

## 複数 UAV による同期画像を用いた越波構造の四次元計測

池本 千馬【海岸工学研究室】

台風や高潮に起因する高波の越波によって、港湾や漁港の泊地周辺において、船舶の転覆や浸水などの被害が発生している。

現在、これらの越波被害に対する対策としては、地形情報等に基づく越波高の推定や、実際の最高越波高の観測によって越波規模を把握し、それに基づいて離岸堤や消波ブロックを設置して越波を防ぐ手法がとられている。しかし、対策が必要なすべての海岸において、適切な措置が講じられているわけではない。

離岸堤の大型化や消波ブロックの増設・大型化などにより、越波による被害を軽減させることは可能である。しかし、むやみに対策規模を拡大することは、被害の防止に繋がる一方で、工事費用の増大や景観の悪化を招く。したがって、想定される越波に対して適切な規模の対策を講じることが求められる。

そこで本研究では、適切な越波対策を設計するためには越波の流量や流体構造を正確に把握する必要があると考え、その基本情報となる越波水塊の挙動を詳細に解明することを目的とする。

越波構造を把握する手段として、UAV を複数台飛行させ、ステレオ視を用いて水塊の挙動を解析する手法をとった。

最終的なターゲットとする現地スケールの越波としては、高知県安芸漁港沖防波堤で報告されている30m前後の高さまで打ちあがるものを想定しているが、本研究では、高さ10m程度の小規模な越波に対して計測手法を開発する。

調査地点は高知港東の離岸堤周辺を選定した。3台のUAVで越波の4K動画撮影を約15分間行った。飛行直前に時計の映像を映しておくことで、3台分の動画をほぼ同時刻の3枚1組の同期画像でフレーム数約3万コマに分割した。

用いたUAVはGNSS(Global Navigation Satellite System)搭載であるため、撮影される静止画には、撮影時点のUAVの位置や姿勢が記録される。しかしながら、本研究では、動画をフレーム画像にしたものを分析対象にするため、強風の影響を受けて小刻みに変動するカメラの位置・姿勢情報が分割した個々の画像には記録されていない。ステレオ視にはカメラの位置・姿勢情報が必須であるため、何らかの方法でこれらを推定する必要がある。

ステレオ視分析では、カメラの位置・姿勢から越波水塊などの動的対象点の三次元位置情報を推定することになるが、本研究では、まず、複数画像で位置情報の判明している固定対象点を元に、強風の影響を受けてフレームごとに変動するカメラ位置・姿勢を推定した。固定対象点は、事前に対象領域の写真測量を行っておくことで、詳細DEM(Digital Elevation Model)を作成して設定した。このようにして、フレーム画像ごとに判明したカメラ位置・

姿勢を元に、改めて動的対象物である波浪や越波の形状をステレオ視を用いて推定した。

このようにして、推定したカメラ位置・姿勢 UAV のフライトログとカメラ位置の推定結果を比較したところ、十分な精度であることを確認した。

越波構造の形状推定を行うなかで、精度や点群密度に影響する因子として、特徴点探索・マッチングにおける空間解像度、点群の品質制御や用いる UAV の台数などが、重要であることを見出した。SfM(Structure from Motion)/MVS(Multi-View Stereo)分析に用いたソフトウェア Agisoft Metashape pro では特徴点探索に係るパラメータは、アライメント精度のパラメータとして設定できる。また、点群の品質制御は、ステレオ視分析で生成される深度マップで急激な変化を許容する空間スケールとして設定できる。なお、Metashape を用いた分析では、python スクリプトを用いて、複数時刻の分析を連続的に自動分析させた。

UAV 台数については、2 台に減らすと、かなり精度が低くなり、形状取得が行えない領域が増えたため、3 台以上に台数を増やすことの優位性が示された。

特徴点処理における空間解像度や点群の品質制御に用いる空間スケールは、地上解像度が 2cm/pix 程度であった本研究においては 1x1 ピクセルで最も細かく設定するより、2x2 や 4x4 ピクセル程度で設定した方が、復元される点群の数が多く、越波の内部構造をより詳細にとらえることが確認できた。これらの処理スケールは地上解像度で換算すると 4~8cm のスケールとなり、高さ 10m 程度の越波における SfM/MVS 分析の最適空間スケールを推定することができた。

以上より、本手法を用いることで、越波の 3 地点以上からの UAV で撮影した動画で越波の内部構造を可視化することが可能になった。

**キーワード：**越波、UAV、ステレオ視、四次元計測、カメラ位置推定、空間解像度

# Abstract

## 4-D reconstruction of wave overtopping by synchronized UAV's

Ikemoto Kazuma

Wave overtopping caused by typhoons and storm surges leads to severe damage around ports and fishing harbors, including vessel capsizing and coastal flooding. Current countermeasures involve estimating overtopping heights based on topography or historical observations and installing offshore breakwaters or wave-dissipating blocks. However, appropriate measures are not yet implemented on all vulnerable coasts. While increasing the size of breakwaters or the volume of armor units can mitigate damage, excessive scaling leads to rising construction costs and degradation of the coastal landscape. Therefore, it is essential to design countermeasures proportional to the anticipated scale of overtopping.

To understand the overtopping structure, a method was employed using multiple UAVs to analyze water mass behavior via stereo vision. While the ultimate target is the large-scale overtopping (approximately 30 meters high) reported at the Aki Fishing Harbor offshore breakwater in Kochi Prefecture, this study develops the measurement method targeting 10-meter-class overtopping around the detached breakwater east of Kochi Port.

Three UAVs captured 4K video of the overtopping for approximately 15 minutes. Temporal synchronization was achieved by filming a clock prior to flight, allowing the footage to be split into approximately 30,000 sets of simultaneous frame images. Although the UAVs record GNSS data for still images, the extracted video frames lack the metadata for camera position and attitude—which fluctuate minutely due to strong winds—required for stereo vision. Therefore, these parameters had to be estimated.

In the stereo vision analysis, while the goal is to estimate the 3D positions of dynamic targets (water masses), this study first estimated the frame-by-frame camera positions and attitudes using fixed control points. These fixed points were established based on a detailed DEM created via prior photogrammetry of the target area. Based on these determined camera parameters, the shapes of the dynamic waves and overtopping were reconstructed. A comparison of the estimated camera positions with the UAV flight logs confirmed sufficient accuracy.

In estimating the overtopping shape, it was found that factors such as spatial resolution in feature matching, point cloud quality control, and the number of UAVs are critical. The

analysis used **Agisoft Metashape Professional**, where feature search parameters can be set as alignment accuracy, and point cloud quality control can be managed via the spatial scale allowing changes in depth maps. The process was automated using Python scripts for continuous multi-step analysis.

Regarding the number of UAVs, reducing the unit count to two significantly lowered accuracy and increased blind spots, demonstrating the superiority of using three or more UAVs. Furthermore, under a ground resolution of approximately 2 cm/pix, it was confirmed that setting the feature processing scale to 2x2 or 4x4 pixels (equivalent to 4–8 cm on the ground) yielded a larger number of reconstructed points and captured the internal structure in greater detail than the finest 1x1 pixel setting. Thus, the optimal spatial scale for SfM/MVS analysis of 10-meter-class overtopping was estimated.

In conclusion, this method enables the visualization of the internal structure of wave overtopping using video captured by UAVs from three or more viewpoints.

***Key words*** Wave overtopping, UAV, Stereo vision, 4-D measurement, Camera pose estimation, Spatial resolution