

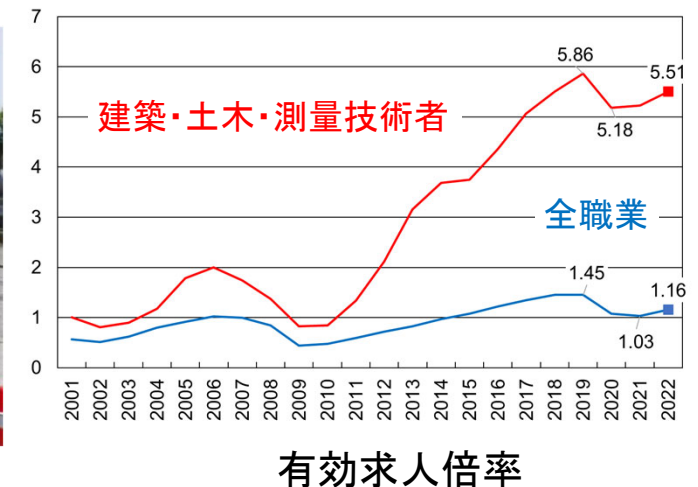
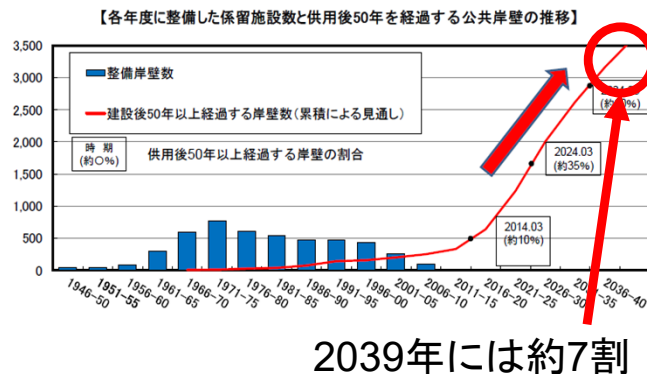
UAVを活用した港湾施設点検の高度化・効率化

国土交通省 国土技術政策総合研究所(国総研)
港湾情報化支援センター 港湾業務情報化研究室
主任研究官 里村大樹

1. 開発の背景と現状、開発目標

背景・現状

- ◆建設後50年以上経過する港湾の岸壁数の割合は、2039年には約7割になると予想されている
- ◆ここ10年ほど、土木関係の技術者は人手不足の状況
- ◆既存資源の有効活用および施設のライフサイクルコスト縮減のために、施設の維持管理が今後ますます重要になっていく中で、より効率的かつ的確な点検診断の実施が求められている
- ◆令和2年3月に改訂された「港湾の施設の点検診断ガイドライン」が、目視と同等に変状把握・劣化度判定できる場合、UAV等による点検も目視とみなすと明示された



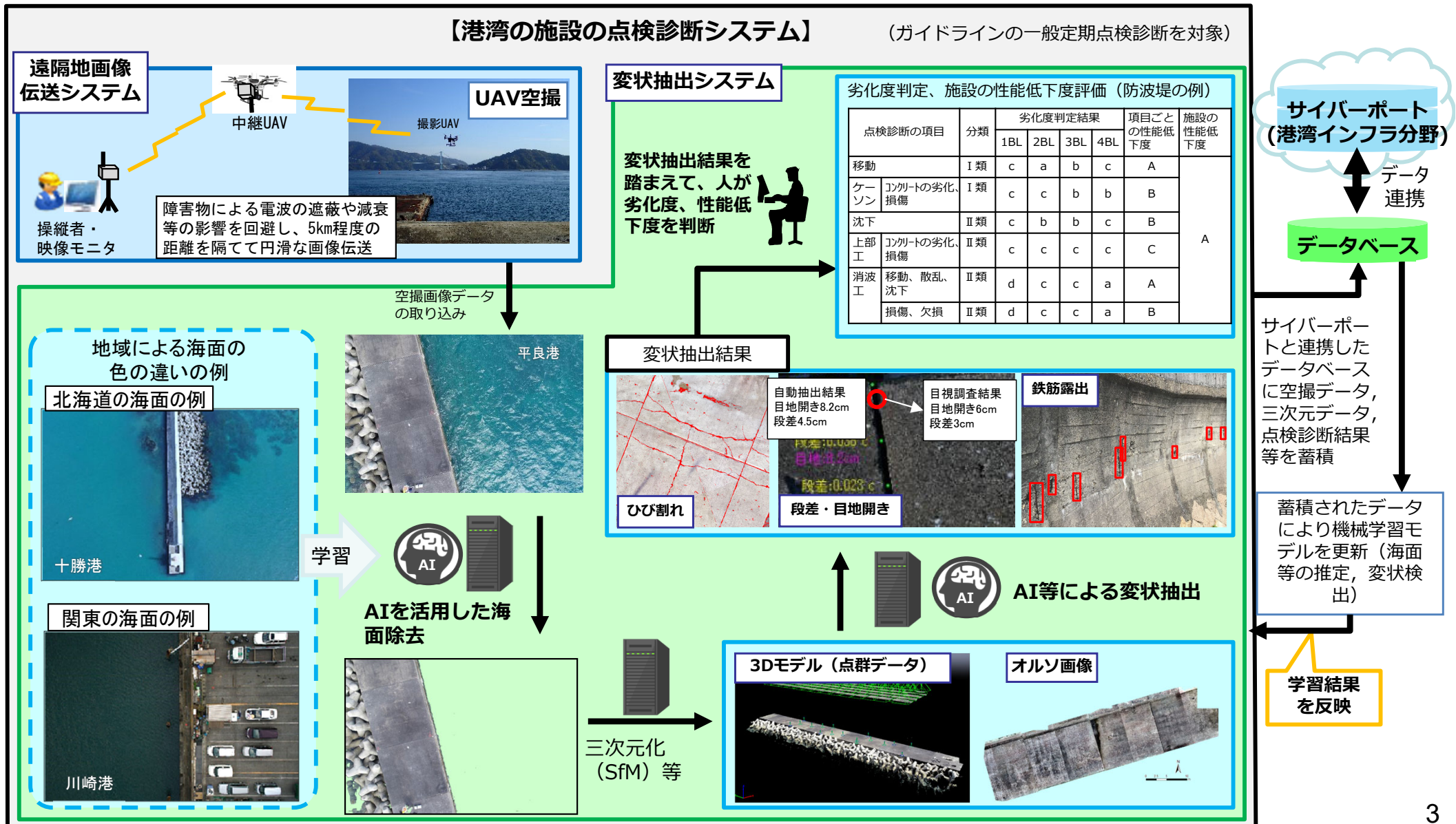
目的・目標

- 港湾施設点検の効率化・高度化を図る
 - UAVの活用で現地作業に要する時間を20%以上削減
 - 防波堤等の遠隔地の点検において、マルチホップ映像伝送によりリアルタイムで状況把握
 - AIを活用し、従来人力で行っていた処理（施設変状抽出等）を省力化・自動化
- 港湾施設の点検診断結果や点群データ等を蓄積し、そのデータを活用することで、AI（機械学習モデル）の精度を高める。将来的には劣化度判定や性能低下度評価にも活用を検討。

2. UAVを活用した港湾の施設の点検診断システム 概要

- 空撮画像の入力から、海面推定・除去、3Dモデル作成等を行い、施設変状の抽出まで行う
- ガイドラインにおける一般定期点検診断のうち、UAVにより空撮可能で目視で判断できる施設変状を対象とし、劣化度a, bに相当する施設変状を自動抽出することを目標

＜港湾の施設の点検診断システム 概念図＞



3. 点検診断システムの開発状況

- 点検の現地作業時間に関して、平均して30%程度の効率化を実現。
 - 全国33港の海面を学習させ、AIによる海面の認識率は全国平均で85%以上を達成。
 - 変状抽出はひび割れ、段差・目地開き、ずれ、欠損、錆汁・鉄筋露出、消波ブロック沈下の抽出システムを開発した。
 - 港湾管理者や施設点検実務者との意見交換を通じて現場のニーズを把握し、システム改修にフィードバック。
 - サイバーポートとの連携について、三次元点群データ等を含めた連携(データ蓄積)を行うことで関係者間で合意。
- 三次元点群データ等については全国で約3000TBという膨大なデータ容量が想定される。

現地作業時間の短縮（効率化）

令和3年度現地作業における実績値

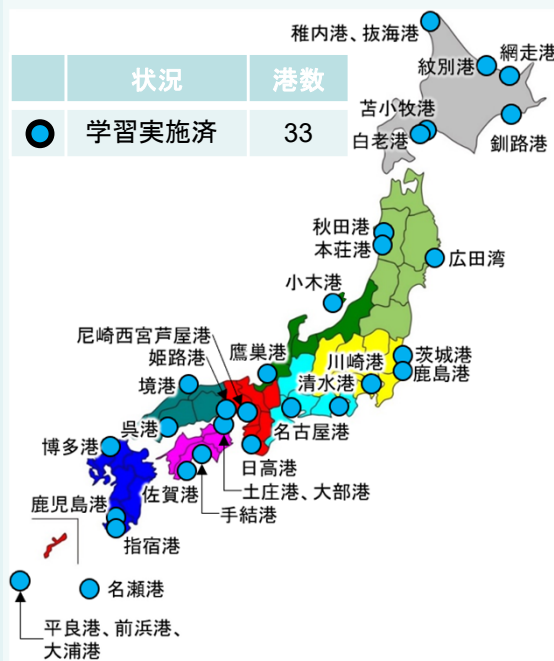
	目視点検 (時間)	UAV撮影等 (時間)	時間短縮 割合
係留施設① (363m2)	3.5	2.0	43%
係留施設② (127m2)	2.5	1.5	40%
係留施設③ (168m2)	2.5	2.0	20%
外郭施設① (203m2)	3.0	1.5	50%
外郭施設② (798m2)	4.0	3.5	13%
計	15.5	10.5	32%

UAV撮影等には対空標識設置・観測を含む

施設の種類・規模によって多少の変動はあるが、平均して30%の現地作業時間短縮を実現

海面推定・除去

学習させた港湾の位置図



港湾管理者、施設点検実務者との意見交換

UAV空撮の実演



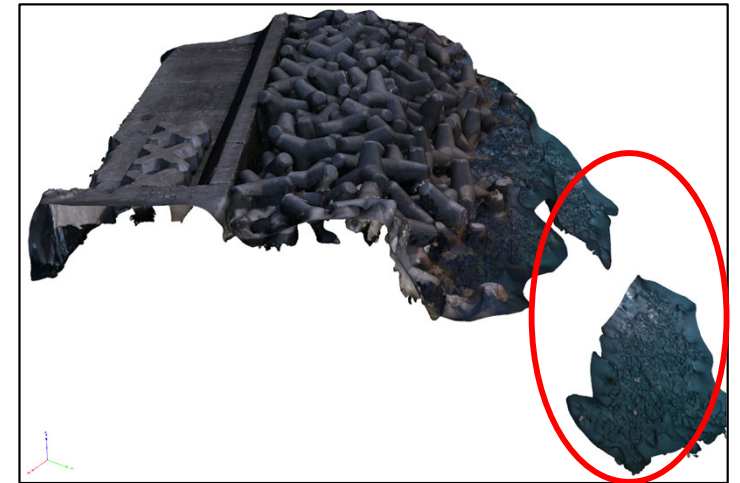
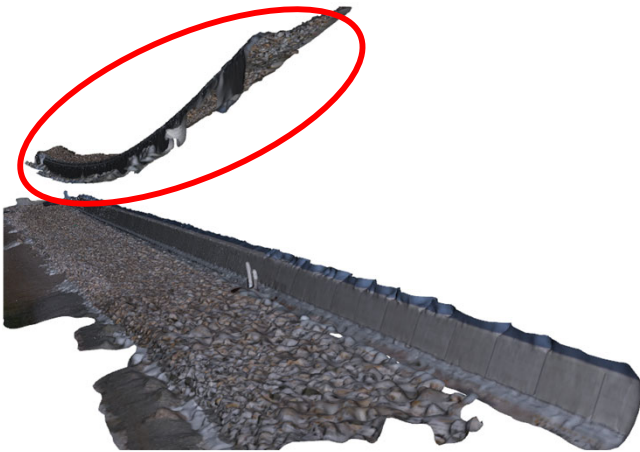
意見交換会



- 1. UAV空撮に関して**
(点検実務者)
通常よりも低高度で、対象物から近い位置での撮影となる
- 2. システムの操作に関して**
(港湾管理者)
操作が難しいので、マニュアルは、手順のわかる詳しい記載である必要がある
- 3. システムの運営に関して**
(港湾管理者)
データ取得と解析は外注し、判定のできるデータを受領できれば、港湾管理者の職員が劣化度を判定することは可能である

4. 海面等の推定・除去

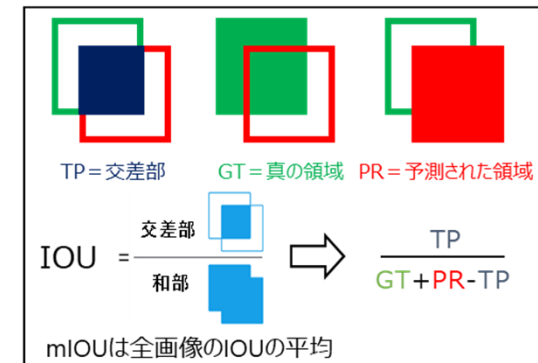
- 海面等の除去の必要性
 - UAV空撮写真からSfM処理により三次元化する際に、絶えず動く海面や画像特徴点を得られない空が写り込んでいると、三次元化が失敗することがある。



- 海面推定の手法はセマンティック・セグメンテーションを採用。
 - 機械学習モデルは2018年時点で分類精度(参考文献でのmIoU)が高かったDeepLab V3+を使用。



セマンティック・セグメンテーションによる領域分割の例



評価指標IoUの計算方法

4. 海面等の推定・除去

- モデルの実装, 学習はTensorflowを使用. 損失関数 L はCross Entropy, クラスの確率 P_i はSoftmax関数.

$$L = - \sum_{i=1}^N y_i \ln P_i \quad P_i = \frac{e^{x_i}}{\sum_{j=1}^N e^{x_j}}$$

- i : クラス, y : 真値のラベル値, N : クラス数, x : 予測のラベル値.
- 地域・海域により海の色や透明度等が異なる
 - 全国一律のモデルでは一部地域・海域で推定精度が十分でない可能性
 - 全国版モデルと地域版モデル(10地域)を作成
 - 全国版モデル: 汎用性に優れ, 評価尺度の共通性を有する
 - 地域版モデル: 特定の条件下において認識率の向上が見込まれる

教師データ数量
(分割前の元画像枚数)

地域	学習用	検証用	計
北海道	65	8	73
東北	47	8	55
関東	65	19	84
北陸	63	22	85
中部	50	8	58
近畿	58	8	66
中国	49	7	56
四国	54	20	74
九州	60	7	67
沖縄	19	8	27
計	530	115	645

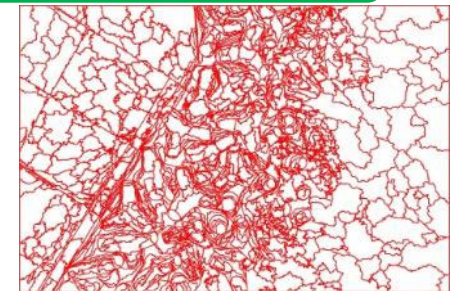
学習の主要パラメータ

項目	値
学習回数(epoch)	30,000
pre-trainedモデル	Xception_65
Atrous rates	(12,18,16)
Output stride	16
decoder output stride	4
train crop size	312
train batch size	16
learning rate	0.00025
learning rate Decay factor	0.1

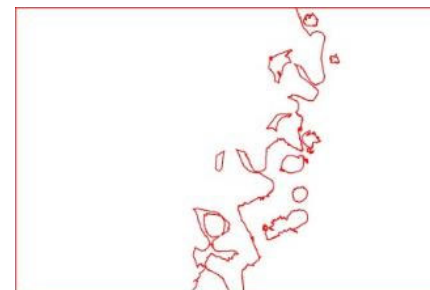
教師データ(アノテーション画像)作成手順



①入力(元画像)



②画像分割ツールを用いて領域分割



③手作業でマージ



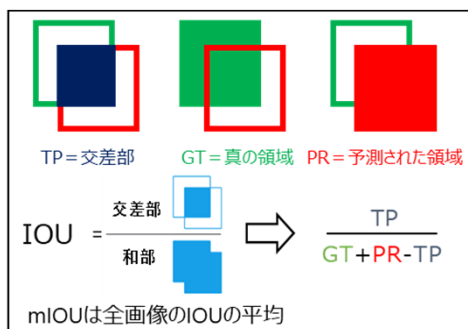
④タグ付けして出力

4. 海面等の推定・除去

- 全国版の認識率は85%、地域版の認識率は89%であり(全国平均)、全体的には地域版の方が精度が高かった。
- 地域別に見ると東北、近畿、四国の3地域は全国版より地域版の認識率が低かった。原因は教師データの偏りにより、海面の状況(砕波、海の濁り等)をうまく学習できなかったためと考えられる。

認識率(mIOU)

地域	全国版 AIモデル	地域版 AIモデル
全国	85%	89% (全国平均)
北海道	94%	98%
東北	71%	63%
関東	95%	98%
北陸	90%	98%
中部	65%	99%
近畿	70%	62%
中国	95%	99%
四国	85%	78%
九州	97%	99%
沖縄	57%	98%



元画像	全国版	地域版
<p>地域版で認識率向上↑</p> <p>沖縄(大浦港)</p>	<p>認識率57%(地域平均)</p>	<p>認識率98%(地域平均)</p>
<p>地域版で認識率低下↓</p> <p>四国(佐賀港)</p>	<p>認識率85%(地域平均)</p>	<p>砕波部分の認識率が低い</p> <p>認識率78%(地域平均)</p>

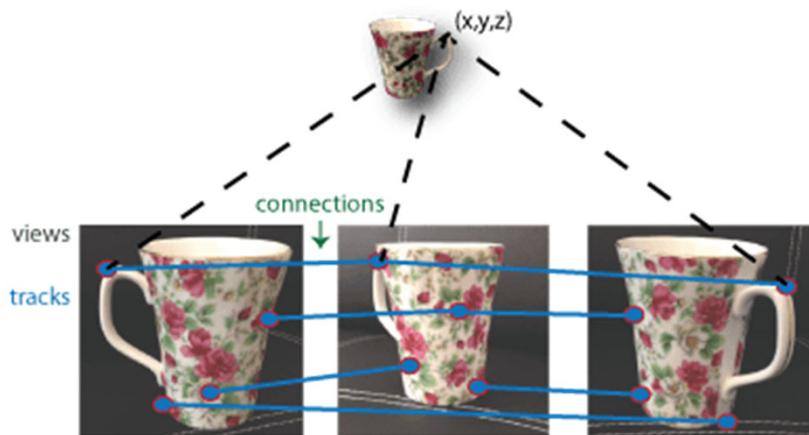
5. 三次元化(SfM処理)

- SfM処理

- Structure from Motion
- 移動するカメラから得られる画像から形状を復元する技術であり、画像に映った対象物の幾何学形状とカメラの動きを同時に復元する手法
- Pix4Dmpperを使用

SfM処理の主な計算条件

座標系		
画像の座標系	単位:m	
	測地系:WGS 84 (World Geodetic System 1984)	
	座標系: WGS 84 (EGM 96 Geoid)	
出力/GCP座標系	単位:m	
	測地系: Japanese Geodetic Datum 2011	
	座標系: JGD 2011 / Japan Plane Rectangular Coordinate System	
初期処理		
Keypoints	image	Full
scale		
カメラの最適化		内部パラメータの最適化: 全て 外部パラメータの最適化: 全て
点群およびメッシュ		
点群の緻密化		画像スケール: 1 (元の画像サイズ) 点密度: 最適
3Dメッシュ構造		作成 (高解像度)
DSM、オルソモザイクおよび指数		
DSMおよびオルソモザイク		解像度: 自動 (1 × GSD)



<https://jp.mathworks.com/help/vision/ug/structure-from-motion.html>

5. 三次元化(SfM処理)

- ジオリファレンス(位置情報の参照)の方法、海面有無、撮影高度等の計算条件を変えた54ケースでSfM処理を行い、SfM処理の成功率と検証点RMSE(該当ケースの中央値)を比較

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_{CP}} \sum_{i=1}^{N_{CP}} (\hat{x}_i - x_i)^2}$$

\hat{x} はCPにおけるGNSS測量した座標値、 x はCPにおけるSfMで出力された座標値、 N_{CP} はCPの数

- ジオリファレンスの方法ではGeotag + GCPが成功率、検証点RMSEともに一番良かった。海面有無で成功率に差はなく、検証点RMSEは海面有りの方が少し低かった。撮影高度は20mが成功率、検証点RMSEともに一番良かった。

ジオリファレンス方法と成功率、検証点RMSE

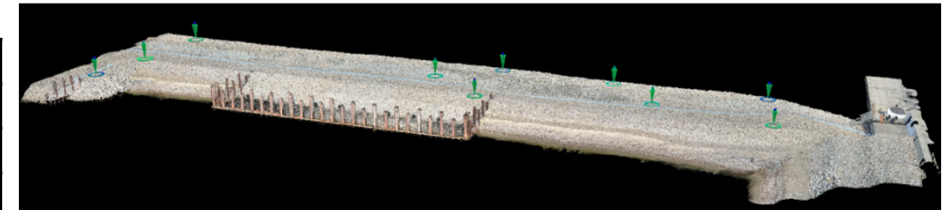
ジオリファレンス	SfM成功率	検証点RMSEの中央値(m)		
		X	Y	Z
Geotag	0% (0/18)	2.189	1.555	3.904
GCP	67% (12/18)	0.012	0.010	0.032
Geotag + GCP	78% (14/18)	0.008	0.010	0.019
全体	48% (26/54)	0.020	0.018	0.041

海面の有無と成功率、検証点RMSE

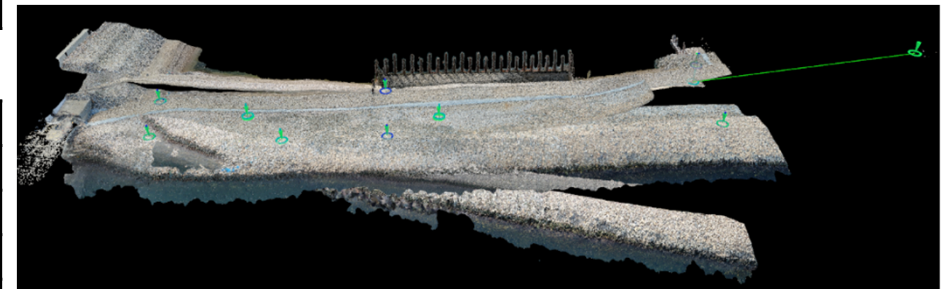
海面	SfM成功率	検証点RMSEの中央値(m)		
		X	Y	Z
無し	48% (13/27)	0.023	0.021	0.049
有り	48% (13/27)	0.012	0.014	0.035
全体	48% (26/54)	0.020	0.018	0.041

撮影高度と成功率、検証点RMSE

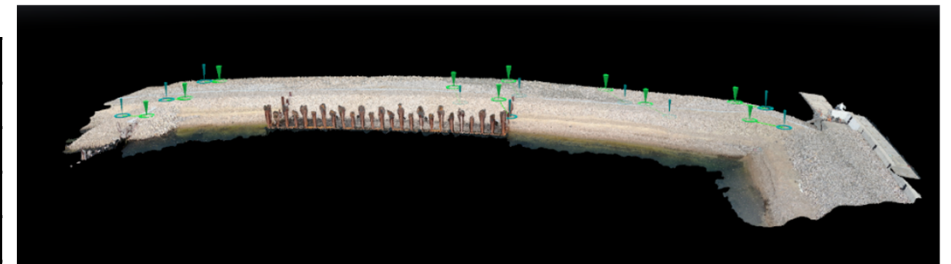
撮影高度	SfM成功率	検証点RMSEの中央値(m)		
		X	Y	Z
10 m	33% (6/18)	0.014	0.013	0.106
20 m	61% (11/18)	0.012	0.010	0.032
30 m	50% (9/18)	0.023	0.022	0.165
全体	48% (26/54)	0.020	0.018	0.041



SfM成功例



SfM失敗例1(モデルが崩壊)



SfM失敗例2(モデルの歪み:ドーム)

6. 変状抽出

変状抽出の目標精度と達成状況

変状の種類	点検診断ガイドラインが求める劣化度b判定基準例	目標精度	解析手法概要	解析手法	達成状況
ひび割れ	(ケーソン式係船岸 ケーソン 側壁の劣化、損傷) ・複数方向に幅3mm程度のひび割れがある。	幅 3mm の ひび割れを検出	オルソ画像に対するAI画像認識 (幅3mmのひび割れを検出するため、オルソ画像の分解能は1mm/pixel)	セマンティック・セグメンテーション	抽出率:79% 実績値:70/89 教師データ数:2,852枚
錆汁	(浮桟橋 ポンツーン外部 (PCの場合)コンクリートの劣化、損傷) ・錆汁がある。	1cm×1cm 程度の 錆汁を検出		物体検出	抽出率:36% 実績値:103/284 教師データ数:1787
鉄筋露出	(ケーソン式防波堤 ケーソン コンクリートの劣化、損傷) ・広範囲に亘り鉄筋が露出している。	1cm×1cm 程度の 鉄筋露出を検出		物体検出	抽出率:28% 実績値:22/80 教師データ数:848
段差・沈下	(ケーソン式係船岸 エプロン 沈下、陥没) ・エプロンに3cm以上の沈下(段差)がある。 ・エプロンと背後地との間に30cm以上の沈下(段差)がある。	3cmの段差を検出	三次元点群データから生成したDSMから算出	DSMのフィルター処理によりエッジ(目地)抽出。目地の両側の標高値を比較。	抽出率:82% 実績値:9/11
目地の開き	(ケーソン式係船岸 エプロン 沈下、陥没) ・ケーソン目地(上部工含む)に顕著な開き、ずれがある。	3cm の 目地開きを検出		DSMのフィルター処理によりエッジ(目地)抽出。目地の両側の位置座標を比較。	抽出率:100% 実績値:5/5
ずれ	(ケーソン式防波堤 移動) ・隣接ケーソンとの間に側壁厚程度(40~50cm)のずれがある。 (防潮堤、護岸、堤防 施設全体の移動) ・隣接するスパンとの間に10~20cmのずれがある。	10cmのずれを検出		DSMよりケーソンの角点を検出。隣接ケーソンの角点の座標値を比較。	抽出率:100% 実績値:5/5
欠損	(ケーソン式防波堤 上部工 コンクリートの劣化、損傷) ・小規模な欠損がある。 (防潮堤、護岸、堤防 波返工 コンクリートの劣化、損傷(無筋の場合)) ・部材表面に対して面積比で10%未満の欠損がある。	縦横深さが5cm 程度 以上の 欠損を検出		二時期のDSMを比較して差分を計算。	抽出率:90% 実績値:9/10
消波ブロック沈下	(ケーソン式防波堤 消波工 移動、散乱、沈下) ・点検単位長に亘り、消波工断面が減少している(ブロック1層未満)。	数 10cm 程度 の 沈下を検出		DSMから消波ブロックの代表高さを計算。設計高さと比較することで沈下量を計算。	抽出率:100% 実績値:1/1

(注-1)劣化度b:部材の性能が低下している状態 (注-2) DSM:表面の高さ情報を持った画像データ

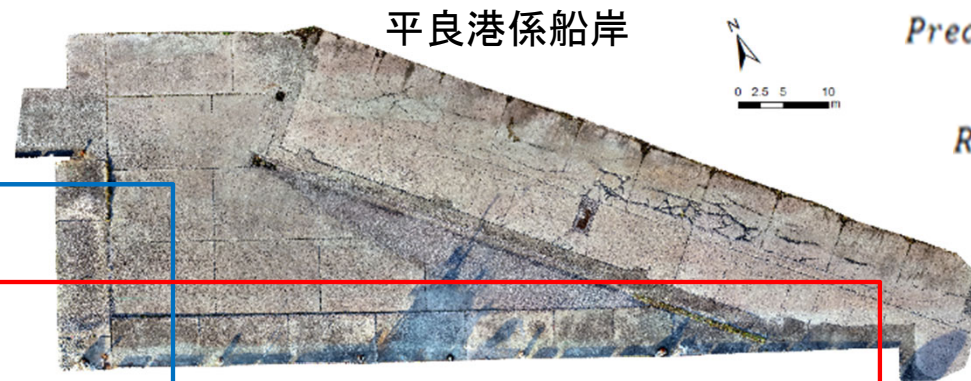
6. 変状抽出

- 施設変状抽出(ひび割れ抽出)
 - 使用する教師データ、重み調整の有無により多少異なるが、画素数ベースのF-Scoreは90%以上。
 - 箇所数(本数)ベースだと79%。

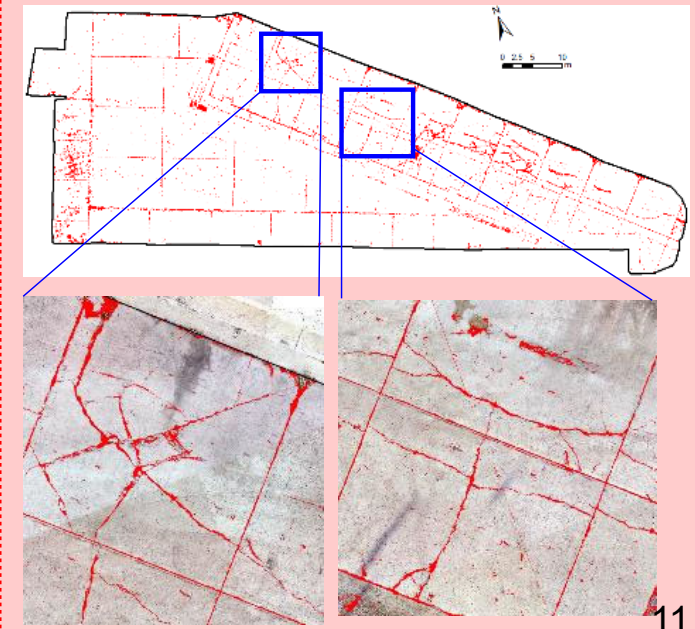
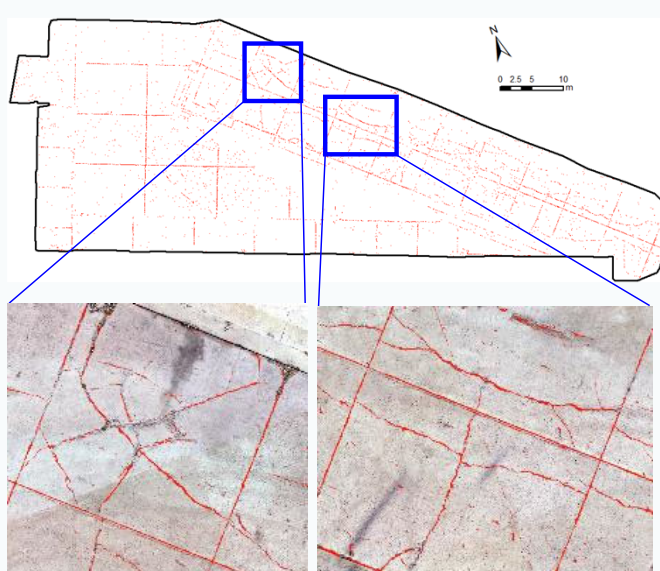
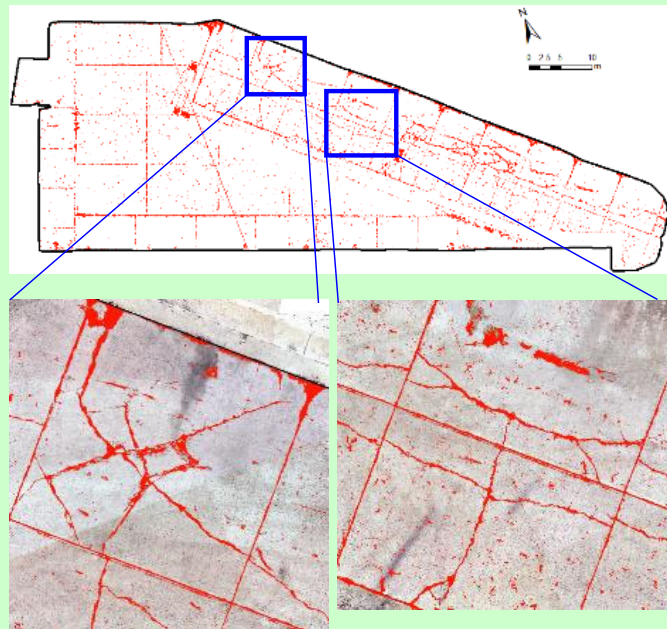
$$F\text{-score} = \frac{2 \times \text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}$$

使用データ	重み調整	F-Score
平良港	有	92.2 %
空撮画像	無	93.6 %
DeepCrack	有	95.5 %
	無	93.7 %
平良港空撮画像+DeepCrack	有	92.2 %
	無	94.3 %

F-Scoreは検証用データに対する数値



$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}$$
$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}$$



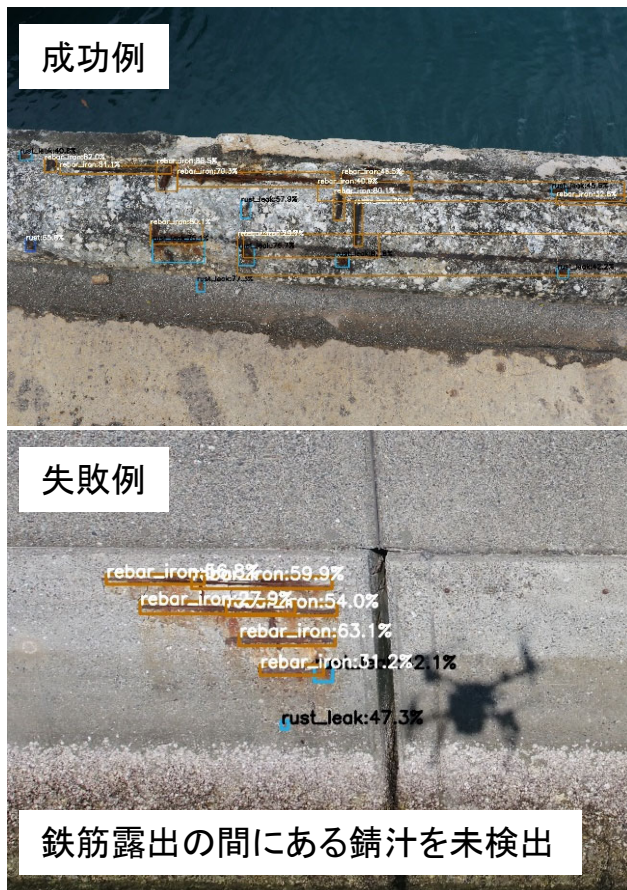
6. 変状抽出

錆汁・鉄筋露出

- 一段階の物体検出(モデル:YOLOX)にて推定
- 錆汁と鉄筋露出は同じモデルで同時に検出を行った
- 正解と見なすIoUの閾値を50%、検出判定の閾値を確信度50%とした場合、錆汁、鉄筋露出のF-scoreはそれぞれ42%、38%。

推論結果

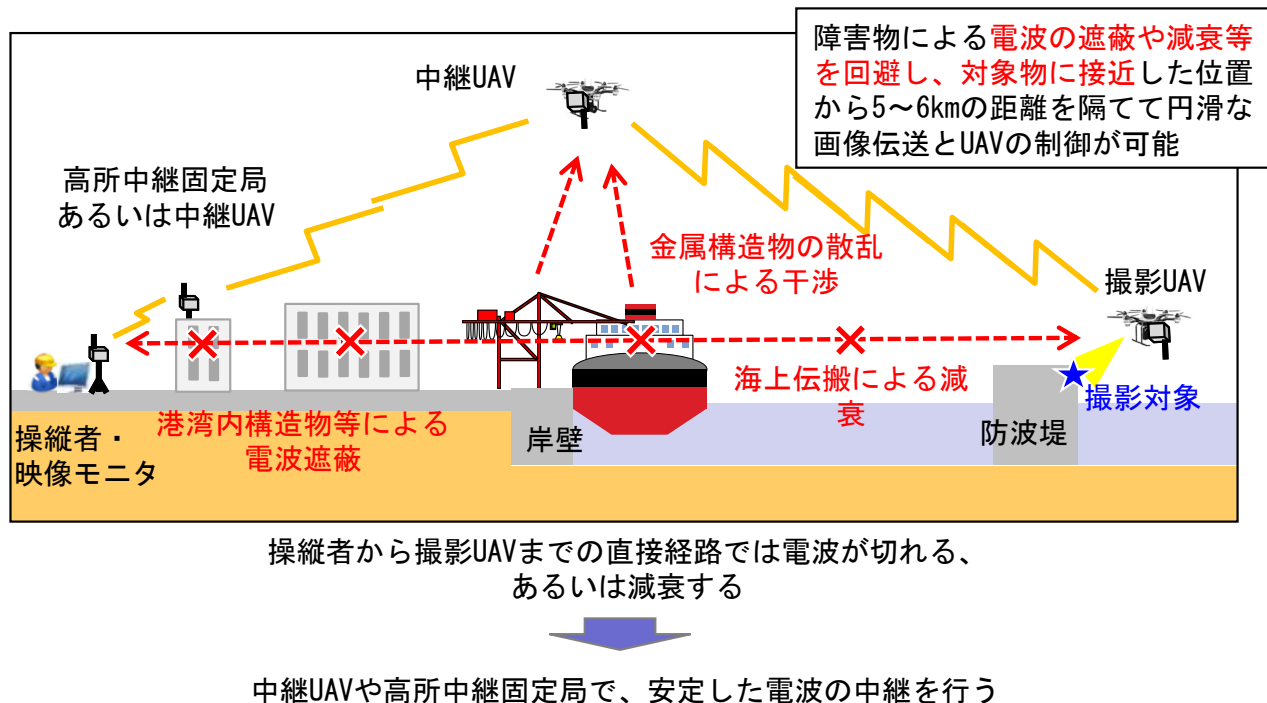
クラス	IoU	確信度	TP	FP	FN	Precision	Recall	F-score
錆汁	50%	10%	136	444	148	23%	48%	31%
		25%	121	254	163	32%	43%	37%
		50%	103	101	181	50%	36%	42%
	30%	10%	182	398	102	31%	64%	42%
		25%	158	217	126	42%	56%	48%
		50%	123	81	161	60%	43%	50%
鉄筋露出	50%	10%	29	115	51	20%	36%	26%
		25%	29	42	51	41%	36%	38%
		50%	22	15	58	59%	28%	38%
	30%	10%	32	112	48	22%	40%	29%
		25%	31	40	49	44%	39%	41%
		50%	23	14	57	62%	29%	39%
その他の錆	50%	10%	69	347	137	17%	33%	22%
		25%	66	176	140	27%	32%	29%
		50%	61	73	145	46%	30%	36%
	30%	10%	82	334	124	20%	40%	26%
		25%	79	163	127	33%	38%	35%
		50%	70	64	136	52%	34%	41%
3クラス計	50%	10%	234	906	336	21%	41%	27%
		25%	216	472	354	31%	38%	34%
		50%	186	189	384	50%	33%	39%
	30%	10%	296	844	274	26%	52%	35%
		25%	268	420	302	39%	47%	43%
		50%	216	159	354	58%	38%	46%



青枠: 錆汁、茶枠: 鉄筋露出。図中の数字は確信度(%)。

7. 遠隔地画像伝送システム

- 遠隔地画像伝送システムは、防波堤等の陸上から離れた施設においても、安全性を確保し、かつ、リアルタイムで施設状況、異常箇所の確認・撮影を行うことで、効率的な施設点検が実施できるよう、構造物、船舶、海面等による電波の遮蔽や減衰等の影響を回避・軽減し、円滑な画像伝送を行うことを目標としている
 - 2.4 GHz帯の無線LANとの干渉を避けるため、5.7 GHz帯の電波を使用して、マルチホップ映像伝送を行う。
 - 港湾における電波環境及び電波伝搬特性を現地調査
 - 開発した無線モジュールを用いて、港湾における非見通し環境におけるマルチホップ映像伝送試験

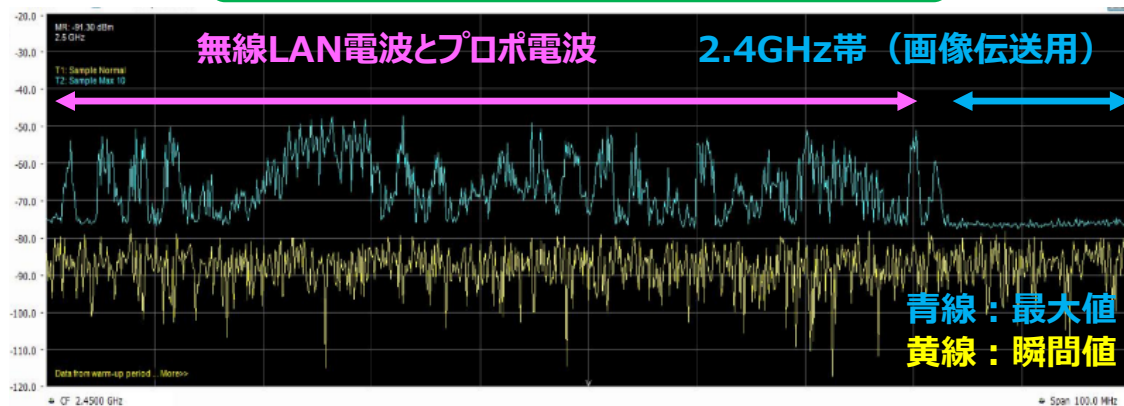


実証試験実施場所（茨城港常陸那珂港区） 13

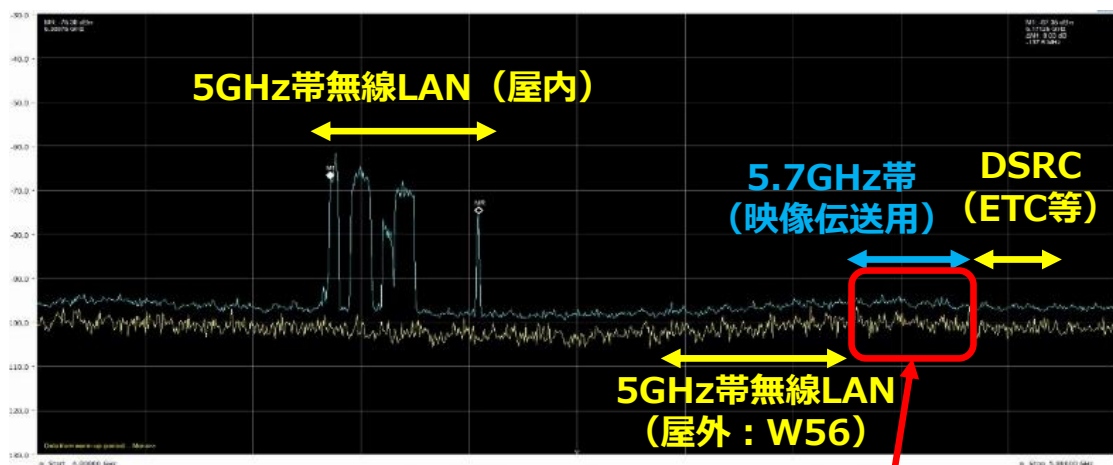
7. 遠隔地画像伝送システム

- 港湾における電波環境及び電波伝搬特性の測定
 - 5.7GHz帯において、他の使用は確認されなかった。
 - 船舶により見通しが悪い状況では、電波の遮蔽が確認できた。

周辺環境雑音(電波ノイズ)測定の結果



2.4GHz帯 (2400MHz~2500MHz)



5GHz帯 (4.9GHz~5.9GHz)

他の使用は確認されず

電波伝搬特性測定の結果



7. 遠隔地画像伝送システム

■ 港湾での実証試験(令和3年4月)

- 船舶等の通信上の障害物による遮蔽を、無線ユニット搭載のUAVを用いたマルチホップ通信により回避する、遠隔地画像伝送システムの実証試験を行った。
- 岸壁から高度3mを飛行するカメラ搭載UAVから、高度40mでホバリングさせた中継UAVを経由して、約5km離れた地上モニター局において、フルHD(1920×1080pixel)、10fpsの映像伝送を確認した。

岸壁エプロン



対岸に停泊していた大型船舶(障害となる)

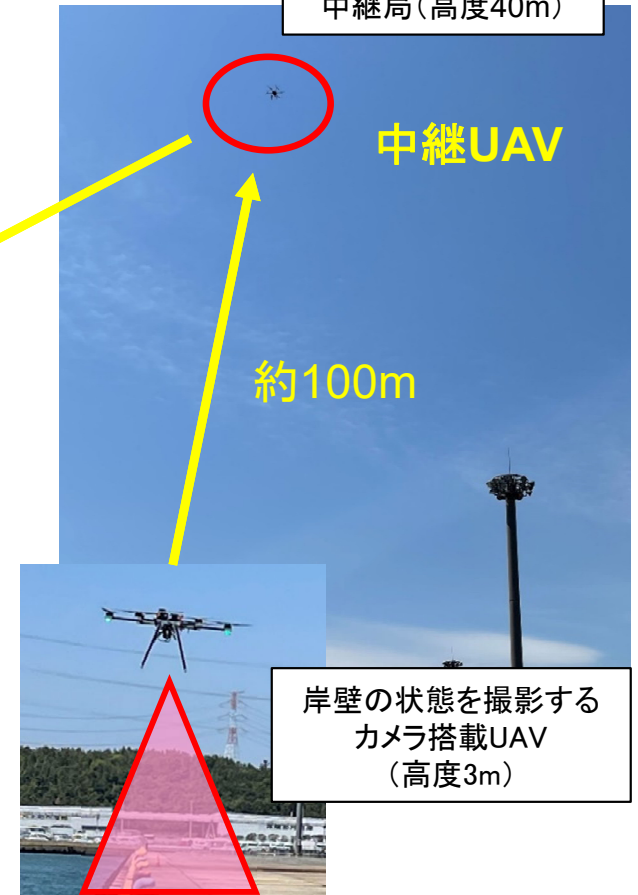


中継局(高度40m)

中継UAV

約100m

岸壁の状態を撮影する
カメラ搭載UAV
(高度3m)



8. まとめ

- 港湾施設点検の効率化・高度化を目的として、UAVを活用した港湾の施設の点検診断システム(UAV点検診断システム)を開発。

◆ 変状抽出システム

■ 海面除去

- 実港湾で撮影した画像から教師データを作成し、AIモデルに学習させた。
- 海面推定の精度(mIOU)は全国平均で85%以上。

■ 変状抽出

- ひび割れ抽出の精度は画素ベースで90%以上、本数ベースで79%。
- 錆汁の抽出率(Recall)は36%、鉄筋露出の抽出率は28%。

◆ 遠隔地画像伝送システム

- 港湾において5.7GHz帯の周辺環境雑音(ノイズ)は確認されなかった
- 船舶による非見通し環境で電波の遮蔽を確認した
- 港湾での非見通し環境でマルチホップ映像伝送できた

おまけ：能登半島地震での被災調査(飯田港)でのUAV空撮



地理院地図(被災前)



地理院地図(2024.1.2撮影の正射画像)

