

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ーを用いた三次元再構築の基礎的検討

日大生理工(院) ○谷口 晴也
鷲見 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”的主要因を、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マーカー : 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）。マーカーはArUcoマーカーを採用し、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±θ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±45°の3方向で撮影した。照明条件は強・弱・

消灯、マーカーは有・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±20°および±45°を用い、取得の単位を「角度セット」とした。具体的にはA : 0° + (±20°), B : 0° + (±45°), C : 0° + (±20°, ±45°) の3セットを定義して撮影した（Fig.2）。マーカーは実験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ー有/無の2条件を取得した。これにより、角度の追加とマーカー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⁾。

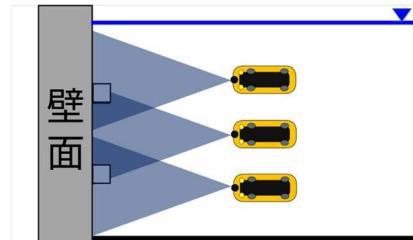


Fig.1 撮影方法側面概略図

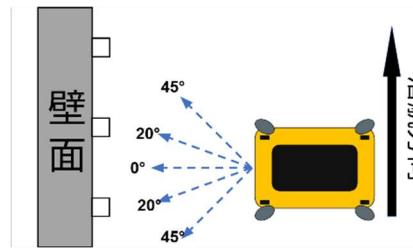


Fig.2 撮影方法平面概略図

4. 実験結果

(1) 実験1では、マーカー有×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。

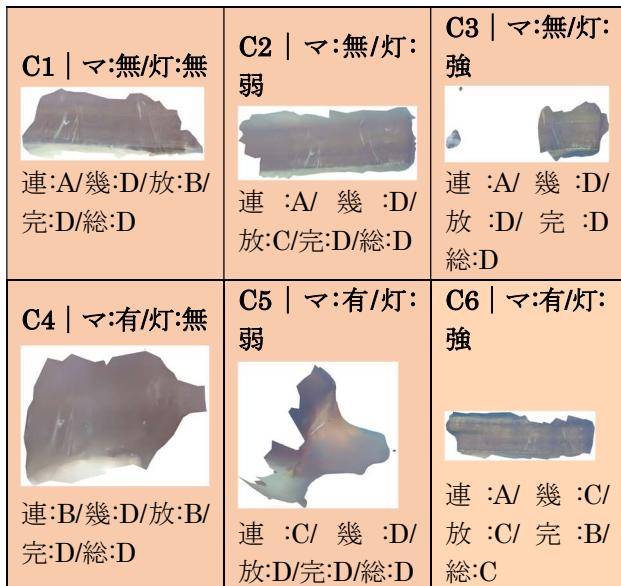


Fig.3 実験1: オルソ画像の視覚判定 (代表ビューでの6条件比較) (1)

評価軸=①連續性/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。

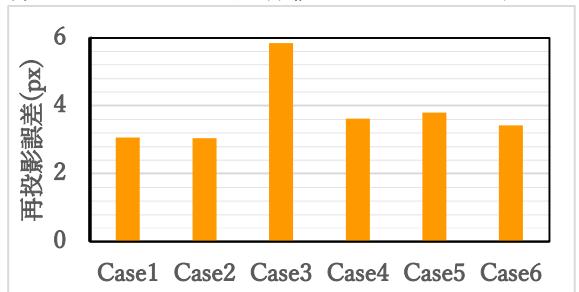


Fig.4 実験2: ケース別再投影誤差

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/枚に現れると解釈できる。

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ることがある。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

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