

研究成果報告書

研究開発課題名	センシング技術を活用した農業水利施設の点検効率化技術に関する研究開発
研究総括者	国際航業株式会社 大石 哲
研究開発組合	・ 国際航業株式会社 ・ 扇精光ソリューションズ株式会社
試験研究機関	・ 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究部門 ・ 公立大学法人 秋田県立大学

1 事業の実施内容

1. 1 事業の背景及び目的

1) 事業背景

全国の基幹的な農業用水路の約 5 万 km のうちトンネル、サイホン、パイプライン等の管路を除く約 3.5 万 km 以上が開水路である。また、約 1.4 万 km の海岸保全施設のうち約 1,600km を農地海岸として農村振興局が所管している。これらの農業水利施設は、戦後の高度経済成長期に整備されたものが多く、現在老朽化のピークを迎えている。また、海岸保全施設についても、多くは伊勢湾台風（昭和 34 年）等による大規模な高潮被害等を契機として整備された施設が多く、築後 50 年以上経過した施設が今後 20 年で急増し、施設の老朽化が急速に進行することが指摘されている。

一方、農村部では、農業水利施設の整備や農業機械の普及などにより農作業は飛躍的に効率化され、農業からの他産業への労働力の供給という当時の社会的な要請にも応えたが、農村から都市への人口流出をまねき、経済の成長とともに都市は肥大化し、農村の人口は減少の一途をたどっている。さらには、農産物の自由化やライフスタイルの変化に伴い、日本の食料自給率は先進国の中でも最低ラインになるなど、産業としての農業は低迷期を迎えている。

したがって、農業水利施設は、地域の全員で保守・修理していた江戸～明治時代とは比較にならないほど高度化・大規模化している一方、それを管理する農家は減少し、管理費や修理費の負担は年を追うごとに増加する傾向にある。さらに多くの農業水利施設が耐用期間の終盤にさしかかっており、官民連携によるストックマネジメントの導入は必然の課題となっている。

2) 事業目的

農業水利施設は、食料生産基盤としての機能だけでなく、地下水のかん養や高潮・洪水防止等の多面的機能を有し、国民全体に便益をもたらす社会共通資本となっている。これら施設の相当数は戦後集中的に整備されてきたことから、老朽化の進行とともに、近年、更新を必要とする時期を迎える施設が増加してきている。この増加する更新需要に対して、施設の長寿命化を図ることにより、財政負担を平準化しつつ、施設の有効活用を図ることが不可欠となっている。

そのため、農業用水利施設の現状を把握することは喫緊の課題であるものの、海岸堤防は表法・天端・裏法の 3 面を有しているため、調査員による目視作業の効率が悪く、1km/日程度の調査延長となる。開水路では管理用の通路が併設されていない場合、徒歩での調査が難しい。また、目視調査は見落としや調査員の力量の差による調査結果ムラがあるなどの問題があり、調査方法の改善が切望されている。

このため、今後は、ストックマネジメント事業の基本である日常・定期点検結果から有効な施設劣化の進行状況を安価に効率的に把握できるシステムが必要となる。

したがって本事業では、今後の技術躍進が期待できる移動体計測、その中でも、無人飛行機（以下、UAV：Unmanned Aerial Vehicle）に搭載したデジタルカメラ等と、二次期の結果から精密に変状抽出する技術を融合することで、膨大な施設の損傷を把握する一次点検手法の効率的で高精度な点検手法の開発を目的とする。

また、UAV に搭載するセンサーは、今後の技術革新にて機能向上も見込まれることから、施設点検の更なる高精度・高精細・低コスト化等への検討も試みる。

1. 2 事業の内容及び実施方法

本研究では、UAV にデジタルカメラ並びに GPS を搭載し、点検の対象となる農業水利施設や海岸堤防の近傍を移動しながら施設の外面を撮影することによって、施設の変形等の変状を把握するものである。

（1）センシング手法の確立の研究開発

UAV を用いた画像及び三次元データによる変状を把握できる計測手法を開発する。

【目標】形状把握の精度は、コンクリート面の凹凸が 5～10 mm、水路底や天端の標高が 10 mm 程度を検知できるものを目標とする。

（2）変状抽出機能の開発の研究開発

画像解析技術を応用した変状判定や 2 時期比較を行うことにより変状を把握する解析処理ソフトウェアを開発する。

【目標】フィールドで取得した計測データをもとに、変状を自動検出することを目標とする。

（3）実証試験

農業水利施設のうち海岸堤防および用水路の実証試験を通して、上記で開発する施設点検の手法や機能について妥当性を検証する。

1. 3 事業着手時に想定した技術的問題点への対応

技術的問題点	対応
UAVで撮影した画像データは、機器性能や撮影手法により、施設外面の撮影や位置の情報精度が異なるため、対象とする施設や地物の沈下、隆起、たわみ等の変状に即した計測手法を選択し、適用することが必要となる。	UAVで実証試験を繰り返し行うことにより、点検に必要な目標精度を満足するためのカメラの画像解像度や飛行高度、焦点距離を検討し、適用性を検証した。 また、計測するための計測準備から計測結果を解析するまでの手法を整理し、UAVを使った点検を行うための「農業水利施設及び海岸保全施設のストックマネジメントのための無人航空機（UAV）の活用の手引き」（以下、技術手引き）を作成した。
一般的な変状検出は、2回の異なる時期に撮影した画像を用いて、二次元（平面）の変歪補正により実施している。しかし、今回対象とする海岸堤防、用水路の歪みや形状変化などの微細な変状解析では、2 時期の撮影諸元の違い（撮影場所や被写体までの距離、向きなど）から生じる画像歪み、倒れこみによるオクリュージョン（影となる部分）などが精度に影響を与える。このため、本研究では、2 時期の画像上で位置を正確に重ね合わせる技術を開発することが必要となる。	UAVにより撮影した画像データをもとに SfM ソフトウェアを利用して三次元モデルを作成し、2 時期を比較するためのソフトウェアを開発した。 この対応策としては、今回取得した高精度の画像や三次元データを用いて施設の三次元モデルデータを生成し、現実空間に位置するデータと現地結果を立体的に照合することを実施した。 さらには、最終目的である三次元データによる変状の自動検出を可能にするために、以下の検討を実施し、撮影諸元による誤差要因の除去、変状の自動抽出結果の妥当性を検証した。 ・精度の高い三次元モデルデータの生成手法の開発と検証 ・画像群によるマッチング手法で取得した三次元点群データとデジタルカメラの画像データから、変状の種類と程度を自動的に抽出するための、データ処理手法・手順の構築および実装並びに有効性の検証

1. 4 事業の実施体制

(1) 研究開発組合内の役割分担

研究開発組合の役割分担は、主に国際航業が運営全般を行い、扇精光ソリューションズが変状検出機能の開発を行った。

(2) 試験研究機関と研究開発組合の役割分担

農村工学研究部門および秋田県立大学は、これまでの農業水利施設及び海岸保全施設の維持管理技術に本事業で新たに開発する技術を反映させ、アセットマネジメントとして適切に体系化するための指針作りの経験を踏まえ、技術が確実に利用可能なものとなるよう、実証実験から技術手引きの作成まで事業実施主体に対して指導した。また、実証試験の八郎潟地区に精通しており、その計画策定から管理者との調整、さらには実験内容の指導を行い、円滑かつ効果的な実証試験の実施を支援した。

【役割分担】

◎：主体、○：担当を表示

個別研究テーマ	事業実施主体 (新技術研究開発組合)		試験研究機関	
	国際航業(株)	扇精光 ソリューションズ(株)	農村工学 研究部門	秋田県立大学
研究開発の計画	◎	○	○	○
センシング手法の確立	◎	○	○	○
変状検出機能の開発	◎	◎	○	○
技術手引きの作成	◎	◎	◎	○
実証試験	◎	○	◎	◎

1. 5 事業の年度計画と実績

個別研究テーマ	研究内容	平成 26 年度	平成 27 年度	平成 28 年度
研究開発の計画	・リクワイヤメント(ヒアリング含む)の整理 ・フィールドの選定 ・研究開発計画書の整備	 		
センシング手法の確立	・第1回フィールドデータの取得(UAV、目視点検) ・施設ごとの撮影・計測手法の検討 ・計測センサーおよび撮影計測精度の検討 ・データ定義および仕様検討	 		
変状検出機能の開発	・各データの視認性確認(画像) ・第2回フィールドデータ取得(UAV) ・解析・精度検証(変状判定・2時期の比較) ・変状解析ソフトの開発・検証	 		
技術手引きの作成	・技術手引きの作成			 
実証試験	・変状の見られる地域、従来点検の実施地域	 	 	 

注)  は計画、 は実績。

1. 6 研究開発の概要、結果、課題等

1.6.1 研究開発計画

(1) 概要

本研究を実施するにあたり、現状の課題を抽出しその原因とニーズを整理した。また、これらニーズから、本研究開発で対応可能な範囲を抽出し要求事項としてとりまとめた。

(2) 結果

1) 開水路

課 題	ニ ー ズ	本研究での対応	要求事項
1-1. 施設延長が長く、全体を把握出来ないため、機能不全の場所を適時補修している 1-2. 沈下による小用水路の被害が多く、把握しきれない 1-3. 比較すべき情報がない	・損傷結果の蓄積 ・人に依存しない調査結果の作成 ・安価な調査方法 ・損傷状況を受け付ける仕組み	△定期点検の蓄積により、経年変化の比較が可能 ×損傷状況をストックする仕組み	過年度と比較可能な形式でデータを保管
2-1. 管理施設が多く、全部を確認できない	・全体を俯瞰できる航空写真	○200m 程度の高度からの撮影により俯瞰できる程度を把握	緊急時に、全体を俯瞰できる撮影方法
3-1. 全数調査ができない 3-2. 施設そのものの劣化だけでなく施設の沈下が課題 3-3. 土堤の調査規準がない 3-4. 人によりレベルが異なる可能性大(過年度の点検結果と比べると、評価がおかしいところ有り) 3-5. 改修後のモニタリングも課題	・安価で画一的な調査手法 ・沈下の計測マニュアル ・土堤の管理マニュアル	○低空飛行による大量の調査結果の整備 ○調査結果から、沈下の状況(たわみ具合など)を判読 ○調査結果から、比較可能な画一的な調査結果を整理 ×土堤の管理マニュアル	調査結果の自動処理 沈下量の判読 2 時期の比較 画像のオルソ化 変状、変形の抽出 (ベクトル化)
4-1. ほ場と用水路の高低差を計測するのに苦労している 4-2. 修繕ごとに、実測のコストが発生	・簡易な計測手段の確立	○調査結果から、圃場と水路の高低差を計測(絶対的な位置精度の必要性は、確認事項)	高低差の判読ロジックの整理

2) 排水機場、防潮水門

課 題	ニーズ	本研究での対応	要求事項
5-1.不可視の場所、協議が必要な場所における調査には使える	・不可視箇所の撮影	○不可視箇所の撮影	不可視の調査において安全性を確保出来る撮影方法

3) ダム

課 題	ニーズ	本研究での対応	要求事項
6-1.ダムの洪水吐きの調査（足場設置費が高く危険）	・侵入危険箇所での撮影	○足場が困難な箇所での撮影	不可視の調査において安全性を確保出来る撮影方法
6-2.河川との協議が必要な箇所の調査（河川協議が不要メリット）	・ダムの堆砂量の把握	×撮影結果からの堆砂量の把握	撮影高度と3D モデルの精度検証 安全な遠隔地の撮影
6-3.ダムの堆砂量の把握	・遠管地の管理	△水抜き後の撮影による堆砂量の把握	
6-4.遠管地の管理（現場に行くのが大変）		○自動飛行による遠隔地の撮影	

4) 海岸堤防

課 題	ニーズ	本研究での対応	要求事項
7-1. 海側の洗掘箇所は管理出来ていない	・不可視箇所の撮影	○不可視箇所の撮影	不可視の調査において安全性を確保出来る撮影方法 画像のオルソ化 変状、変形の抽出（ベクトル化）
7-2.全体の劣化状況の把握		○調査結果から、比較可能な画一的な調査結果を整理	

ヒアリングの結果、UAVによる撮影は、開水路だけでなく排水機場やダム、海岸堤防など複数の施設でニーズがあると判明した。

しかし、本研究開発では線的施設を主体とし、開水路と海岸堤防で検証を行うものとした。

1.6.2 センシング手法の確立

(1) 農業水利施設の効率的な計測手法について

UAVの計測手法については、複数の時期かつ異なる開水路および海岸堤防における実証実験の結果から、農業用水利施設の効率的な撮影方法を整理した。

- ・大規模な水利施設（海岸堤防）は、50m程度の高度で鉛直撮影を実施する。
- ・幅 5m 以下の小規模な水利施設（開水路）は、GPS の位置精度や風などの影響から、低空飛行(10~20m程度)の鉛直撮影のみでターゲットをとらえることは困難である。低空飛行（10~20m 程度）の鉛直撮影では、水路の壁面のような直壁を撮影することができない。
- ・上記の事から、5m 以下の小規模な水利施設は、斜め撮影が効果的である。
- ・ただし、低空飛行での斜め撮影の場合、草の陰に隠れ標定点が見えないことが考えられるため、撮影高度を上げた複数高度の撮影を併用することが望ましい。

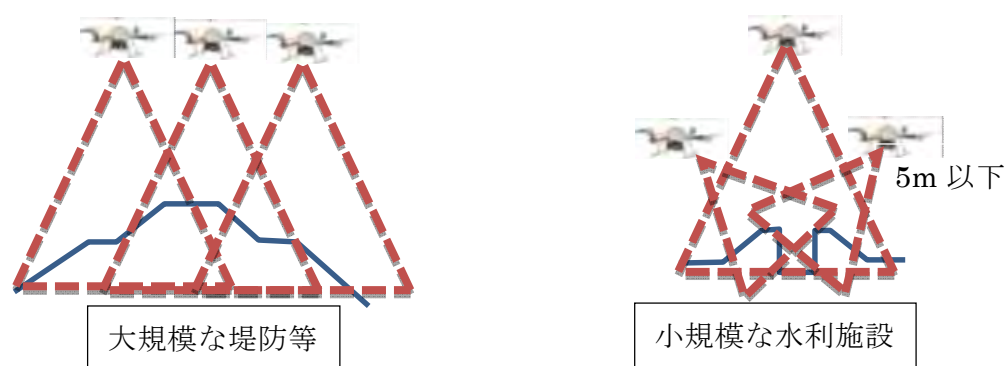


図 1-1 農業水利施設における計測手法案

(2) UAVで取得したデータで計測出来る農業水利施設の調査精度

本研究開発では、UAVで取得した写真（画像）とそれをもとに作成する三次元モデルを整備することで、農業水利施設を局所的かつ俯瞰的に調査することが可能であることが判明した。

【海岸堤防】

- ・100m ピッチで基準点を設置し 25~50m 程度の標高で撮影することで、標準偏差 2cm 程度の誤差でモデル全体の整備が可能となり、堤防全体の変位や変形が俯瞰できた
- ・標高 25m で撮影した写真からは、1mm 程度のひび割れや剝離・損傷等を観測することも可能であるため、一次点検を効率的に実施することができた

【開水路（コンクリート製）】

- ・海岸堤防に比べ小規模となる一方で、長期的な通水性を確保するために、詳細なひび割れや変状の取得が必要となる
- ・高度 10m 以下で 35mm 以上の焦点距離のレンズを用いることで、長期的なストックマネジメントの検証に必要なひび割れ 0.2mm を判読することが確認できた

本技術は、用途に応じた適切な撮影を実施することにより、広域かつ整備延長の長い特

質をもつ農業水利施設において、効率的かつ効果的な点検を可能とすることが判明した。

(3) 課題

UAVで取得したデータの農業水利施設への優位性が検証出来たものの、①UAVの安定した飛行方法の確立、②取得したデータの格納手法、③閲覧ビューアの整備、④判読作業を効率化させるための画像解析手法等の課題があり、土地改良区の職員や地元の農業コンサルタントが利用出来るような技術検証（技術活用的一般化）を行う必要がある。

さらに、UAVの優位性がより発揮できる「人が立ち入ることが困難な農業水利施設（頭首工、ダムなど）」を対象に、点検の領域を広げた検討も必要であるとする。

1.6.3 変状検出機能の開発

(1) 概要

変状抽出機能の開発では、複数時期の三次元形状データを正確に位置あわせすることが重要である。本開発では、位置あわせの手法として、ICP（Iterative Closest Point）技術を採用し、機能開発を実施した。

(2) ICP (Iterative Closest Point)

i) 概要

ICP アルゴリズムは、位置合わせの初期値を既知とする初期値からの非線形の誤差関数の最小化手法のひとつであり、1992年にマッケイらにより提案された。三次元形状の位置合わせの基本的な手法として広く知られている。三次元形状の位置合わせに用いられる手法としては、その他に以下のようなものが知られている。

- モーメントやフーリエ変換などの大局的特徴量を利用した手法
- SIFT (Scale Invariant Feature Transformation) などの局所的特徴量を利用した手法

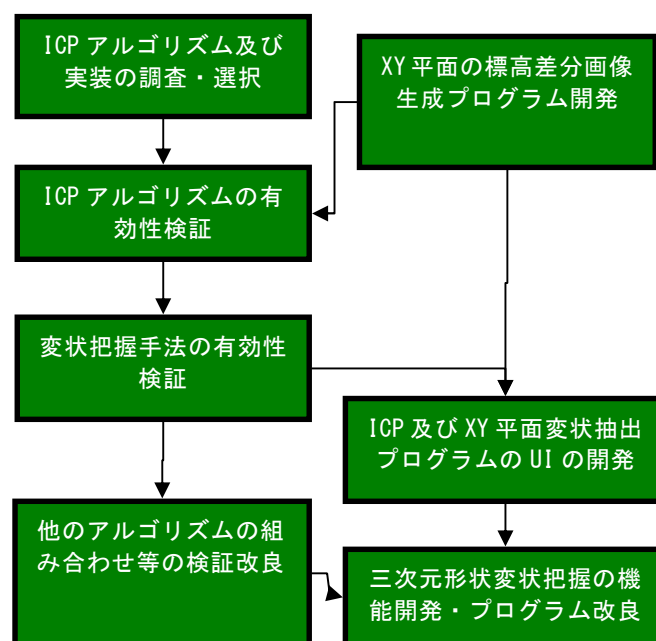


図 1-2 変状抽出機能開発の概要

ii) ICP 選定の主な理由

三次元形状データの相対関係が未知である場合には、局所不変特徴量を利用する手法が一般的である。現在では、SIFT またはその派生的手法を用いられることが多い。

本研究では、三次元形状データの相対関係は GNSS や標定点等により大まかに既知であること、また特徴量を利用する手法は一般に演算量が大きいことを理由として、ICP を適用した。

(3) 変状抽出の結果

本研究開発にて作成した変状抽出ソフトウェアを用いて、2 時期の変状抽出を検証した。本変状抽出は、図 1-3 に示すような発泡スチロールで作成した簡単な模型を海岸堤防の天端に設置することで、その精度を検証した。



図 1-3 模型実験の概要

変状抽出の結果、3 種類の模型のうち高さが 1cm 以下（図中の①）の模型は抽出が困難であったが、1.3cm 以上（図中の②、③）の模型では明らかに周辺との有意な差を抽出することができた。

本模型実験では、目標精度である 10mm の高低差を自動で検出した。

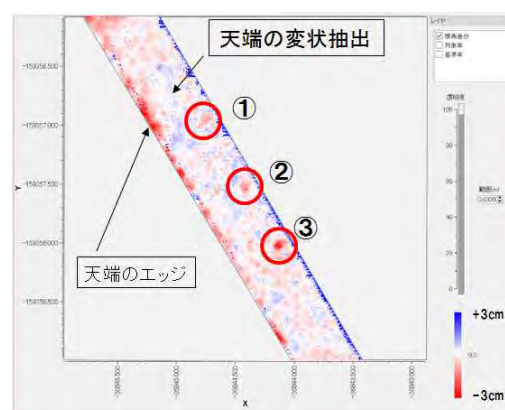


図 1-4 2 時期の変状抽出図（模型実験）

(4) 課題

解析処理に関する今後の課題は以下のとおりである。

- ・天端のエッジや垂直面では水平誤差が残存し、大きな変状となる。
- ・三次元データの収束計算のため、大容量のファイルの場合は分割処理が必要となる。

1.6.4 技術手引きの作成

実証実験の成果を参考とし、UAVによる農業水利施設の点検手法について「農業水利施設及び海岸保全施設のストックマネジメントのための無人航空機（UAV）の活用の手引き」を作成した。本書の利用者、利用の範囲および内容・課題を以下に示す。

【利用者】

- ・水土里ネットおよび点検調査会社

【利用範囲】

- ・農業分野における海岸堤防、水利用施設の写真測量、点検調査を対象

【内容】

- ・UAVを飛ばす際に必要となる事前準備と調整事項について
- ・施設に応じた具体的な撮影計画と操作時の確認事項、撮影後の品質管理について
- ・写真画像データを使った画像処理の種類と、その作成手法について
- ・施設点検に活用できる画像処理と確認方法について
- ・本研究で取得した調査事例について



目 次	
1.	手引きの目的と適用
2.	実施方針
3.	事前準備
4.	画像撮影
5.	画像処理
6.	画像処理による施設変状への活用方法
7.	調査事例

図 1-5 UAVによる「技術手引き」の表紙と目次

【課題】

- ・本書は、多くで実施した試験結果を整理したものであるが、UAVによる調査技術は目覚しく進展しているので、今後の実装に応じて、適宜、改訂する必要がある。
- ・また、本書は、UAVに搭載するカメラによる写真測量技術が適用範囲である。現在、UAVに搭載されているセンサーは、カメラ以外にレーザ計測、熱赤外、近赤外、ハイパースペクトルなどが注目されている。

1. 7 実証試験（現場適用）の概要、結果、課題等

1. 7. 1 実証試験の対象地区（図 1-6）

対象地区は、岡山県児島湾北7区にある海岸堤防および開水路である。海岸堤防は、築50年以上が経過している損傷のある施設で延長約500m、幅約30mの線上構造物である(a)。開水路は幅5mの矢板型のコンクリート構造で、左岸に高さ2～3m程度の灌木が2m間隔で存在する(b)。一方、八郎潟に位置する開水路は、支間の入ったコルゲート式矢板(c)と試験化施工によるコンクリート(d)で、両地区とも地上に灌木や支障となるものはない。



(a. 不陸のある海岸堤防) (b. 矢板に損傷のある開水路) (c. コルゲート開水路：A地区) (d. 試験化施工開水路：F地区)

図 1-6 実証試験の対象施設

1. 7. 2 使用したUAVシステム

本事業で使用したUAVは、国内のAmuse Oneself社製のα-UAV機（製品名）である。本UAVは、予めフライト情報を入力しておくと、GNSSの制御にて自動的な運航ができる機種である。機器の概観を図1-7に、UAV本体およびUAVに搭載したカメラの機器諸元をそれぞれ表1-1、1-2に示す。



図 1-7 UAV の概観

表1-1 使用したUAVの諸元

項 目	内 容
重量	3.6kg
大きさ	1.0m×1.0m×0.3m
ペイロード	3.5kg
飛行可能時間	20～40分
自動飛行範囲	水平:半径1,000m、高さ:300m未満
耐風性	約6m/s

表1-2 UAVに搭載したカメラの諸元

項 目	内 容
製品の名称	パナソニック社製 DMC-GX7
重さ	489g
焦点距離	14、20、25(mm)
カメラ画素数	1、684万画素

1. 7. 3 撮影実数

本事業で実施した撮影の実数は表 1-3 のとおりである。

表 1-3 実証実験による撮影の数量

地域	場所	撮影高度 (m)			解像度(mm)			カメラ向き		観測数		備考
		10	25	50	2	4	8	直下	斜め	1方向	2方向	
児島湾	海岸堤防		○	○		○	○	○			○	
	開水路	○			○				○	○		
八郎潟	開水路A地区	○		○	○		○	○	○	○		
	開水路F地区	○		○	○		○			○		

1.7.4 事業の結果及び考察

(1) 施設毎の撮影手法の検討

1) 開水路における斜め撮影手法

開水路は、水路幅が 2～5m と狭いので、低空飛行（高度 10m 程度）から垂直で撮影する際には水路を撮影するのが困難な場合がある。これは、風や GNSS の精度の影響で UAV 機体が計画コースを外れるのが原因である。加えて左右の壁面の状況も撮影できない。

そこで、開水路では撮影エリアを広くするため斜め撮影手法を採用した。その結果、以下のことから、斜め撮影は低空飛行において有効な手法であると言える。

- ・斜め撮影は、垂直撮影に比べて撮影エリアが広いので、風の影響でコースを外れても開水路全域を撮影できる。
- ・また、壁面の対岸から正対した位置から撮影するので、壁面の形状を把握できる。
- ・ただし、UAV 機体の位置する壁は死角となるので全域を網羅するには左右両岸からの撮影が必要となる。



図1-8 八郎潟A地区の状況写真と斜め撮影による三次元モデルデータ

2) 海岸堤防における複数高度撮影（段撮影）

写真測量による測量精度を向上するには、1枚1枚の写真の位置と傾きを決定する空中三角測量の結果が影響する。空中三角測量は、写真に映る特徴点の数が多いほど隣接する写真間の整合が強化され、結果的に正しい結果を得ることができる。

高高度および低高度の2つの画像を図1-9に示す。低高度撮影の場合、写真に映る面積が小さい（狭い幅）ので地上に設置した、または自然に存在する特徴点（図中の黄色○表示）を写真に写すことができない場合もある。

一方、高高度の撮影の場合は低高度撮影よりも撮影範囲が広いので、撮影軌道を外れても対象物を含む特徴点を撮影することができる。このことから面的に安定した結果が得られると考えられる。

そこで、本研究開発では、海岸堤防において低高度撮影と高高度撮影の異なる高度を合わせた解析処理を行い、単一高度撮影の結果と比較した。比較は三次元モデルと水準測量との標高の較差である。

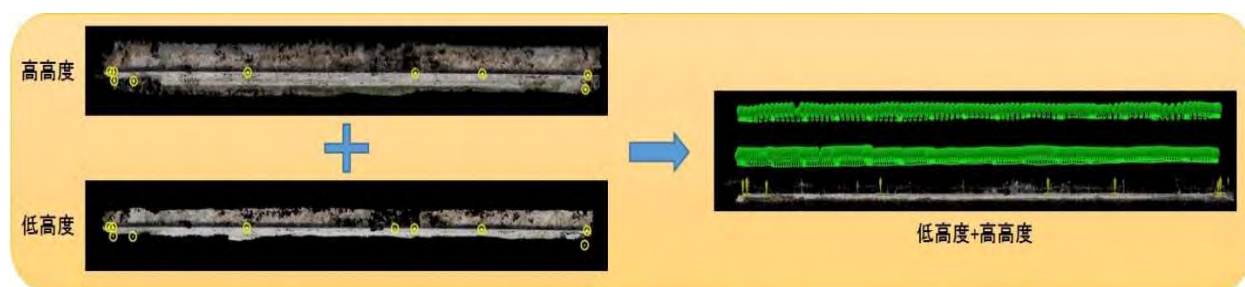


図 1-9 複数高度を統合する空中三角測量手法の概略図

- ・ 三次元モデルと水準測量とを対比した結果、較差の平均値で 32mm（単一：青線）から 26mm（複合：桃線）に、標準偏差が 34mm から 18mm にそれぞれ 20%、50%が改善した。
- ・ 特に、220m を挟む区間では、較差が全体的に 5cm 程度の改善が見られ、これが指数改善に寄与している。一方、50～100m の区間では、全体的に 3cm 程度が乖離しているが、これは理由が定かでない。
- ・ 複数高度手法により一部では精度劣化が見られるものの、全体的には標高精度の改善が見られ、本手法が有効であると言える。

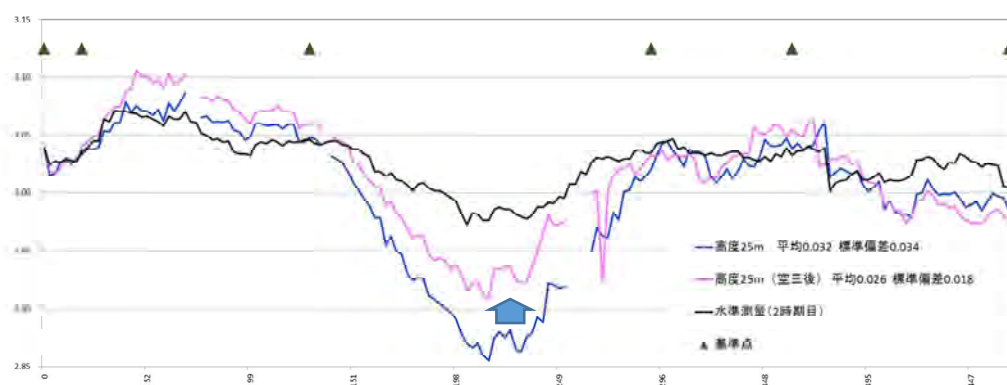


図 1-10 複数高度を統合した空中三角測量による三次元モデルの較差

(2) 三次元モデルの精度検証について

本研究開発では、三次元モデルを生成するために SfM ソフトウェアを利用した。SfM ソフトウェアは、図 1-11 に示すように、撮影場所や撮影方向、カメラ諸元などバラバラに撮影された画像を用いて、画像の重なり具合から上記の場所や方向、カメラ諸元などを推定して並び替え、対象物の形状を三次元位置情報 (X, Y、標高) として生成するソフトウェアの総称である。本研究開発で利用した SfM ソフトウェアは、Pix4DMapper (Pix4D 社) の製品である。

この SfM ソフトウェアから生成した三次元モデルは図 1-10 (2) に示す。

【SfM (Structure from Motion) とは】

動画や静止画等カメラの視点撮影した複数枚の画像からそのシーンの**3次元形状 (x,y,h)**と**カメラ位置**を同時に復元する要素技術。

参照: <http://www.cs.cornell.edu/~snave/bundler/#S1>



図 1-11 SfM ソフトウェアの概要

【実証試験で作成した 3 次元モデル例】



図 1-12 実証試験で生成した三次元モデルの事例

上記の手法に基づき作成した三次元モデルと水準測量の標高値において、検証した結果を示す。三次元モデルからの標高の読み取りは、下図 (中央) に示す点群データから計測した。

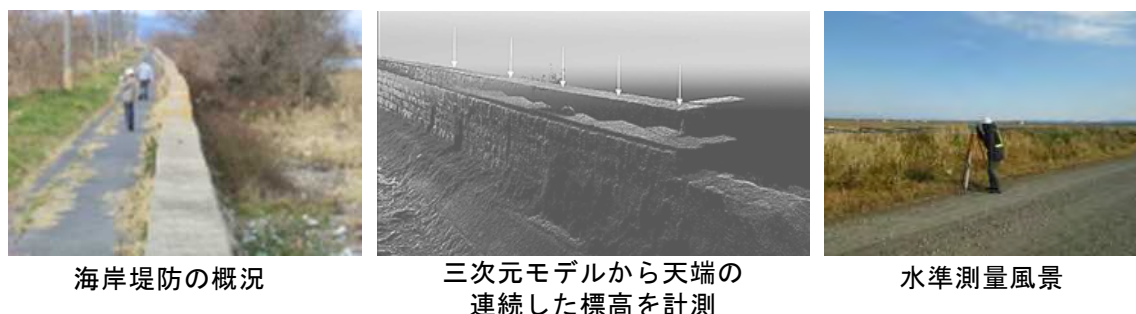


図 1-13 海岸堤防と各測量手法

1) 海岸堤防（児島湾）の解析結果（撮影高度 25m・50m）

UAVによる三次元モデルと水準測量との標高を照合した結果、三次元モデルの標高は、ほぼ 5cm 以内の精度で天端の標高を計測することができた。また、標高較差の頻度（図 1-14）から標準偏差（ 1σ ：約 66.7%相当）では、 $\pm 2\text{cm}$ 以内であった。

よって、本研究開発では、絶対値で 5cm 以内、標準偏差で 2cm の精度で標高を決定する手法を確立できた。

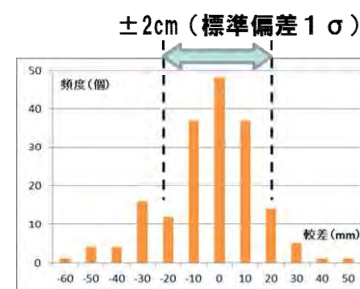


図 1-14 標高精度の頻度図

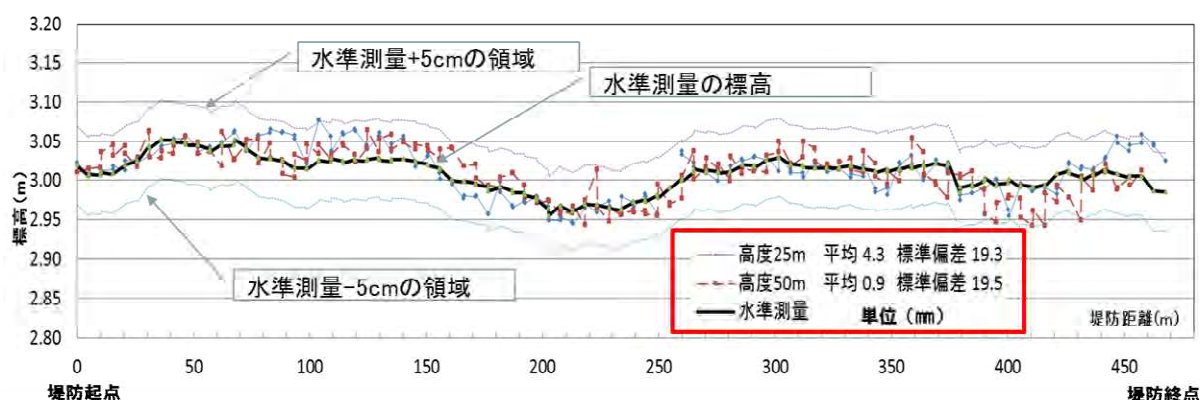


図 1-15 各実験で得た三次元モデルと水準測量との較差

2) 開水路（児島湾）の解析結果（撮影高度 10m）

UAVによる三次元モデルと水準測量の結果を比較した結果、図 1-16 に示すように右岸では水準測量と全体的に概ね一致しているものの、左岸では乖離 5cm 程度の S 字形成を報告した。乖離の要因として、左壁には樹木が並んでおり、用水路の右上空から撮影すると樹木が写真に写り 2 枚の画像によるステレオ視を不十分にさせていることを挙げられる。対象物との間に障害物を写さない撮影方法が必要である。



図 1-13 児島湾の開水路

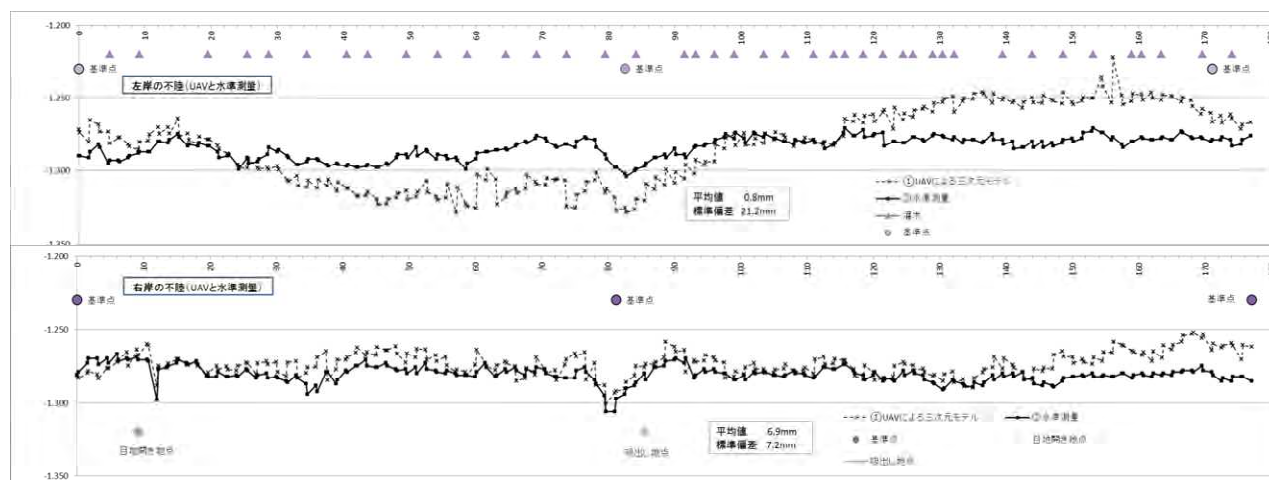


図 1-16 (上) 平成 26 年度三次元モデルと水準測量との比較（用水路左岸）
(下) 平成 26 年度三次元モデルと水準測量との比較（用水路右岸）

(3) 精度向上策の検討

1) 基準点の追加による精度評価

海岸堤防における精度検証では、一部でデータ欠測や大きな較差があるところがあった。これは、対象エリアに樹木が繁茂し堤防の上を覆っていたためと見られる。

そこで、図 1-17 に示すように、データ欠測部の周辺に基準点を追加して、再解析を実施した。

その結果、表中の処理前 — 線が、処理後 — 線となり、較差大の区間 は大幅に改善されている。また、その他区間でも水準測量の結果に近づき、全体的に改善されている。統計的な指数となる平均値は 33mm から 11mm に、標準偏差は 36mm から 10mm と双方の指数とも約 1/3 に軽減した。

この結果、基準点を配置することは有用な方法であり、目標精度にあわせた配点が必要になる。特に、上空の視通を遮る障害物（今回は灌木）があるような地域では予め基準点を配置しておくことが必要である。

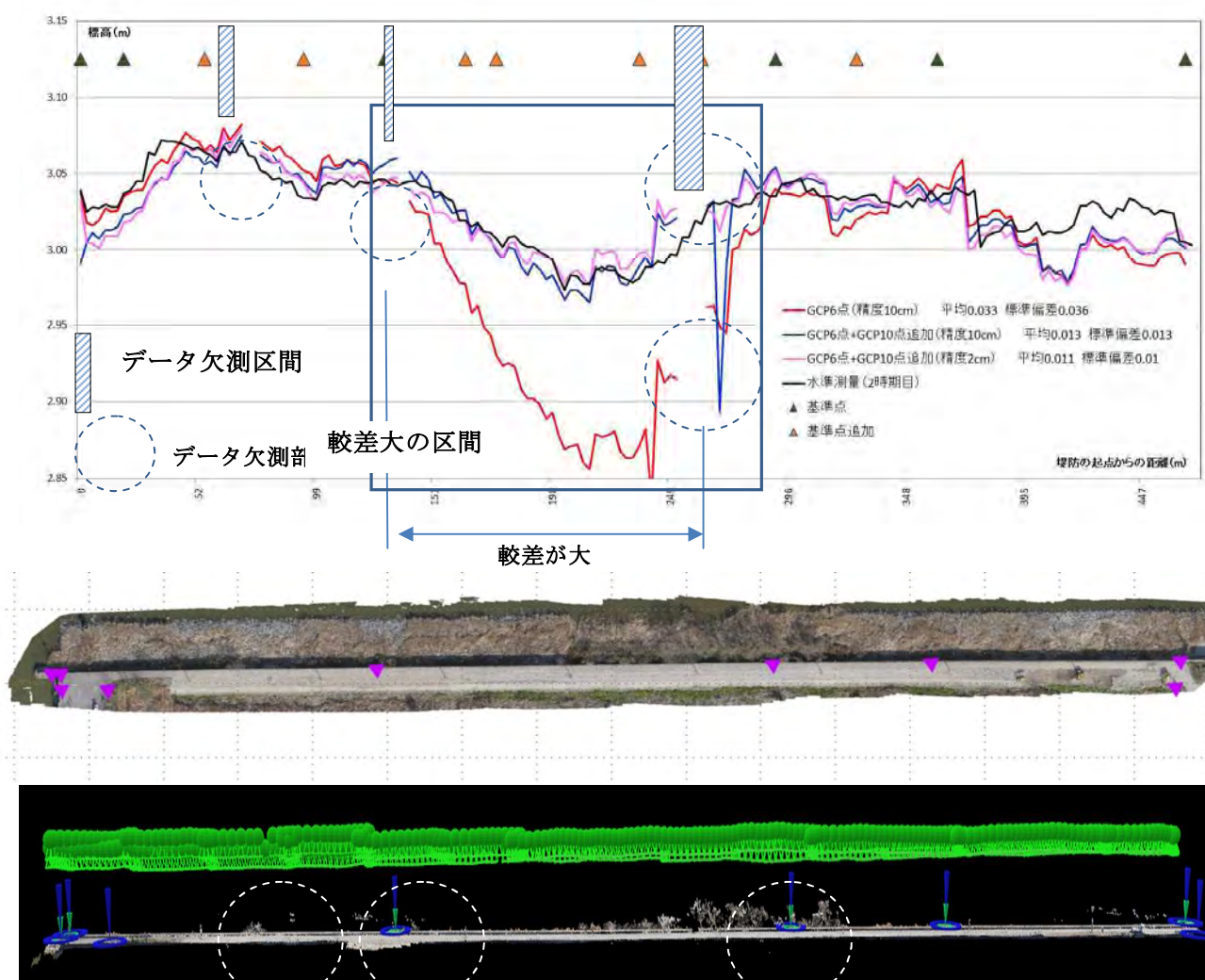
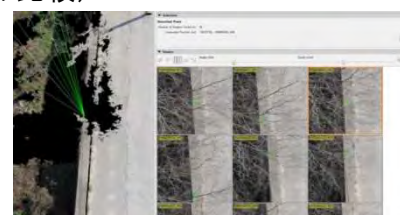


図 1-17 (上) 海岸堤防の不陸（高度 25m・50m、水準測量との比較）

(中) 上空から見たオルソ画像

(下) 側面から見た灌木の状況



2) 同一高度の複数撮影による三次元モデルの精度評価

同一の撮影高度となる複数コースを統合処理にて解析処理した結果と片道コースの解析処理の結果を比較した。

複数コースによる統合処理の結果、単数コースでの平均値は 14mm から 13mm に、標準偏差は 11mm から 12mm とほぼ同様の結果となった。

しかし、単コースの標高は、隣接間で乱高下する傾向が見て取れる（図中の桃線）。一方、複数コースによる統合処理（図中の青線）は大きな変化は見られず、単数コースに比べ全体的に滑らかな起伏を表現している。複数コースの統合処理では、隣接間の大きな差を軽減する効果は期待できる。

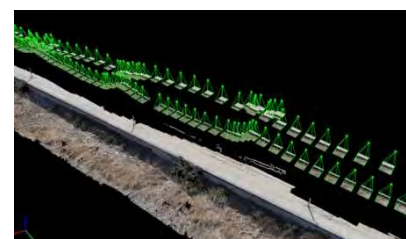
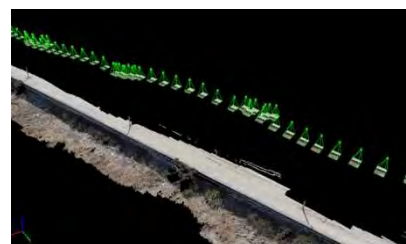


図 1-18 (上)単コース、(下)複数コース

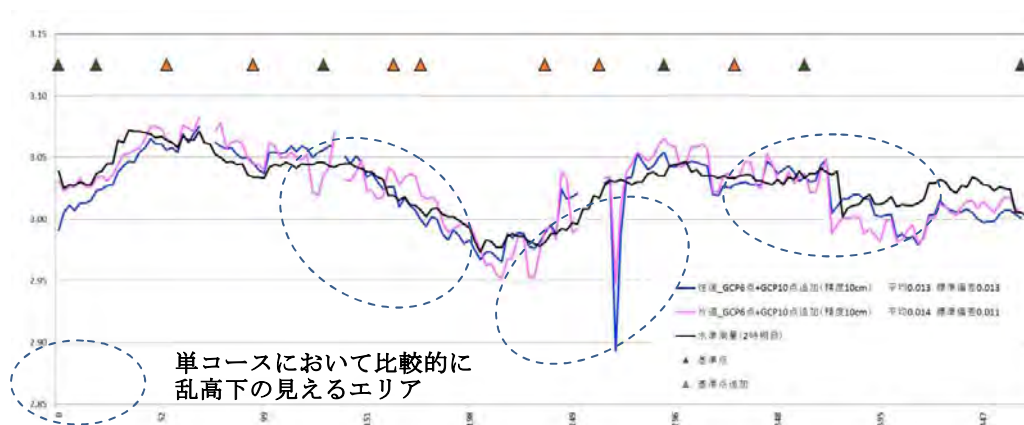


図 1-19 単数と複数コースによる不陸（高度 25m 三次元モデルと水準測量の標高の比較）