

水中ドローンを用いた水中構造物点検における模擬クラックと 基準マーカを用いた三次元再構築の基礎的検討

日大生産工(院) ○谷口 晴也
鷺見 浩一

1. まえがき

近年の港湾・河川・ダム等で,日常点検はダイバー目視/簡易計測,精密点検は専門業者が実施.近年はROVやポールカメラでの省人・省潜水運用が増加している.海岸護岸・港湾壁・消波ブロックなどの水中/半水没構造物は,濁度・反射・浮遊物・被写体の低テクスチャといった水環境特有の条件に加え,操縦・速度・姿勢・照明・撮影角度などの運用要素が複雑に絡み合い,可視化・幾何復元の再現性が揺らぎやすい⁽¹⁾.本研究は,この“揺らぎ”の主要因を,撮影～処理～検証の一連のフローに沿って切り分け,手動操作に起因する誤差を含む不確実性を定量化し⁽²⁾,現場で実効性のある運用指針へ還元することを目的とする.

2. 使用機材およびソフトウェア

使用機材①ROV: CHASING M2 ②カメラ: 機体一体型カメラ ③照明: 機体一体型照明 ④ターゲット: 3cm角のアルミ立方体 ⑤マーカ: 一辺3cmの正方形(印刷)を貼付⁽³⁾
ソフトウェア: Agisoft Metashape v1.8.5

3. 実験方法

本研究は,水工実験室の土石流発生用水路先端に接続された金属製容器(底面約3.0m×約0.9m,深さ約1.0m)内で実施した.撮影にはCHASING M2(標準構成)を用い,機体一体型カメラおよび一体型照明のみを使用した(外部ライト・外部カメラは不使用).マーカはArUcoマーカを採用し,基本形状として一辺3cmの正方形を3cm角のアルミ立方体に貼付して用いた.各条件は動画で取得し,取得後に1fpsの静止画列へ変換して解析に供した.以下,角度表記の $\pm\theta$ は左右両方向を示す(実験1・実験2で統一).

(1)実験1 水深を「上・中・下」の3段に設定した.(Fig.1) 各水深で対象面に対して 0° および $\pm 45^\circ$ の3方向で撮影した.照明条件は強・弱・

消灯,マーカは有・無の組合せ(計6パターン)で取得し,得られたオルソ画像の見た目(連続性・継ぎ目・筋状アーチファクト,直線の湾曲,テクスチャの破綻・欠損など)をもとに良否を視覚判定した⁽¹⁾.

(2)実験2 水深を5段に拡張した.角度は 0° に加えて $\pm 20^\circ$ および $\pm 45^\circ$ を用い,取得の単位を「角度セット」とした.具体的にはA: $0^\circ + (\pm 20^\circ)$, B: $0^\circ + (\pm 45^\circ)$, C: $0^\circ + (\pm 20^\circ, \pm 45^\circ)$ の3セットを定義して撮影した(Fig.2).マーカは実験1より貼付面を増やした改良版を用い,各角度セットについてマーカ有/無の2条件を取得した.これにより,角度の追加とマーカ改良が水深依存でどの程度,品質改善(特徴点分布,再投影誤差,湾曲抑制)に寄与するかを系統的に評価した⁽¹⁾.

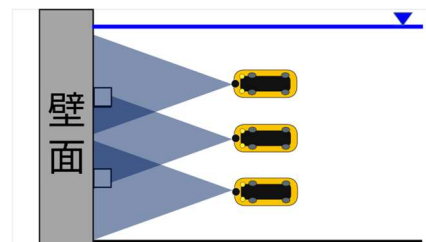


Fig.1 撮影方法側面概略図

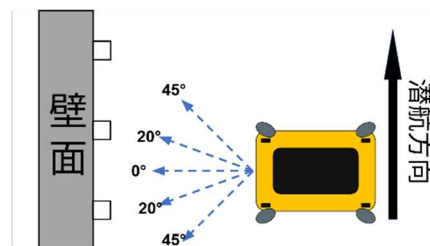


Fig.2 撮影方法平面概略図

4. 実験結果

(1)実験1では,マーカ有×ライト強(C6)が相対的に最も良好(例:連A/完B)で採用候補と判断した.一方で幾何C・放射Cに相当する湾

A Preliminary Study on 3D Reconstruction Using Simulated Cracks and
Reference Markers for Underwater Structure Inspection with an ROV

Haruya TANIGUCHI and Hirokazu SUMI

曲や局所反射が残り,条件の最適化が必要である.無灯 (C1/C4) は欠損が大きく総合D,弱灯 (C2/C5) は幾何Dや放射C-D,強灯・マーカー無 (C3) は反射・欠損で総合Dとなった.以上を踏まえ,実験2では(マ有×強)を基準に $\pm 20^\circ/\pm 45^\circ$ の斜め撮影の追加,特徴点数・再投影誤差など数値指標で改善効果を検証する.

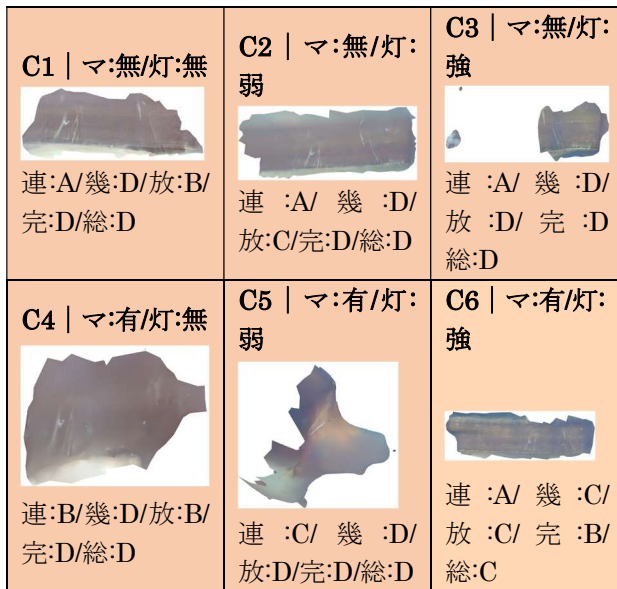


Fig.3 実験1:オルソ画像の視覚判定(代表ビューでの6条件比較) (1) 評価軸=①連続性/シーム ②幾何の見え方(直線の湾曲) ③放射一貫性(白飛び・反射) ④完全性(欠損).

各セルの背景は総合評点(A=良, B=許容, C=注意, D=不可)を示す.
(2)実験2では照明は強に固定し,マーカー有/無×角度セット($0^\circ + \pm 20^\circ, 0^\circ + \pm 45^\circ, 0^\circ + \pm 20^\circ \pm 45^\circ$)の6ケースを比較した.オルソ画像の見た目差は顕著ではなく,壁面中央の解像度ターゲット(0.10–0.50 mm線分)は全ケースで視認良好であった.Metashapeレポートに基づく主要指標では(1), $\pm 45^\circ$ を含む構成で再投影誤差が低く, $0^\circ + \pm 20^\circ \pm 45^\circ$ でTie/枚(対応点密度)が最大となる傾向を確認した.全ケースで全画像が整列している.具体値はTable.1に示す.

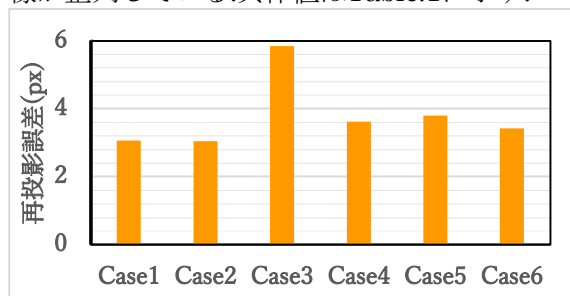


Fig.4 実験2:ケース別再投影誤差

Table.1 実験 2:再投影誤差と特徴点数

ケース	条件	再投影誤差	特徴点数
Case1	正面 $\pm 20^\circ$	3.06	1,123,846
Case2	正面 $\pm 45^\circ$	3.04	920,746
Case3	正面 $\pm 20^\circ$ $\pm 45^\circ$	5.84	1,914,872
Case4	正面 $\pm 20^\circ$	3.62	971,331
Case5	正面 $\pm 45^\circ$	3.80	693,616
Case6	正面 $\pm 20^\circ$ $\pm 45^\circ$	3.42	1,361,412

5. まとめ

実験1では視覚判定で「マーカー有×ライト強」以外は欠損・反射・幾何歪みが目立った.実験2では照明を強に固定したことで見た目差は小さく,差は再投影誤差とTie/枚に現れたと解釈できる.

角度効果: $\pm 45^\circ$ を含む構成は視差が増え束調整の拘束が強まるため,再投影誤差が低下しやすい. $0^\circ + \pm 20^\circ \pm 45^\circ$ は視点多様化でTieが増える一方.外れ対応が混入しやすく誤差が上がることもある.精度(低誤差)と結び付き(高Tie)は相反関係になり得る.

マーカー効果:強照明下ではコントラストが上がりTie分布の充実に寄与.ただし反射の強い場面ではマーカーのハイライトが外れ値の原因となり得るため,角度・入射の調整や外れ値除去(Gradual Selection等)の併用が望ましい.

参考文献

- 1) U.S. Geological Survey, Digital Ortho imagery Base Specification, Version 1.0 (Techniques and Methods 11–B5), 2014.
- 2) ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing), The ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data, Edition 2, 2023.
- 3) Čejka, J., Bruno, F., Skarlatos, D., Liarokapis, F., Detecting Square Markers in Underwater Environments, Remote Sensing, 11(4), 2019, Article 459.