロボットの吹付け後、耐火被覆工が補修吹付け・スラリー吹付けを行うフローで計画した。

3.2.3 配置計画 吹付け施工時のロボットの配置計画の一例をFig. 10に示す。施工対象が小梁の場合は、吹付け領域を7.2mスパンの材軸方向に2分割し、梁の裏表の両面の計4箇所にて吹付けた。いずれの梁も、梁芯から平行にオフセットした線上にロボットを配置し、梁の材軸方向に横行装置でロボットアームを移動させて、梁へ効率良く吹付けた。高機能化を行った際のロボットやターゲットの配置および移動経路の一例をFig. 11に示す。ターゲットはロボットの隣のスパンに配置し、間隔はおおよそ3スパンに一つとした。

3.2.4 施工実績データの収集 自律移動機能の停止精度については、移動後（以下、補正移動前）と補正移動後の停止位置（ロボットの中心）を計測する計画とした。また、ターゲットの自動認識率の安定性については、自動認識の成功・失敗の回数を記録した。梁認識機能の品質については、吹付けの出来形をレーザースキャナーにより計測し、吹付け軌道の修正の有無で結果を比較した。梁認識機能で算出した相対位置・相対角度についても記録した。また、高機能化を有効にした場合、自律移動機能のターゲット計測や梁認識機能の梁計測のフローが入ることによって、Fig. 9の上から2番目の吹付け位置までの移動時間が長くなることが予想されたため、単位時間あたりの生産性を記録する計画とした。さらに、夏場の施工が長かったため、高温化による機械トラブルについても注視した。

4. 適用結果

4.1 施工品質

ロボットによる吹付け厚さを確認したところ、ロックウール工業会の施工管理基準値を満足することを確認した。

吹付けロックウールの比重は、ロックウール工業会の施工管理基準値である0.28以上となるよう調整して施工した。測定結果はいずれも0.29～0.30となり、施工管理基準値を上回った。

4.2 自律移動機能の停止誤差

補正移動前後の停止誤差値をFig. 12, Table 2に示す。xとyの誤差値を比較すると、x方向の標準偏差が大きいことがわかる。これは、走行装置に取付けたメカナムホイールの向きに起因していると推察した。メカナムホイールは、4つのホイールを同一方向に回転させて移動する走行（Fig. 7のy軸）方向と前後のホイールを逆方向に

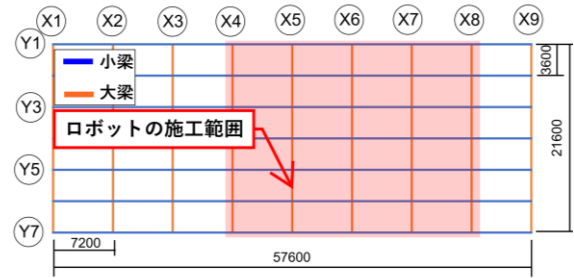


Fig. 8 施工対象エリア（基準階平面）
Sprayed Area by Robot

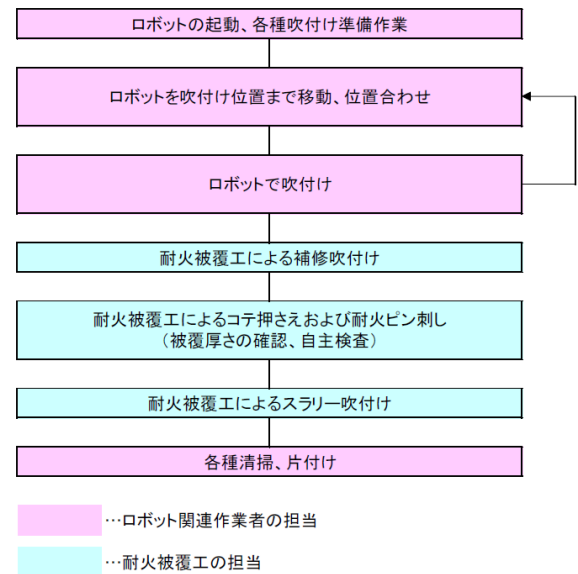


Fig. 9 ロボット施工のフロー
Spraying Flow Using Robot

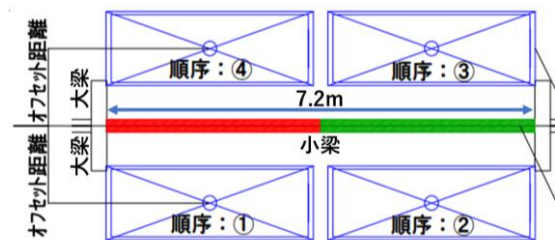


Fig. 10 小梁の吹付けにおけるロボットの配置
Layout of Robot during Spraying Beam

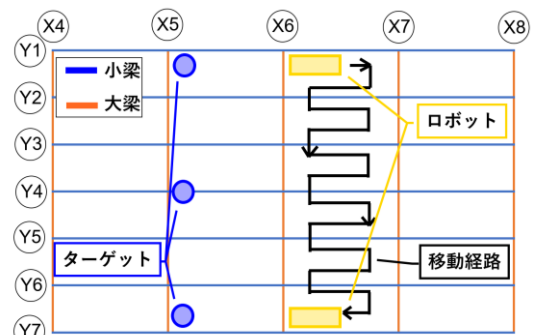


Fig. 11 ロボットとターゲット位置及び移動経路
Robot and Target Position and Movement Path

回転させて移動する横行 (Fig. 7のx軸) 方向で異なる動きをする。粉塵や雨水の影響等がある作業環境ではホイールが滑ってしまい、特に横行 (x軸) 方向では、想定した (移動時に登録した) 停止位置まで移動できなかったと考えられる。

ターゲットの自動認識について、計測ユニットで撮影した画像を分析し、再設定した画像処理の閾値で光環境の変化に対応できたことを確認した。これにより自動認識できないことがなくなり、安定性が向上したことを確認した。

4.3 梁認識機能の有無による吹付け品質への影響

梁認識機能の計測結果をTable 3に示す。補正移動後のロボットの停止位置の誤差 (Δy) は平均値-0.3mm、標準偏差2.1mmであったが、梁認識機能で算出した梁とロボットとの相対誤差 (Δy) は平均値5.0mm、標準偏差23.8mmであり、自己位置推定結果より大きな誤差が生じる結果となった⁵⁾。この要因の一例として、スラブの微小な不陸によって、ロボットが傾斜した状態で昇降するので、計測誤差が生じたと考えられる。このように梁やスラブの施工誤差によって自己位置の推定結果と差異が生じたと考えられる。

梁認識機能の有無による吹付け品質への影響について分析するため、レーザースキャナーでスキャンした点群データを活用した (Fig. 13)。吹付け角度の誤差の影響が特に大きな上フランジ下端 (入隅) に対する比較結果を Fig. 14に示す。同図から、梁認識機能を有効にした場合、被覆厚の平均値が若干高くなり、規定厚さ未満の領域の度数が減った。これは吹付け軌道を設計値通りに補正したことにより、規定厚さ以上の領域の度数が増加したためだと考えられる。なお、ロボットによる吹付けで規定厚さを下回った箇所については、耐火被覆工による補修吹付けを行った。

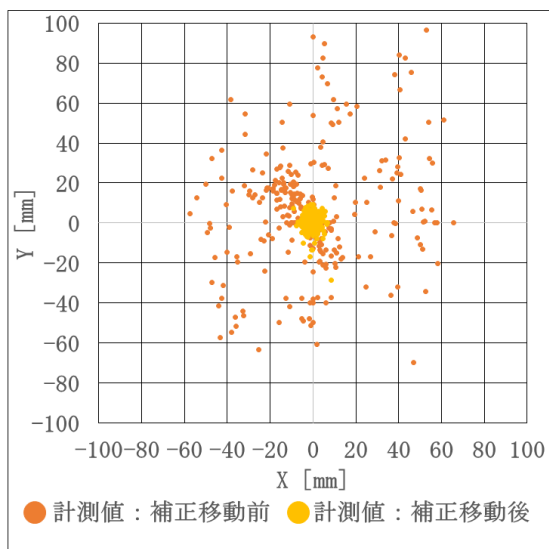


Fig. 12 補正移動前後の停止位置
Robot Position before and after Correction

Table 2 補正移動前後の誤差値
Movement Error before and after Correction

補正移動前 (mm)	Δx	Δy	ΔRz
平均値	2.9	-0.4	0.0
標準偏差	24.2	19.2	0.3
補正移動後 (mm)	Δx	Δy	ΔRz
平均値	-0.1	-0.3	0.0
標準偏差	3.2	2.1	0.0

Table 3 梁とロボットの相対誤差値
Relative Error Beam and Robot

計測結果 (mm)	Δy	Δz	ΔRx	ΔRy	ΔRz
平均値	5.0	-14.6	0.1	0.0	-0.2
標準偏差	23.8	9.6	7.7	1.1	1.2

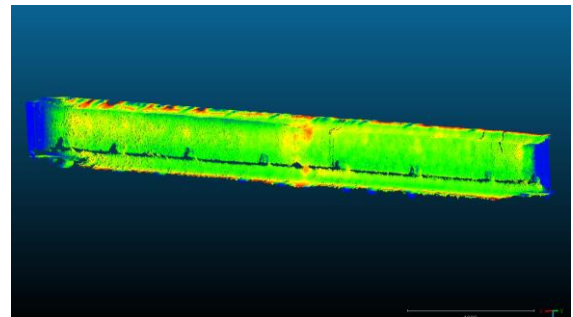


Fig. 13 吹付け後の点群データ (小梁)
Point Cloud Data after Bram Spraying

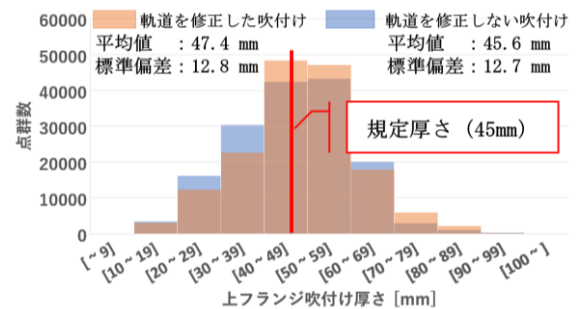


Fig. 14 吹付け厚さの比較
Comparison of Spraying Thickness

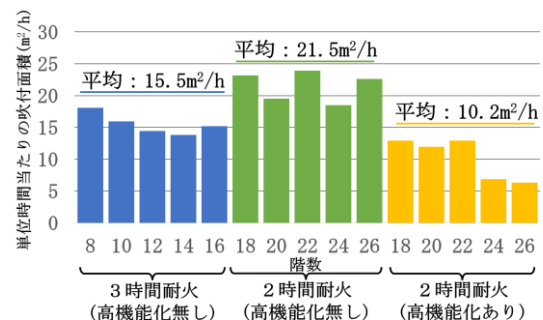


Fig. 15 各階の生産性の推移
Transition of Productivity Per Floor

4.4 生産性

Fig. 15に各階における吹付け作業の生産性を高機能化の有無別にまとめた。なお、高機能化無しについては、3時間耐火の生産性も分析した。3時間耐火において、高機能化を無効にしたロボットの生産性は各階の平均で約15.5m²/hとなり、耐火被覆工に対して約35%の生産性向上効果を得た。また、2時間耐火において、高機能化を無効にしたロボットの生産性は各階の平均で約21.5m²/hであり、同約50%の生産性向上効果を得た。2時間耐火の方が被覆厚さは薄いので、吹付けの所要時間が短く、生産性は向上する傾向にある。一方、2時間耐火において、高機能化を有効にしたロボットの生産性は各階の平均で約10.2m²/hとなり、耐火被覆工の約70%の生産性にとどまった。これは、自律移動機能のターゲット計測と梁認識機能の梁計測で吹付けをしていない時間が増加したためだと考えられる。

高機能化を実施すると生産性が低下するが、ロボットが自律的に施工を継続できるため、ロボットオペレータの作業手間が軽減し、省力化となる。そのため、ロボットオペレータ1名に対して、ロボットを複数台適用することが可能となり、ロボットオペレーター一人あたりの生産能力は向上し、耐火被覆工の生産性を上回ることができると推察された。例えば、ロボットを2台運用した場合、1台あたりの生産性は耐火被覆工の70%程度のため、2台合わせると耐火被覆工の約1.4倍の生産能力を得られる見込みとなる。また、梁認識機能による吹付けの品質の向上効果が期待できる。

夏場の技能工の生産性は、それ以外の時期に対して、1～2割低下する傾向にある。今回の現場適用では、夏場の施工が長かったため、高温化によるトラブルが懸念されたが、ロボットの生産性の低下は見られず、ロボット施工の安定性が示された。

5. まとめ

耐火被覆吹付けロボット2号機について、ターゲットの自動認識率の安定性の向上と梁認識機能の開発を行い、超高層複合施設工事に適用してその効果を確認した。自律移動機能の改良については、ターゲットの自動認識率の安定性の向上効果を確認し、梁認識機能の開発については、吹付け品質が改善・安定化するなど品質面の向上効果を得た。高機能化を実施した場合、吹付け作業の前に専用のターゲットや吹付け対象の梁の計測を行うため、生産性は耐火被覆工に対して約70%まで低下した。一方、高機能化を実施することでロボットオペレータの作業手間が軽減され、ロボットを複数台運用することが容易になる。また、ロボットを複数台運用することで、生産能力は耐火被覆工より高まる見込みが得られた。

参考文献

- 1) 松田陸，吉田武史他：耐火被覆吹付け工場のロボット化に関する研究（その1～その3），日本建築学会2025年度大会（九州）学術講演梗概集， pp.1405-1410， 2025.09
- 2) 上田航平，池田雄一：耐火被覆吹付けロボットの開発と現場適用，第24回建築の自動化技術シンポジウム，2024.03
- 3) 上田航平，瀬川紘史他：耐火被覆吹付け作業の自動化に関する研究（その 8,その 9），日本建築学会2024 年度大会（関東）学術講演梗概集， pp.1145-1148， 2024.08
- 4) 瀬川紘史，上田航平他：耐火被覆吹付けロボット2号機の開発と超高層ビル工事への適用，大林組技術研究所報， No.88， 2024
- 5) 上田航平，坂上肇他：耐火被覆吹付けロボットの開発，第23回建設ロボットシンポジウム，2025.10