

屋内自律飛行ドローンによる床コンクリートひび割れ検査システム

Crack detection system of concrete slab floor by indoor-autonomous drones

高井 茂光*

Shigemitsu Takai

又市 麻梨子**

Mariko Mataichi

原 智紀***

Tomonori Hara

木村 仁治**

Yoshiharu Kimura

長井 智哉**

Tomoya Nagai

桜井 悦雄***

Etsuo Sakurai

要 約

床コンクリートひび割れ検査の省力化を図るため、デジタル一眼カメラを搭載した屋内自律飛行ドローンにより床面を分割・連続撮影し、得られた撮影画像からひび割れ検出を自動で行うシステムを構築した。本検査システムの検証を行った結果、非 GPS 環境下において開発したドローンが自動で飛行し撮影できること、また、撮影画像によるひび割れ検出およびひび割れ図の作製ができることを確認した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 開発の背景
- § 3. 検査システムの概要
- § 4. 検査システムの検証
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

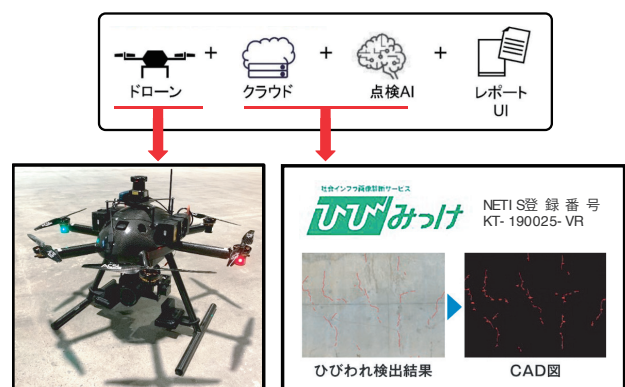
近年、建設業の就業者は減少傾向にあり、高齢化の進行が課題になっている。また、年間総労働時間が全産業平均と比較して 300 時間以上も多く、労働環境の改善も課題になっている。これらの課題に対し、建設現場の生産性を向上させることが求められ、省力化・自動化技術の開発ニーズが高まっている。そこで筆者らは、床面のコンクリートひび割れ検査に着目し、デジタル一眼カメラを搭載した屋内自律飛行ドローンにより床面を分割・連続撮影し、得られた撮影画像からひび割れ検出を自動で行うシステムを構築した。

§ 2. 開発の背景

コンクリートにひび割れが発生すると美観を損なうば

かりでなく、耐久性や機能性への影響が大きくなってしまふことが懸念されるため、ひび割れは初期段階からその幅や進行を把握することが重要となる。従来の床コンクリートひび割れ検査は、検査者の目視によるスケッチやクラックスケールにより検出が行われており、検査者の個人差などにより記入漏れや検出精度にバラツキが発生する可能性がある。また、大型物流倉庫などの床面積が広い建物の場合、これらの作業は多大な時間と手間が必要となるなどの課題が挙げられる。

一方、近年ではコンクリートのひび割れを検出する技術として、デジタル写真を対象に AI（人工知能）でひび割れを認識し、ひび割れ幅、長さを検出する画像解析技術が実用化されている。この技術はコンクリート構造物における補修等の必要性を確認するため、竣工時や引渡



図一 検査システムの構成

* 技術研究所技術戦略グループ

** 技術研究所建築技術グループ

*** 建築技術部

し後のひび割れ状況の把握に活用でき、目視による検出よりも精度が高く、品質が一定となることが期待できる。そこで、この技術を活用して床コンクリートひび割れ検査の省力化を図るためには、床面を効率よく分割撮影する技術が必要となり、その自動化ロボットの取り組みが行われている^{1,2)}。本論では、床面分割撮影にドローンを採用し、自動化を実現した屋内自律飛行技術、およびドローン空撮された撮影画像によるひび割れ検出結果について報告する。

§3. 検査システムの概要

3-1 検査システムの構成

開発した床コンクリートひび割れ検査システム（以下、本検査システムという）は、大型物流倉庫などの面積が広い床を自動で分割空撮するドローン（以下、本ドローンという）と自動で写真合成およびひび割れ検出できるクラウドサービス「ひびみつけ³⁾」（NETIS登録番号：KT-190025-VR）から構成されている（図-1）。本検査システムを構築するに当たり、画像取得の自動化を実現するため、デジタル一眼カメラを搭載して倉庫内を自動で飛行し、画像撮影を行うドローンを開発している。

3-2 開発ドローンの要件

(1) 検査作業

床コンクリート面ひび割れ検査は、竣工後からその幅や本数の進行を把握することが重要である。コンクリート打込み後の乾燥収縮に伴い、ひび割れ幅は拡大していく傾向にあり、また長期間使用されている倉庫は、新たなひび割れが発生するケースもあるため、記録すべき情報量に伴い必要な検査時間が増加することになる。検査結果は、ひび割れ図としてCADデータ上に記録・管理され、ひび割れの進行確認や補修作業必要有無の判断に用いられる。

(2) 飛行環境

大型物流倉庫などが調査対象であるため、飛行する空間はGPS信号が届かない屋内環境となり、GPS信号を前提とした従来の自律飛行は使用できない。また、検査で取得するデータは、0.1~0.2 mm程度のひび割れの幅を認識し、倉庫内のどの場所に発生しているかを記録する必要があるが、倉庫内の照度は、場所によってばらつきがあり、暗い環境の場合、100 lux以下も存在する。また、フロア内には柱や壁、扉が設置されている。倉庫によってそれらの設置場所は異なるが、設置物の有無や設置場所に関わらず全ての床面を検査する必要がある。従って、照度の変化やフロア内の設置物といった条件に依存せずに、最小幅0.1 mmのひび割れの検出ができることやフロア内の位置情報の記録ができることが求められる。

(3) ドローン性能

ドローンによる床コンクリートひび割れ検査は、デジタル一眼カメラを用いた撮影画像により実施する。求められる画像は、カメラの画素数とセンサーサイズ、レンズの焦点距離、床との離隔距離（ドローンの飛行高さ）によって決定された撮影範囲に対して、1画素当たりの大きさによって検出できる最小ひび割れ幅が決定される。これらのことから高解像度、高感度であるデジタル一眼カメラを選択する必要がある、カメラ本体とレンズを含め約1 kg以上の重量を搭載可能なペイロード性能が必要である。

また、床面との離隔距離を常に一定に保つ安定飛行性能が必要だが、市販されている一般的なドローンは、GPS電波が受信できる環境下で飛行させることを前提としている製品が多く、非GPS環境では安定した自律飛行は不可能である⁴⁾。そこで、約1 kg以上のペイロードの実現と合わせて、GPS信号に頼らず自己位置を推定し安定した自律飛行を実現できる飛行制御技術が必要である。

(4) 運用性

ドローンが飛行してカメラで画像取得を行う飛行経路は、倉庫の図面などから得られる寸法情報、画像の撮影範囲、飛行可能時間などによって決定される。実際の運用時には、想定外の現場環境になっているなどで、タイムリーに飛行経路を変更する必要性が生じてくるのが想定される。各条件から簡単に飛行経路が構築され、現場状況に応じて迅速に飛行経路を調整できる仕組みが求められる。ドローンが自律飛行している際は、バッテリー電圧や飛行位置などのテレメトリ情報の監視や、万が一の緊急時に停止や操作介入可能な安全機能も必須となる。

3-3 開発ドローンの仕様

画像解析技術を用いて床面の検査を自動で実施するためには、撮影に使用するデジタル一眼カメラの搭載、撮影パラメータ、床面からの離隔距離（ドローンの高度）

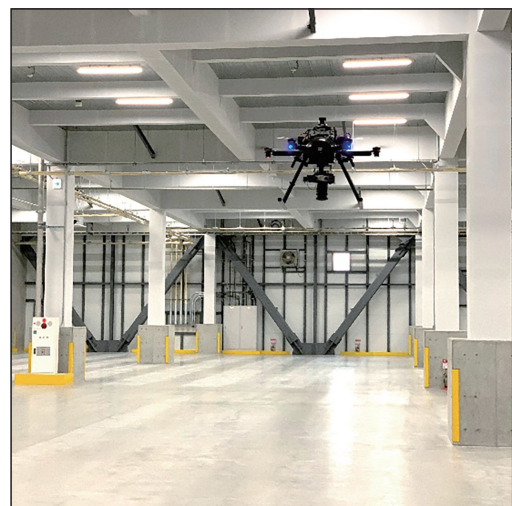


写真-1 開発したドローンの空撮状況

および撮影画像の重複率によって決定されるポイントで正確に撮影を行う必要がある。そのため、各条件によって予め定められたポイントへ正確に飛行し撮影させるために、1 kg 以上の重量を搭載可能なペイロード性能と倉庫内の非 GPS 環境でも自己位置を推定し自動での飛行が可能な飛行制御性能を持つドローンを開発した(写真-1)。倉庫内の環境は、一定間隔で柱が並んでおり、床面は平坦であることから、その環境に適した非 GPS 環境での自己位置推定技術を選択している。具体的には、水平方向の制御には LiDAR を使用し、柱や壁を検出しながら自己位置の推定と地図作成および飛行制御を行い、高度の制御には、ToF センサーを用いて床面からの距離を一定とする飛行制御を行っている。検査者のオペレーションミスなどを想定した安全機能として、周囲の柱や壁との衝突を防ぐために、LiDAR を用いた衝突回避機能も実装した。この飛行制御を用いることで、専用アプリで作成した検査飛行経路をドローンへ転送後、飛行開始指示を送るだけでドローンは自動的に撮影飛行を行うことができる(図-2)。本ドローンは自動で飛行するため、特別な操縦技術は不要となり、ドローン操縦に不慣れな検査者でも現場での運用を可能としている。また、撮影画像には、本ドローンの自己位置推定の情報から撮影位置情報を付与することが可能である。

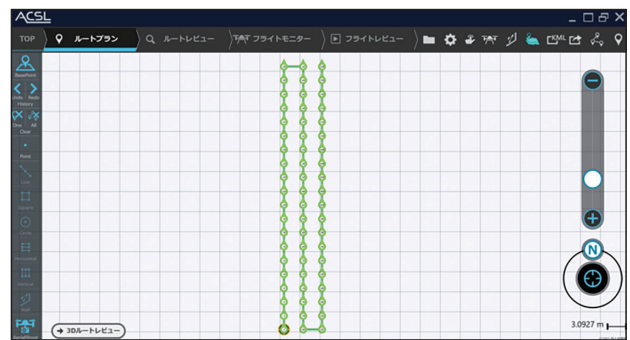


図-2 専用アプリで作成した飛行経路

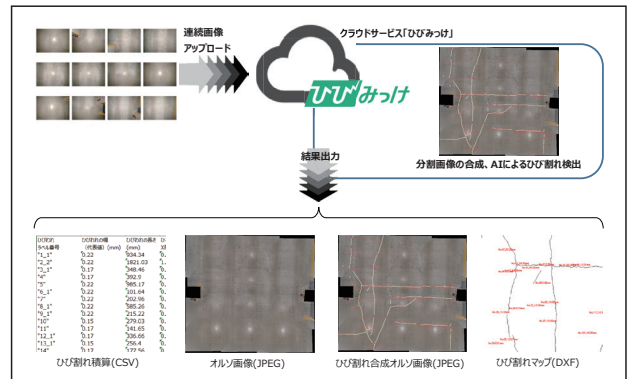


図-3 ひびみつけの概要

3-4 撮影画像からのひび割れ検出

従来の床コンクリートひび割れ検査の場合、外業として検査者の目視によるスケッチやクラックスケールにより検出が行われた後、内業にてひび割れマップを CAD オペレーターがスケッチをもとに手書きで CAD 作成を行っており、外業および内業に時間と手間がかかっていた。その課題解決策として、撮影された分割画像から AI 解析を用いて画像合成、ひび割れ検出および CAD 作成を行うことができる「ひびみつけ」(以下、本解析システムという)を活用することとした。

撮影画像からひび割れを検出できる本解析システムの活用により、床コンクリートひび割れ検査の外業をドローンによる自動撮影に、内業を本解析システムに置き換えることで時間と手間を大きく削減したうえ、検査者の個人差の影響を受けずに安定した精度での検査が可能となる。

本検査システムでは、求めるひび割れ幅を得られるように設定されたデジタル一眼カメラを用いて、設定した一定の離隔距離(高度)を保ちながらドローンにて自動撮影した画像を、クラウドサービスの本解析システムにアップロードし、分割画像の合成(以下、オルソ画像という)、AI 解析によるひび割れ検出を本解析システムにて行い、ひび割れ積算(CSV)、オルソ画像(JPEG)、ひび割れ合成オルソ画像(JPEG)、ひび割れマップ(DXF)の出力を行った(図-3)。

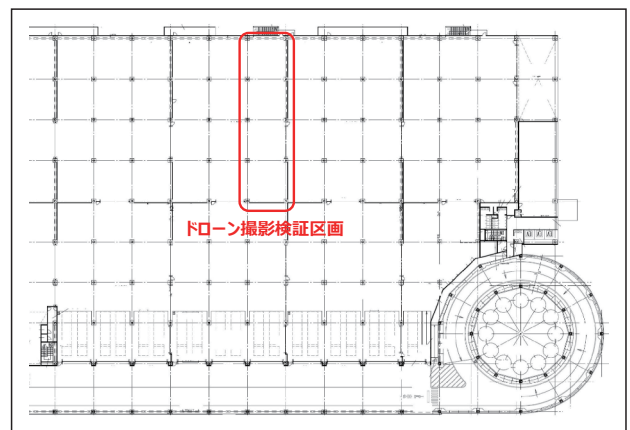


図-4 大型物流倉庫でのドローン撮影検証区画

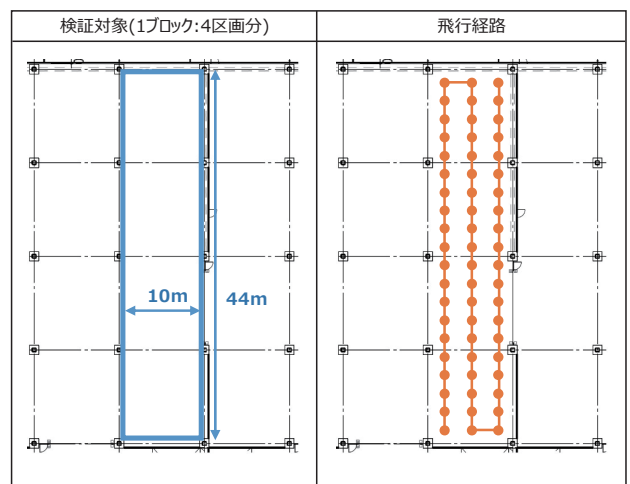


図-5 検証区画とドローン飛行経路

§ 4. 検査システムの検証

4-1 検証概要

大型物流倉庫において、本検査システムの検証を行った。今回の検証では、倉庫内の柱で囲まれた 10 m×11 m の区画について、連続した 4 区画を 1 ブロック (10 m×44 m) として検証範囲を設定し、1 ブロックあたり 1 フライトとなるようフライトプランを設定の上、自動撮影を行った (図-4)。

0.2 mm のひび割れを検出できるよう、デジタル一眼カメラの撮影パラメータおよびドローンの飛行高さを設定、1 ブロック当たり 60 枚の自動撮影を行うよう自律飛行設定し検証を行った。また、ドローンにより撮影した画像にて最小幅 0.1 mm のひび割れが検出できることの検証も合わせて行った。

4-2 検証結果

(1) 屋内自律飛行

GPS を用いた機体制御の代わりに採用した自己位置推定技術により、柱近傍では回り込むように、壁近傍では壁への距離を確保しながら飛行ルートを自律的に調整し、安定した一定高度で自律飛行ができることを確認した。今回の検証では 1 ブロックあたりのフライト時間は 20 分となり、本ドローンのバッテリー交換を行わずに 1 ブロック分の自律飛行および自動撮影が可能であることを確認した (図-5)。

(2) ドローン空撮の画像品質

大型物流倉庫内の環境は、外光の入り込まない暗所となっており、高感度のデジタル一眼カメラを用いたとしても撮影時にドローンが安定的に停止できない場合、ピント合致ができず画像品質の悪化により、ひび割れ検出ができないことが懸念される。

本ドローンの自己位置推定技術により、非 GPS 環境下でもフライトプランにて設定した撮影場所 (WP) へ飛行し一定時間機体を制止させ撮影することができ、外光が入り込まない暗所においても 0.1 mm のひび割れ幅が確認でき、ピントずれがない安定した画像が撮影できることを確認した (図-6)。

本ドローンにて取得した撮影画像を本解析システムへアップロードし、画像合成および AI 解析によるひび割れ検出を行い、オルソ画像、ひび割れ合成オルソ画像、ひび割れマップ CAD (DXF)、の出力が可能であることを確認した (図-7)。

通常、本解析システムでのひび割れ検出を行う場合、三脚などを用いてカメラを固定し、一定の撮影距離と一定の画像重複を確保しながら、ピントずれのないよう撮影することが必要である。非 GPS 環境下でのドローン撮影においてこの条件を満たす撮影は一般的にマニュアル操縦となり特別な操作技術を要する作業であったが、本ドローンを用いることで非 GPS 環境下でも安定して自律

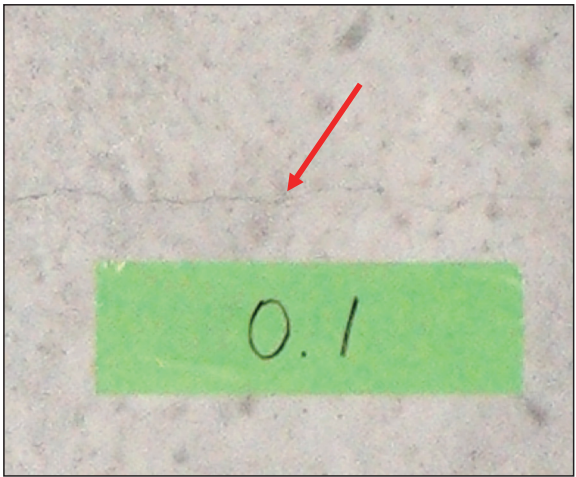


図-6 空撮画像のピント合致状況

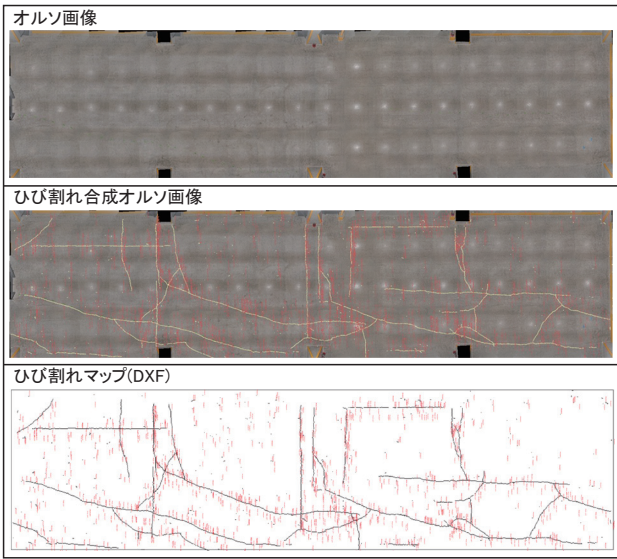


図-7 解析システムの検出結果例

ひび割れ積算(CSV)

	A	B	C	
1	ひびわれラベル	ひびわれの幅	ひびわれの長さ	ひびわれの面積
2	"0"	0.1	41.71	4.447
3	"1"	0.31	30.91	4.522
4	"2"	0.13	236.9	4.448
5	"3"	0.28	36.37	3.788
6	"4"	0.23	336	4.438
7	"5_1"	0.23	382.33	4.272
8	"5_2"	0.23	5.18	4.338
9	"6"	0.13	63.45	4.044
10	"7"	0.2	194.28	5.073



検出区画		440 m
検出したひび割れ本数		1,246 本
ひび割れ長	平均長	176.3 mm
	合計長	219,647 mm
ひび割れ幅	最大幅	0.75 mm
	最小幅	0.08 mm
	平均幅	0.226 mm

図-8 ひび割れ検出状況一覧

飛行による本解析システム撮影が可能であることを確認した。

(3) ひび割れ検出結果

検証範囲の1ブロック 440 m² のひび割れ検出状況は、本解析システムより出力されたひび割れ積算 CSV にて確認でき、集計した結果、検出されたひび割れ総長は約 22 m、検出したひび割れ本数は 1,246 本、検出した最大のひび割れ幅は 0.75 mm、最小のひび割れ幅は 0.08 mm となった(図-8)。

検証範囲内のひび割れについて、予めクラックスケールで目視検査したひび割れ幅実測値(以下、実測値という)と本検査システム検証結果との差異を確認した。代表的なひび割れのサンプリング確認としては、実測値 0.20 mm のひび割れは AI 解析にて 0.23 mm、実測値 0.35 mm のひび割れは AI 解析にて 0.36 mm、実測値 0.40 mm のひび割れは AI 解析にて 0.41 mm と認識され、結果として実測値と本解析システムによるひび割れ幅検出値との差異において、特段の大きな差はみられないことを確認した(図-9)。尚、今回 AI 解析によるひび割れ幅検出値は、連続したひび割れの平均的ひび割れ幅を結果として出力するよう設定している。実測値はその対象箇所をピンポイントに検出しており、検査方法の違いがひび割れ幅値の差異に表れている。

(4) ひび割れの最小検出幅

目視で確認した幅 0.1 mm のひび割れに対して、0.1 mm のひび割れ検出向けにカメラ撮影パラメータおよびドローンの飛行高さを調整し、本検査システムによる検出を行った。結果として飛行中に撮影した画像は 0.1 mm のひび割れが確認でき、AI 解析においても、0.1 mm のひび割れを検出することを確認した(図-10)。

(5) 検査システムの作業時間

今回の検証にて運用を踏まえた作業時間を計測した。1 ブロック当たりの作業時間はドローン準備を含めた外業作業で 40 分、内業作業である本解析システムでの結果出力作業時間は 40 分という結果となった(表-1)。尚、本解析システムによる AI 解析はクラウド上での処理となるため、作業者の作業時間として計上していない。今後、運用として外業部分の作業時間の短縮が必要であり、ドローン飛行の効率化により、1 フライト当たりの撮影範囲をできるだけ広くできるような飛行経路の検討が必要と考えている。

§ 5. まとめ

本検査システムの検証で、非 GPS 環境下において開発ドローンが自動で飛行し撮影できることや撮影画像によるひび割れ検出が可能であることを確認した。また、最小幅 0.1 mm のひび割れを検出できることを確認した。今後は弊社建設現場での活用を通じて改良を加え、検査業務の省力化・自動化を高めていく予定である。

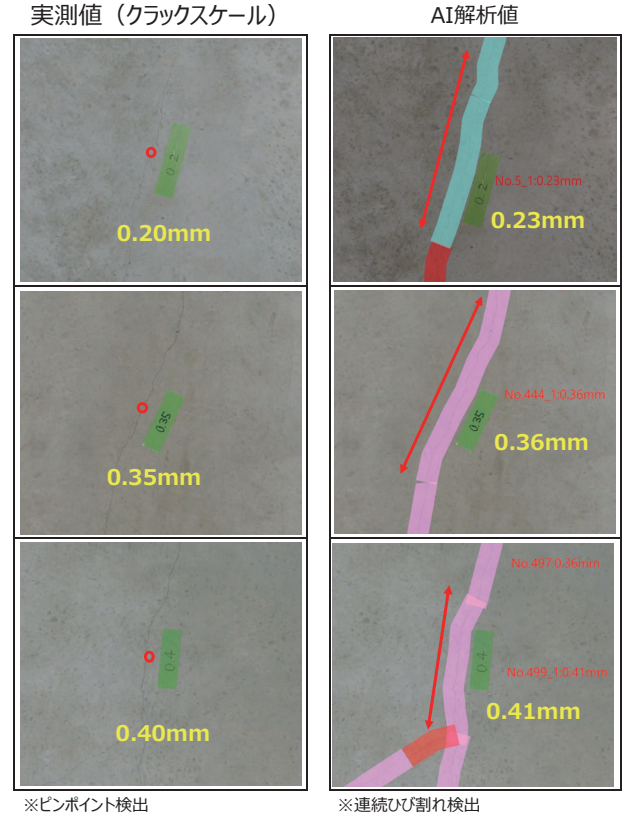


図-9 実測値と AI 解析値の比較

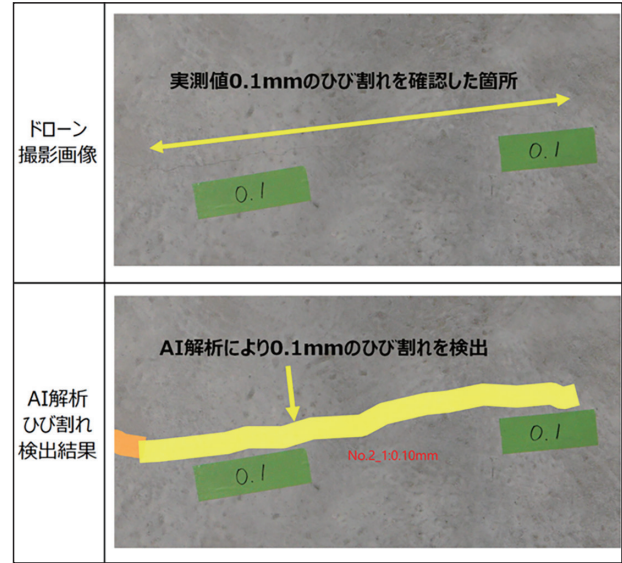


図-10 0.1 mm ひび割れの検出結果

表-1 検査システムの作業時間

区分	項目	内容	時間
外業	ドローン飛行準備	飛行範囲設定	15 分
	ドローン飛行撮影	ドローン自律飛行自動撮影	20 分
	次ブロック移動	次ブロックへの移動	5 分
	外業作業時間(1ブロック当たり)		40 分
内業		1m当たり作業時間	6 秒
		ひび長1m当たり作業時間	11 秒
	撮影画像品質確認	撮影画像の確認	20 分
	クラウドサービスアップロード	クラウドへアップロード	10 分
	AI解析	夜間処理にて行うため工数はかからない	0 分
	寸法設定	合成画像の寸法入力	5 分
	結果出力	クラウドサービスから結果出力、ダウンロード	5 分
	内業作業時間(1ブロック当たり)		40 分
		1m当たり作業時間	6 秒
		ひび長1m当たり作業時間	11 秒

※1秒以下端数は切り上げ

参考文献

- 1) 近藤祐輔ら：自動走行による床面コンクリートひびわれ検出ロボットの開発（その1）開発概要および検証実験，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）pp. 1249-1250, 2019. 9
- 2) 羽根田健ら：自律走行式ひび割れ検査ロボットの開発，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）pp. 873-874, 2020. 9
- 3) 富士フィルムウェブサイト：社会インフラ画像診断サービス「ひびみつけ」 <https://www.fujifilm.com/jp/ja/business/inspection/infraservice/hibimikke>
- 4) 野波健蔵：小型無人航空機の厳密・簡易なモデリングとモデルベース制御，計測と制御第56巻第1号 p. 3-9, 2017. 1