

報告

無人航空機(ドローン)を活用した構造物へのコンクリート表面 含浸材塗布の省力化検証

二村 憲太郎^{*1}, 井上 靖雄^{*1}, 川前 勝三郎^{*1}, 伊代田 岳史^{*2}, 長谷川 忠大^{*3}

Labor-saving Verification of Application of Using Unmanned Aerial Vehicles (Drone) to Concrete Surface Penetrants Material on Structures.

Kentaro NIMURA^{*1}, Yasuo INOUE^{*1}, Katsusaburo KAWAMAE^{*1}, Takeshi IYODA^{*2} and Tadahiro HASEGAWA^{*3}

要旨: コンクリート構造物における高所でのインフラ維持管理業務の補修工事について無人航空機の適用による施工の可能性を検証するため、筆者らはケイ酸塩系含浸材のドローンによる吹付け実験を実施し、適用可能であることを明らかにした。今回、この検証の際に生じた飛行性能の向上および吹付けムラ等の課題の改善・改良を図り、一定の成果を得られたのでここに報告する。

キーワード: ドローン、省力化、ケイ酸塩系含浸材、予防保全、コンクリート構造物

1. はじめに

1.1 日本の現状と維持管理の問題

わが国ではインフラの老朽化が進み、多大な経済的損失が試算されており、近年になり橋梁崩壊等人的被害も顕在化している。また、労働力人口の減少も深刻な問題となっており、政府は建設産業の生産性向上によりこれら課題の打開を画策しており、生産性20%の向上を目標として掲げ、イノベーションによる人材不足の解消や維持管理コストの増加を抑制しようと試みている。そのひとつの手段としてドローン等ロボットの活用による生産性向上を提言している¹⁾。

1.2 ドローン技術と建設産業への展開

一方、無人航空機(Unmanned Aerial Vehicle, UAV以下、ドローン)の技術革新は、民生利用のほか、従来のラジコン技術にリチウム系バッテリーの小型・高密度化や衛星による測位技術の進歩と利活用、自律性を含めた制御装置の小型・高性能化に拠る。ドローンの建設産業への活用については、ドローンによる航空測量技術や、前述のインフラ老朽化対策としてドローンの画像・映像撮影技術を活用した点検業務が進められている。しかし、航空測量や橋梁等点検のみのドローン活用では生産性向上や人材不足解消となるには効果が薄いことは否めず、もう一歩進めた補修までを包括した技術が必要とされることが予想される。この補修まで含めた技術が実現した場合、高所での危険かつ苦渋な作業やそのための仮設備のコストの解消が期待できる。このような背

景から、筆者らはドローンによる補修までの適用可能性を検証し、足場を不要とすることで期待できる生産性の向上や人材不足の解消、さらには高所作業を不要とすることによる墜落災害の防止など建設業の抱える問題解決の一助とする目的で開発している²⁾。本論ではこれまでの開発経緯と判明した課題、その解決方法等を記す。

2. 初期段階での吹付けドローンの開発と概要

実験機は橋梁点検用の機体をベースに、ポンプユニットを搭載したものを使用した。機体の外観を図-1、機体の概要図を図-2, 3 および機体の諸元を表-1に示す。

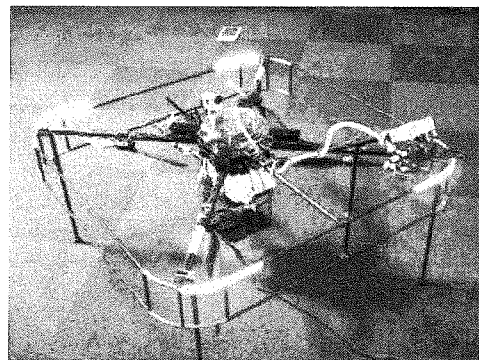


図-1 外観(前視)

*1 西武建設(株) 土木事業部エンジニアリング部

*2 芝浦工業大学工学部土木工学科 教授

*3 芝浦工業大学工学部電気工学科 教授

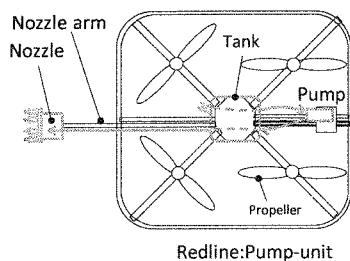


図-2 概要図（平面図）

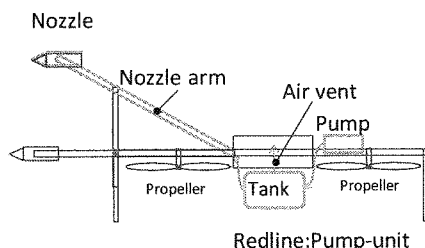


図-3 概要図（立面図）

表-1 諸元表 実験機（1号機）

【機体】●形状：クアッドタイプ ●ベース機体：ZionPG700 ●全装備重量：最大 7.5kg ●搭載量：4kg（機体重量 3.5kg） ●機体サイズ：987.85mm×987.85mm×高さ 500mm ●プロペラ径：φ457.2mm ●飛行時間：30 分（最大 45 分） ●姿勢安定制御：高さは気圧検知式 ●給電方式：有線給電（地上バッテリー型）350W×2 台

【ポンプユニット】●機体搭載型 ●DC24V 仕様 ●ノズル部：●吐出量：1.6ℓ/min（4 ノズル時）, 1.2ℓ/min（2 ノズル時） ●重量：約 1kg ●搭載タンク容量：2kg ●ノズルと機体（ガードフレーム）との離隔 300～350mm，機体頂部との高さの差 0～400mm

【ノズル部】●ノズル先端を回すことでミスト～水流まで調整可能、1～4 ノズルまで選択可能 ●機体前後方向への傾きに自動追従するチルト機能，●ノズル上下操作機能

【その他】●機器類防滴殻，●機載カメラ（小型デジタルビデオカメラ），映像伝送装置およびモニター

【適用環境】●風速：平均 2.0m/s かつ最大 4.0m/s 以下，降雨：不可，最高高度 15m，照度：75lx 以上，必要離陸スペース：10m² 以上かつ水平および大型金属がない（敷鉄板等は不可）が条件。

実験機は吹付け材料を機体下部の着脱式タンクに搭載し、バッテリーは地上配置とし有線給電とした。飛行操縦はパイロット1名によるものとし、人工衛星から発する電波の受信が困難な環境（以下、非 GNSS 環境、GNSS: Global Navigation Satellite System）を想定し高度管理用気圧センサのみ稼動した状態とした。これは、飛行高度は一定に保持できるが、水平方向は風により変動してしまう状態での飛行となるため、パイロットの技量に依存した高度な飛行技

術を要する。そのためパイロットのトレーニングや種々の検証をするための実験場を建設した（図-4）。開発経緯，実証実験に要した期間等を表-2 に示す。実験機（1号機）初期実験に使用したトンネル内での実験状況を図-5 に示す。

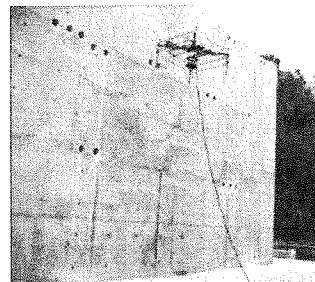


図-4 専用実験場

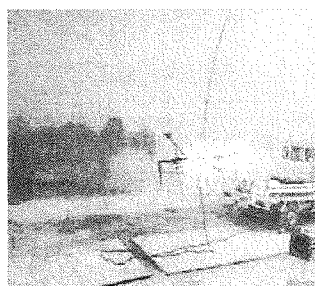


図-5 トンネル内実験

表-2 経緯と適用事例

実施期間	開発経緯	実験に要した時間	備考
2015. 8	吹付けドローンプロジェクト始動	—	
2015.11	実験機(1号機)完成	開発(3ヶ月)	
2015.12	飛行実験	3日で計180吹付け	神奈川県内トンネル
2016. 6	測域センサ, LED搭載	開発(3ヶ月)	機体と対象の距離の見える化技術
2016.11	専用実験場建設	建設1ヶ月	6m(H)*10m(W)壁
2017. 3	工事として吹付け実施	3日で計160吹付け	福島特区トンネル
2017. 3	実験機(2号機)完成	開発(4ヶ月)	バッテリー搭載型

3. 吹付けドローン開発の問題点

3.1 非 GNSS 環境下での操縦性の課題

ドローンは衛星による測位技術（GNSS・RTK，RTK: Real Time Kinematic）を活用し，プログラミングを施すことで自律航行も可能となる。しかし，吹付け施工の場合は，構造物へ接近して作業することから，この GNSS が活用できない環境が多く想定される。そのため非 GNSS 環境下での安定飛行性の確保が必要となる。なお，現在の技術では実用的な非 GNSS 環境下での安定飛行は技術的に困難であるが，数年中に実用化されると想定されている。

3.2 品質面の課題

ドローンはその機構上プロペラにより気流を発生させることで揚力を得て飛行する。そのため吹付け材料をミスト状に吹付けた場合，機体へ吹き掛かる

現象（以下、リバウンド）が生じる。この課題を解消するにはミストの粒子を拡大し水流状にする必要があるが、水流状では吹付けムラが顕著に生じ、これが表面塗布の品質面に大きく影響する。また、コンクリート面に設計量以上を一樣に吹付けるためには多量の吹付け材料を要する。初期実験では設計量の3～5倍の使用量を要した。このため、ノズル部分の改良が必要となる。また、無色材料を吹付けた場合、吹付けムラが明確に判明できないといった課題も生じた。

4. 操作性および吹付けムラの改善

4.1 測域センサによる非GNSS環境下操縦性向上

操縦性を向上させるためのひとつの方法として、測域センサを機体に搭載しLEDにより対象構造物との距離を表示させることとした。この表示により距離をパイロットの目測から瞬間的に判断できる色覚に変更することで視認性を向上させ、最適吹付け距離での施工を目的とした。測域センサは2D Laser Range Finder(Smart-URG)を採用し、小型コンピュータ Raspberry Pi 3により制御をした。取り付けは重量バランスを考慮し、機体中央部よりステイによる吊り下げ式とした。搭載重量はステイと合わせて566gである。取り付けた状態を図-6および構成概要を図-7に示す。

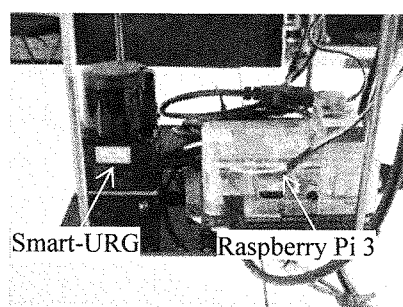


図-6 センサ取り付け状況

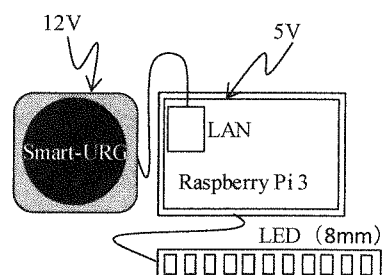
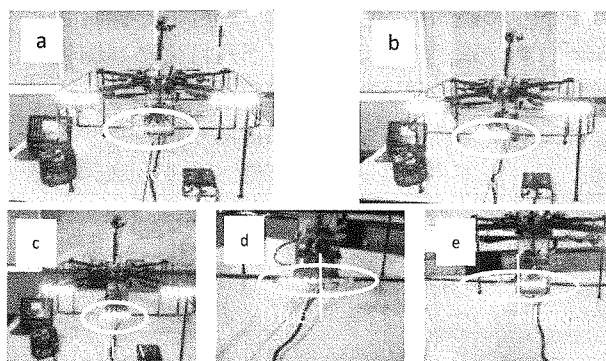


図-7 構成概要図

センサによる距離計測結果はLEDにより表示する。LEDはIC内蔵タイプとし、点灯方法を設定で

きる。点灯パターンを図-8に示す。



【凡例】

- a.<0.75m(赤)
- b.吹付け適正レンジ(緑)
- c.>2.25m(黄)
- d.左に5°以上旋回 (左側に青)
- e.右に5°以上旋回 (右側に青)

※ 数値はノズルから対象の距離

図-8 センサ感知距離と識別色

4.2 吹付けムラ可視判定のための着色材料の適用

コンクリート表面含浸材の多くは無色透明であり、吹付け後浸透し痕跡が残らない。そのため吹付けムラの判別が困難であった。そこで今回青色顔料で着色したコンクリート表面含浸材を使用した。この着色含浸材は紫外線により脱色される特性を持つ。なお、このコンクリート表面含浸材は2液混合型ケイ酸塩系である(表-3)。

表-3 吹付け使用表面含浸材データ

含浸材名	色	備考
A	無し	1回塗り規定量 $0.25\text{kg}/\text{m}^2$ (ターゲット1箇所あたり塗布量0.2g)
A 着色タイプ	青色	同上 紫外線吸収により無色化

4.3 ノズル部分の改良

吹付けムラ対策として、ノズルと機体の連動性(以下、チルト機能)およびノズル可動機能を付与した。チルト機能は、機体の前後移動に際してノズルの向きは一定とする(図-9)。

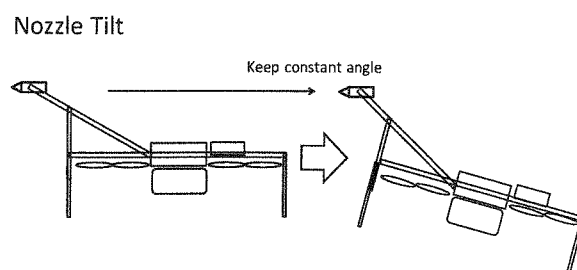


図-9 ノズルチルト機能

チルト機能は壁との離隔調整時に生じていたノズルの上下への跳ね上がり（跳ね下がり）を抑制する動作を目的に機能を追加した。これは姿勢制御装置と連動しているため人為的操作は必要としない。

ノズル可動機能は、ノズル部に取り付けたサーボ機構により上下方向を任意に可動させる。機体の高度調整に要する操作を補完する機能である（図-10）。

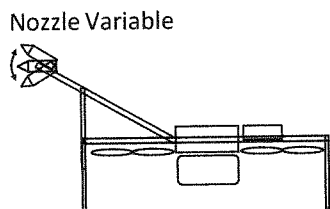


図-10 ノズル可動機能

5 測域センサの効果実証実験

5.1 トンネル側壁での実験

測域センサおよび着色した表面含浸材の効果を福島県南相馬市県道 49 号赤根トンネル(延長 94m, 幅員 8.3m, 高さ 6.0m, S.53 年竣工)において検証した。塗布状況を図-11 および 12 に示す。

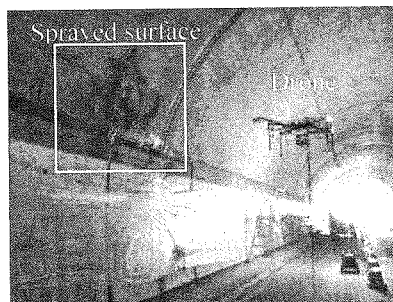


図-11 吹付け状況

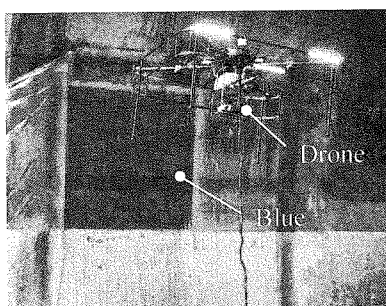


図-12 吹付け状況(着色)

5.2 測域センサの効果検証

覆工コンクリート内側の高さ 2.2m 位置より、幅 3m×高さ 1m に吹付け範囲を設定し、フェルトで作成した吸水材(20mm×20mm)を図-13 に示すように貼り付けターゲットとした。トンネル坑内に同形状のエリアをⅠ～Ⅵの 6 箇所区分けした（図-14）。測

域センサは最適吹付け距離をノズル先端から 1.5m に設定し、その前後 0.75m を許容レンジとした。機体水平角度の許容レンジは左右に 5° とした。図-13 に示す②から矢印方向へターゲットに吹付けながら移動し、①まで飛行した後、ターゲットを撤去し付着重量を計測した。1 回の飛行での噴射量は約 2kg である。エリアとセンサの使用、不使用およびトンネル内の風速を表-4 に示す。センサは吹付け最適レンジ（緑）および接近時（赤）では最大噴射状態とし、それ以外（黄および青）では噴射なし、もしくは噴射量を半分に削減するスイッチ操作をした。なお、図-4 に示す矢印通りの飛行は風やパイロットの技量、心的疲労などの影響から実際には困難である。

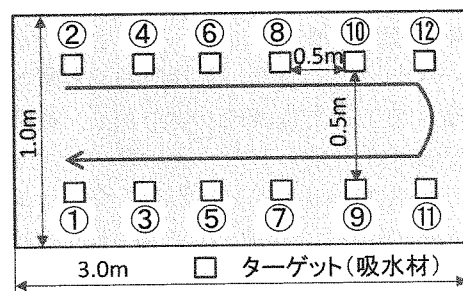


図-13 吹付け範囲と吸水材配置

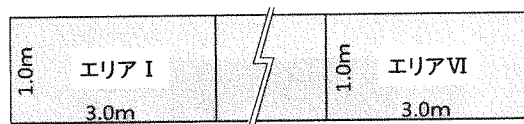


図-14 エリア区分け（Ⅰ～Ⅵ）

表-4 吹付け時坑内風速データ

エリア№		I	II	III	IV	V	VI
時間		14:31	14:14	13:56	13:32	13:12	11:38
測域 センサ	不使 用	○	○	-	-	○	-
	使用	-	-	○	○	-	○
トンネル 内風 速 (m/s)	最大	2.1	2.5	2.1	4.1	3.3	1.9
	平均	0.6	0.6	0.8	2.8	0.4	0.8

(1) 測域センサ適用結果および考察

各ターゲットの重量分布を図-15 および 16 に示す。図-15 のセンサ使用時の最低塗布量は 0.2g 以上を確保したが、図-16 のセンサ不使用時の最低塗布量は 0.2g 未満が散見された。このことからセンサ使用により飛行性能が向上しターゲットへの吹付け性能の向上が確認される。なお、エリアⅣは風速が最大 4m/s を超過したため除外した。

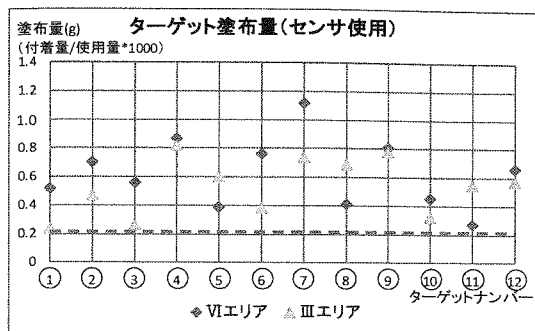


図-15 塗布量 (センサ使用時)

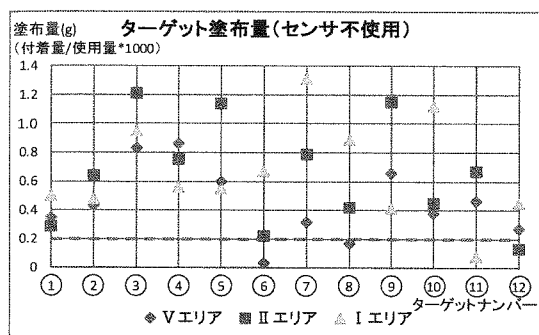


図-16 塗布量 (センサ不使用時)

(2) 測域センサ適用によるヒアリングと考察

センサの効果を確認するため、パイロットの疲労度の違いおよび飛行中にパイロットがどの視覚情報を得ながら飛行しているのかを把握する実験を実施した。実験場所は屋外実験壁とし、飛行環境は風速 0~2.6m/s、衛星測位を利用しない飛行とした。なお、被験者は飛行経験 3 年のベテランであり、事前に情報を与えていない。初めて吹付けドローンを飛行、吹付け作業をさせ、センサの効果等をアンケートにより確認した。パイロットの選考は高度な飛行技能を要するため被験者は 1 名となった。実験はパイロットにセンサ不使用状態で 3 回、30 分間の休憩を挟み、センサ使用状態で 3 回飛行させた。疲労度 (1~3 段階) を図-17 に示す。疲労度に関しては、センサ使用時のほうが若干低い値を示している。

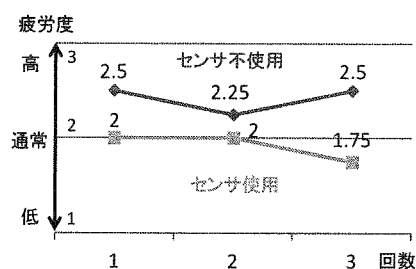


図-17 塗布材料 (着色)

次に視認位置の割合を図-18 に示す。視認位置の割合は、センサ LED 部分は 15% 程度しか見ていないが、吹付け部への注視が 2 倍程度増加している。

このことからセンサ LED で距離を測りながらターゲット位置を確認していると考えられる。

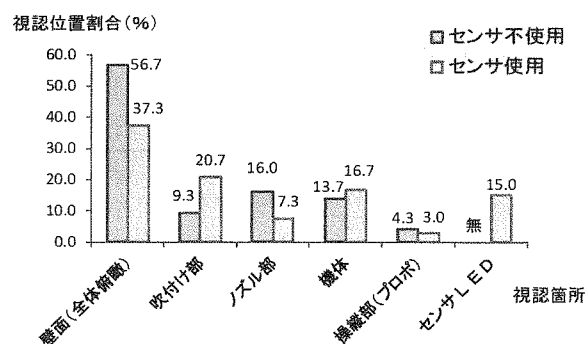


図-18 視認箇所と視認位置の割合

実験後、被験者にヒアリングを実施したところ、センサ使用時のほうが疲労感は軽く、操作に慣れるに従い LED 表示による視覚情報は反射的に操作に反映できるため機体が安定した。結果的に、余裕が生じた分吹付け部への注視が増えたという回答を得た。なお、今後パイロットを育成するとともにアンケートを随時実施しデータを収集する。

5.3 着色材料の適用結果および考察

コンクリート表面含浸材を塗布した状況を図-19 および 20 に示す。図-19 は標準無色タイプを吹付けた直後に撮影したものであり、コンクリート壁面に急速に浸透していることがわかる。図-20 は着色タイプを吹付けた直後に撮影したものである。青く着色されており、吹付け箇所が明確にわかる。なお、着色タイプは紫外線量の多い坑口付近に塗布し、およそ 1 週間程度でほぼ無色となった。



図-19 塗布材料 (無色)

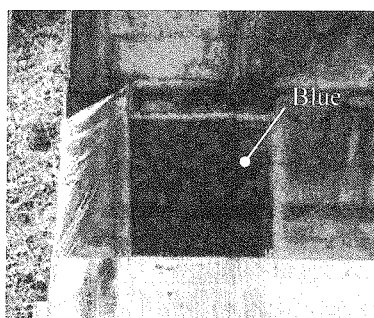


図-20 塗布材料 (着色)

5.4 ノズル部分改良の効果および考察

ノズルチルト機能の効果を確認した。実験壁との離隔をノズル先端から 1.5m とし、機体を着陸した状態から水を水流状に噴射させ、機体前部を 300mm 跳ね上げた。図-21 に示す。これは対象物に異常接近した時に操作する後退動作が、最も吹付け範囲外への無駄な塗布となることからこの動作を模した。跳ね上げ速度の設定はビデオ映像から判定し概ね 0.5 秒程度であったことから、1 回 0.5 秒として各 10 回連続して跳ね上げを繰り返した。壁に残った水流跡の頂部を着陸状態のノズルから高さ(H)を計測したところ、チルト機能無しの場合は 0.95m であった。一方チルト機能を作動させた場合は 0.60m であった。チルト機能により余分な範囲への吹付け量を減少させ、材料抑制に繋げることができると考えられる。

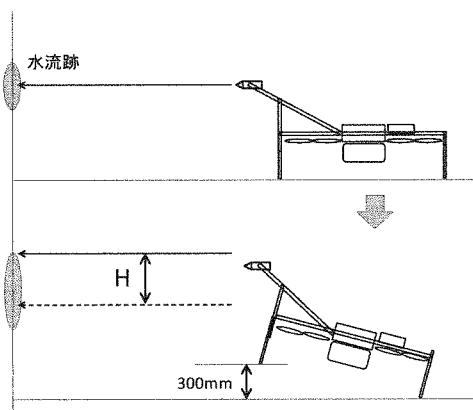


図-21 チルト機能効果確認実験概要図

ノズル可動機能の効果を検証するため、「5 測域センサの効果実証実験」においてトンネル内に設置したエリアⅠからⅥの範囲において、吹付けた際にターゲットの上列から下列もしくは下列から上列に機体を垂直に約 500mm 以上移動させた回数および時間とノズルを上下操作させ約 500mm 以上吹付け位置を移動させた回数および時間を映像から解析した。図-22 に結果を示す。

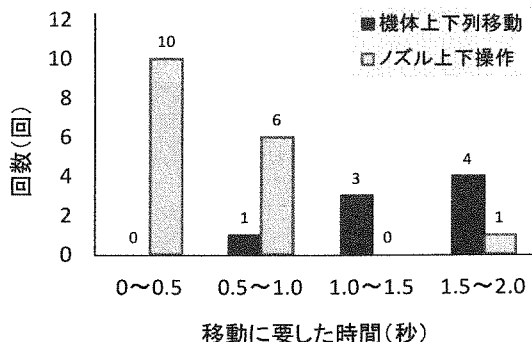


図-22 機体上下列移動とノズル上下操作回数および要した時間の比較

機体の上下列移動は概ね 1~2 秒間要するが、ノズル上下操作は大部分が 1 秒以下での移動であった。また、操作回数はノズル上下操作が 17 回、機体上下移動が 8 回とノズル上下操作のほうが多かった。このことから機体の高度を調整し移動させる操作よりもノズルを操作するほうが、短時間であるうえ操作が容易であると想定される。ただし、操作系統がひとつ増加するためパイロットの技量に依存する度合いは増すと考えられる。

6. まとめ

6.1 操作性の改善

測域センサの活用により、吹付けドローンの操作性の向上が確認された。具体的にはパイロットは LED からの視覚情報を容易かつ瞬時に取得できるようになることで操縦性が向上し、ターゲットへの命中性が向上した。これにより吹き残しや懸案であった過剰に要した使用塗布材料の低減や、パイロットへの負担を軽減する効果が期待できる。

6.2 吹付けムラの改善

着色の吹付け材料を使用することにより吹付けムラを明示することができ、ムラの生じやすいドローンによる吹付けには特に効果が高いと考える。さらなる改善としては、ノズル操作を分離する等パイロットへの負担を減らす工夫が必要となる。

6.3 今後の課題への取り組み

今後はノズルをターゲット方向への自動的に正対させる機能の付与、操縦性の改善、リバウンド対策、非 GNSS 環境下で半自律性を付与させるなど機体の性能向上を図る。また、コンクリート表面含浸材のみならず適用材料の拡大を検証する。一方、本来の目的である生産性向上のためのコストの削減効果の実証も併せて実験する。今後も安全かつ省力化につながるドローンによる吹付けシステムの構築に寄与する所存である。

謝辞

福島県南相馬市県道 49 号赤根トンネルをフィールドとしてご提供いただいた福島県ロボット産業推進室の皆様へ感謝します。

参考文献

- 1) 日本再興戦略 2016 内閣官房日本経済再生総合事務局 pp. 53-55, 2016. 6
- 2) 二村憲太郎, 井上靖雄, 伊代田岳史: 無人航空機(ドローン)による構造物への補修材等吹付け適用可能性の検証, 土木学会, 土木建設技術発表会概要集, No.245, pp. 27-30, 2016. 11