

UAV（マルチコプター）を使用した画像相関法による消波工計測の適用

株式会社アスコ 技術開発担当部長 楠本 博
 東北地方整備局 仙台港湾空港技術調査事務所
 技術開発課長 佐藤 和敏

1. 始めに

全国の港湾には総延長約 240 kmにおよぶ消波工がある。現在消波工の水中部の計測は、ナローマルチにより立体計測が可能となっているが、気中部については人間が消波工の上に乗し、高さや長さの測定を行っている。人間による計測は消波工の雑多な形状と空隙があることから、転倒、転落の危険を伴っている。また、足場の悪さから、多くの測点を計測することは安全上困難であり、消波工の沈下変動現象の解析のための把握が難しい。このために安全で容易な計測方法が望まれていた。近年、人の立ち入りが困難な崖崩れ箇所や橋梁点検などを UAV によって行う技術が急激に進展してきている。本資料は、平成 26 年 8 月に株式会社アスコにより行われた、UAV（マルチコプター）を使用した画像相関法による消波工計測の試行を例に、施工性、作業能力、アウトプット等作業の概要、作業の留意点について、港湾技術者の理解の一助とすべくとりまとめを図ったものである。

2. UAV による各種計測方法の特色

(1) UAV とは

UAV は、無人航空機を意味する英語 Unmanned Aerial Vehicle を示している。

UAV は、大別すると飛行機、ヘリコプター、マルチコプターに分けられる。マルチコプターとはローターが複数あり、ヘリコプターより操縦が格段に容易となっている。搭載重量は、飛行機、ヘリコプター方式が優れている。

なお、消波工計測は、車両にレーザースキャンを搭載し計測する MMS（モバイルマッピングシステム）での可能性もある。

(2) UAV 搭載の計測機器の特色

1) レーザースキャナ

数千万点程度の大量のデータを短時間で得ることが可能。世界遺産等の建築物の画像取得にも利用されているほど高密度。但し、計器が高価で、5 kg 程度と重い。



レーザースキャン搭載のヘリコプター



レーザースキャン搭載のマルチコプター

2) 画像処理（ステレオ相関）

固定した、2 台のカメラの位置・角度を設定して、立体画像を得る。航空写真測量と同じ原理。

3) 画像処理（画像相関）

元々は、変形前後のランダムパターン画像を比較し、物体表面の相似点をマッチングさせる手法である。これを利用し、1 台のカメラで撮影した移動毎の写真から立体画像を得る。カメラ 1 台の搭載で済むので軽量化が図られる。画像間の補正は写し込む特異点を標定することで行なう。地形により異なり、消波工の計測はフラットであるので 200m 程度毎（急峻な地形では 50m 程度毎）に港内、港外の“標定”を行う。

3.画像相関での解析方法

(1) 画像相関法解析に利用するソフトウェア

ここでは特徴的な 2 つを紹介する。解析時間は長いが密度は高く点群データで表示できる“Smart3D”と、密度は低いが、汎用的データフォーマットでの出力が可能で、解析時間も短い汎用的な“フォトスキャン”がある。作業は、両ソフトウェアともに全自動作業であり、人力作業は不要である。

1) フォトスキャン（画像相関法）

画像選択→特徴点の抽出（点群データ作成）→調整点での補正→TIN（立体三角網）データ作成→テクスチャ貼り付け→オルソ画像補正→オルソ出力→図化作業（平面図）

縦断面図及び横断面図は点群データ出力後作成可能。出力フォーマットは、las データ（x,y,z,包括データの.CSV フォーマット）や pts（点群）データなど、が可能。また、断面図は CAD 出力可能。Smart3D に比べて廉価。

2) Smart3D（画像相関法）

処理方法は、先のフォトスキャンと基本的には同じである。ただし、点群がより高密度のため、オルソ画像を貼り付けた場合、より滑らかな表現が得られる。一方、容量が大きいため、低スペックのパソコンでは、簡単に図化編集等に使用することは難しく、場合によっては動作しないケースもある。さらに、大きな特徴として、Smart3D は TIN を生成せず、高密度の点に直接、色を着けて表現出来る機能があり、高性能のパソコンではかなり細やかな立体画像を見ることが可能である。費用はかなり高額となる。

(2) フォトスキャンでの断面図の作成方法

フォトスキャンによる断面図の作成には、2 つの方法がある。

- 1) 点群データを横から透視しつつ、CAD 上で人がトレースする方法。事前に横断線を中心に数十センチの幅の点群だけにカットしておくことが必要。経験を活かした断面図を描けるため、一般には再現性は高い。

- 2) TIN データを面データとして自動で断面を作る方法。断面図はすべて自動で素早く描画できる。事前に機械的な点群のフィルタリングを行っておく必要がある。点群データの使用に較べて再現性は落ちる。

4. UAV（マルチコプター）を使用した画像相関法による消波工計測の試行結果

(1) 試行の仕様

試行は、平成 26 年 8 月 4 日 9:50-11:10 仙台塩釜港仙台港区沖防波堤上約沖側 350m 区間を対象に実施。風向風速は、東南東 1.4~1.8m/s（仙台）、東南東~東 2.1~2.3m/s（塩釜）、有義波高 0.7m 周期 9.5S 波向き SE（仙台新港）。

使用機器は、搭載重量には劣るが、操縦性、可搬性、離着陸性に優れた、マルチコプターを使用し、計測方法は、必要とされる精度がそれほど高くないことと、比較的小型の UAV で実施できる様、軽量化を考えて 1 台のカメラで立体データの作成が可能な画像相関方式とした。使用したカメラは、画素数 24MB（通常のデジカメは 12MB）で、分解能は 50m 離れて約 1 cm のものを使用。解析ソフトは、密なデータを求めない消波工の計測であること、CAD として扱えるデータであること、容量が小さいこと、解析時間が短いことから“フォトスキャン”によった。

(2) 現地作業

1) 作業フロー

機材積み込み

防波堤へ移動

機材積荷卸し

機材防波堤パラペット上天端へ移動

標識セット

UAV準備（モニターセット、稼働確認）

計測（着離陸、BAT交換）

対空標識、検証点観測

標識回収

機材積み込み



船舶への機材の積み込み



離陸中の UAV



対空標識、検証点観測

乗船場へ移動

機材荷卸し

2) 作業能力

東南東、風速 1.4～2.3m/s での試行の実績を基に一日当たりの能力を想定すると、往復の時間を 1 時間として、実質的に 6 時間程度の測定、標定作業を行える。この場合 1.200m 程度の延長の測定が可能である。しかし、風速上昇による能力の低減は不明である。

〔内訳〕

機材の船舶へ積み込み（UAV & BAT、対空標識、GNSS（VRS）計測機器、トータルステーション、三脚、ピンポールセット）；10 分

防波堤への移動

機材準備；15 分

対空標識貼り付け（延長 400m@2 列＝6 点、検証点＝4 点）；20 分

空中計測（延長 400m@2 回）；10 分

対空標識、検証点観測：10 点（最低は 3 点）；VRS：40 分（当日はデータが補足できなかったため想定）或いは TS：40 分（過去の実績より）
（任意座標での観測）

標識回収；10 分

機材片付け；5 分

機材の船舶からの積み卸し；10 分

3) 作業の留意点

①マルチコプター離着場所

離着陸での、平場での必要幅は、離陸で 1.5×1.5m、着陸で 2.0×2.0m である。業務艇からの離陸は、人が手で支えていれば可能と思われる。着陸は、マルチコプター自体が揺れながら降下してくるため、船も揺れており突起物もあるので難しい。乱流を避けるため、プロペラのカバーがない場合があるので、人間に対しても危険である。

防波堤上の標定作業があるため防波堤へ上陸する必要があるため、防波堤上の離着陸とした。

②マルチコプターの飛行操作

予め飛行ルートを設定し GNSS での自動飛行とする方法と手動で操作する方法がある。航空法上の規定ではないが、不慮の事態を想定し目視飛行を原則としている。

手動では、モニターで撮影画像は見るができるが、マルチコプターの視認を主に操作を行っている。目視では 400m 程度までであれば、奥に飛行しているか手前

で飛行しているか判別できるが、400m 程度を越えて離れると判別不可能となるため、操縦者とモニターを移動する必要がある。試行では移動が伴わない約 400m の飛行とした。

③計測幅と飛行コースの設定

高度：撮影幅は、ほぼ 1:1 程度の場合が多く、一定以上の解像度を維持するための飛行高度 50m では、50m 程度の計測幅となる。延長方向の計測は往復での 2 回を標準と考える。これに陸・海にシフトしたコースの追加や飛行回数の追加によって、消波ブロックの凹凸の陰の再現性向上や精度の向上が図られる。

試行では、高度 50m で、防波堤中心上空を 1 往復（同一測線 2 回観測）とした。

④標定

標識は、白抜き円に十の線が入った A4 版のプラスチック板であり、ガムテープで留める。写真の傾斜や、画角周辺のゆがみを補正するのに使用。消波工計測の場合は延長約 200m 毎に港内側、港外側に設標し、各標識の位置を正確に測定する。この精度で解析の精度も左右される。測定が簡易な GNSS-VRS で測定を標準としているが、沖合では、VRS のサービス対象外の区域もある。この場合は、GNSS -RTK か TS 測量で相関関係の正確な測定と高さの関連付けで維持管理用の鉄 1 個所と更に法線の位置を求めるのであればもう 1 個所の維持管理用の鉄の測定を行う必要がある。



試行では、標識の測定を VRS で行うこととしたが、試行個所が補正データの地域外であり計測ができなかったため、別の計測データから推測して求めた。

⑤使用したマルチコプターの作業条件

波高は、当日は防波堤の内側では有義波高 30cm 程度のため、問題なく荷の受け渡しができた。

機器は雨にはかなり弱く、また、水滴等の影響で取得される画像が使用出来ない。

風速は、作業に大きな影響をあたえるが、平均風速 5m/s（瞬間最大風速は、平均風速の 2 倍弱）まで、瞬間最大 8m/s を超えると風下へ流されるとされているが、帰着位置をプリセットし、自動航行に切り換えることで風の強弱の間に帰着できる可能性が高くなる。当日は事前の座標入力を行えなかったため、自動航行の設定は行わなかった。

(2) 解析作業

TIN（立体三角網）のピッチについては、ともに防波堤上部工水平場部分の狭い箇所では 10cm 程度、広い箇所では 30～50cm 程度になった。消波工ではだいたい 10cm 程度となった。よって断面図を作成しようとすれば、一直線上の前後 10cm 程度内の TIN を拾って処理を行うこととなる。また、消波工の穴の部分は、エラー値とならないで両端の値からの類推値を作成する場合があった。

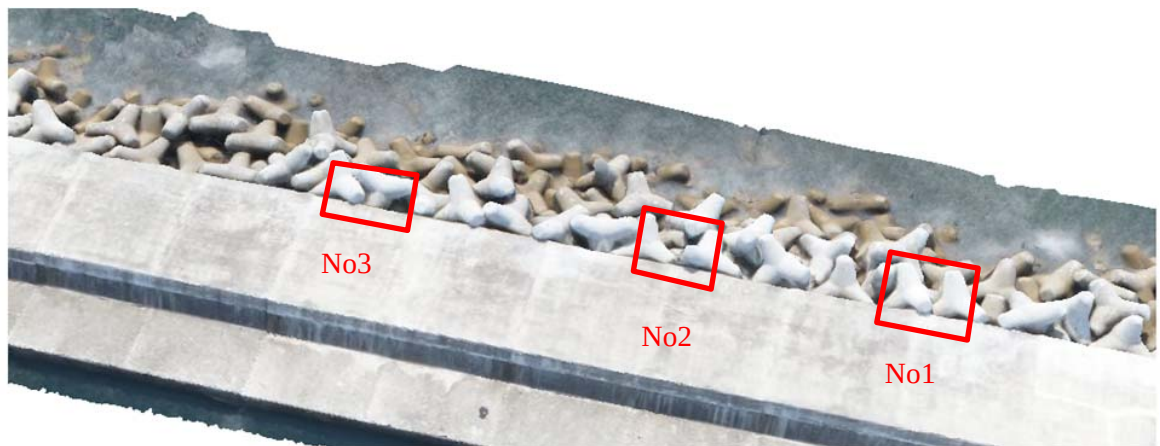
5.精度と再現性

標定の精度を x, y, z 1cm 以内とすると、画像相関の精度は、 x, y, z とも $\pm 10\text{cm}$ 程度以内とされている。実際の計測結果では $\pm 30\text{mm}$ 以下の場合も多い。また、試行では、個々の標識の直接測定を行わなかったため標定の精度は不明だが、同じ範囲を 3 回飛行して上部工の高さを求めた結果はつぎのとおりであった。

2 回目と 1 回目の差 7 cm 程度、3 回目と 1 回目の差 27 cm 程度、3 回目と 2 回目の差 20 cm 程度。

“フォトスキャン”による立体画像と消波工を撮影した画像との比較を下記に示す。オーバーハングの下の方について誤差が大きい。No.2 の穴の中の消波工の頭の反映は 30～50 cm 程度のズレが見られる。

また消波工のエッジは、丸く膨らむ様に表現されている。消波工の股の部分は立体画像に滲みがないことから、測定精度は高いと思慮される。全体的には、消波工の形状の特徴を反映していると思慮される。



No.1 立体化画像



実画像



No.2 立体化画像



実画像



No.3 立体化画像

実画像

6.作業の留意点

(1) 標識測定方法

標識の位置測定に、一般的な GNSS- VRS を考えた場合では沖合が補正データ作成区域外の場合がある。事前に確認し、GNSS-RTK 計測や、点間の相対位置の TS 測定と座標値、標高が設定されている管理鉾の測定（高さの照合に 1 点、更に法線の照合のためには 2 点）を合わせて行うなどの測位計画を設定する。

(2) 強風時の UAV 回収のための準備

風が強くなった場合の UAV 回収に備え、自動航行の機能により風の強弱の合間に帰着できるように復帰座標位置を事前に入手し、UAV のコントローラのパソコンへ設定する。

(3) 成果物の様式指定

アウトプットは多種あるため目的に合わせ、CAD 図作成に使用できる x, y, z 値を持つ CSV ファイルや、オルソ図、3D 画像、断面図等を指定する。

7.まとめ

防波堤の消波工の計測は飛行障害物がないことから飛行が容易であった。今回の試行をみると UAV を使用した画像相関法による消波工計測は、危険な人力作業に替わる計測方法としての可能性は確認できたが、課題としては、精度の検証と作業可能条件の明確化が挙げられる。