

自律飛行ドローンの船舶の検査・点検への活用検討

— 非GNSS環境かつ暗所における実証実験 —

徳永 純路*

1. はじめに

1.1 背景

近年、様々な分野において、ドローンなどのロボティクス技術の活用が活発化している。この動きは海事業界でも生じており、これら最新技術を用いた船級検査員による検査や船員による点検への有効活用に対する期待感が高まってきている。このため、船級協会としては、2018年1月にいち早く、船体構造の検査に対して遠隔検査技術（RIT：Remote Inspection Techniques）が活用できるようにIACS UR Z17を改正した。このような状況を踏まえ、日本海事協会でも2018年4月に「船舶検査におけるドローン使用に係るガイドライン」（以下、ガイドライン）を策定している¹⁾。ドローンを船舶検査に使用の際の適用範囲や手順、安全に運用するための技術的な注意点、並びにドローンサービス事業所に対する要件などをまとめている。貨物艙などの高所、狭所、暗所での検査にドローンを活用することで、検査の安全性、効率性、品質向上が期待されている。

ドローンの操作方法として、オペレーターが手動で操作する“マニュアル操作”と、周囲の環境をセンシングし、自己位置、向きを推定することで自律的に飛行する“自律飛行”の2種類あるが、ガイドラインでは、ドローンの運用方法は前者を対象としている。これは、船舶内の自律飛行ドローンの使用には、SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）等の技術が必要になるが、ガイドラインを発行した当時は、まだ技術開発段階であり、船舶検査に使用することは困難だと考えられていたためである。しかし、近年、技術開発が進んだことで屋内でも自律飛行できるドローンが登場しており^{2) 3)}、他業界では、屋内のインフラ点検や巡回警備での活用が検討されている^{4) 5)}。

1.2 目的

現状は、船舶内のような鋼板で囲われた環境では、GNSS電波が入らず、地磁気も安定しないため、マニュアル操作による船舶の検査・点検には、高度な操縦技能を有するオペレーターが必要となってくる。一方で、自律飛行ドローンでは、オペレーターの技

量に依存することなく運用できる。ただし、前述した通り、ガイドラインでは自律飛行ドローンを想定していないため、船舶検査に自律飛行ドローンを使用する場合の技術要件を作成する必要がある。

船舶内は非GNSS環境下であるとともに、暗所区画も多い。そのため、自律飛行に関する技術要件だけでなく、照明が備え付けられていない暗所であっても、検査・点検が行えることが重要な要件となる。したがって、暗所においても十分な品質の映像を撮影できるよう、照明の搭載、カメラの選定並びにチューニングも重要である。

また、近年では、撮影した映像を有効に活用するための技術開発も進んでいる。例えば、カメラ画像を3D点群データやオルソ画像に加工する技術は既に確立されており、こういった技術を有効活用することで、検査・点検の効率や品質の向上が期待される。

自律飛行ドローンの利用による利点を最大化するためには、既存の検査・点検スキームに固執することなく、柔軟な考えで活用することが重要となる。そこで、本会では、船舶内のような非GNSS環境下や暗所において安定して自律飛行するドローンに対する技術要件の抽出と、自律飛行ドローンを用いた際の船舶の検査・点検に適したスキームの研究を進めている。

本稿では、GNSSの代わりにカメラで撮影された映像から環境の3次元情報と機体の位置姿勢を同時に推定するVisual SLAM技術を用いた自律飛行ドローンを使用し、船舶内を模擬した環境下で飛行実験を行い（写真1参照）、非GNSS環境下及び暗所でのドローンの自動飛行性能並びに撮影品質を検証した結果について記述する。



写真1 資材置き場概観

* 技術研究所

2. 実験概要

2.1 使用したドローンと実験環境

GNSS電波に依存することなく、自己位置を認識する方法として、一般的に下記3つが挙げられる⁶⁾。

- ① 画像によるビジョンセンサを用いる方法
- ② LiDARなどのレーザー測距系を用いる方法
- ③ 外部からのセンシングにより位置情報を機体に送る方法

それぞれの方法における長所と短所を表1に示す。

表1 自律飛行のためのセンサの種類と長所・短所⁶⁾

	長所	短所
①ビジョンセンサ	<ul style="list-style-type: none"> ・安価 ・小型/軽量(小型化が可能) ・特徴があれば平面でも位置を特定可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・遠距離で精度が落ちやすい ・特徴点のない平面や水面の検出が難しい ・暗所に弱い
②LiDAR	<ul style="list-style-type: none"> ・特徴のない平面でも測距可能(大型の場合) ・長距離でも高精度 ・全周囲で3次元情報を取得可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・非常に高価 ・大型/重量(小型化が困難) ・連続平面で位置情報を取得しづらい
③外部からの測距	<ul style="list-style-type: none"> ・環境に合わせて精度よく情報を取得可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・設置のコストが高い ・ドローンとの通信切断で危険状態に

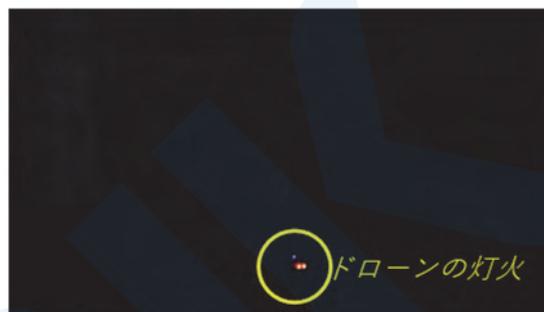
LiDARを使用したドローンであれば、船舶内のような環境でも自律飛行が実現できる。しかし、LiDARは非常に高価であるため、費用対効果が見えづらい状況においてはなかなか採用しづらい側面がある。そこで、本実験では、LiDARよりも安価に開発が可能なビジョンセンサとしてステレオカメラによるVisual SLAMを採用した自律飛行ドローンを使用した(写真2参照)。



写真2 ビジョンセンサを搭載した自律飛行ドローン

多方向のステレオカメラで取得した映像から特徴点を捉え、環境の3D情報と機体の位置姿勢を同時に推定することにより、機体の自己位置、向きを認識している。

なお、暗所ではビジョンセンサが機能しないことから、プロペラ下部には100Wの照明システムを取り付け、ビジョンセンサに必要な光量を確保した。照明の点灯前後の様子を写真3に示す。



(a) 照明装置点灯前



(b) 照明装置点灯後

写真3 照明装置点灯前後の様子

2.2 ドローンの自動飛行性能に関する検証

前述の通り、ビジョンセンサは暗所では機能しないため、ドローンに適切な照明装置を搭載し、周囲の特徴点を捉えられるようにする必要がある。そこで、実際に屋内の暗所にて100Wの照明システムを搭載した自律飛行ドローンを自動飛行させ、ビジョンセンサが有効に機能しているかを検証した。

本機体では、ウェイポイントを設定することで、その経路通りに自動飛行させることができる。今回は、図1に示すように2つの飛行経路を計画し、自動飛行を行った。なお、被写体との距離は実線の飛行経路は3m、破線の飛行経路は8mに設定した。

写真4にドローンが自動飛行している様子を示す。本実験を行った状況においては、非GNSS環境かつ暗所であっても、100Wの照明システムを機体に搭載することで、計画した飛行経路に沿って安定して自動飛行することを確認した⁷⁾。



図1 飛行計画



写真4 自動飛行の様子

遠くなるほど被写体に当たる光量が下がるため、距離が離れるたびにISO感度が上がり、ノイズが増幅される傾向がみられた。



(拡大倍率 : 380%)

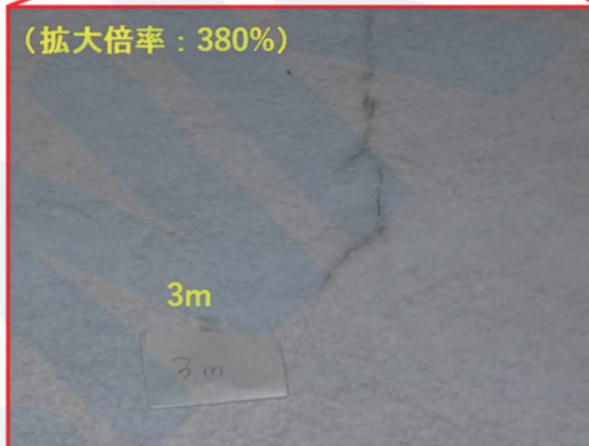


写真6 3mの距離から撮影した場合

2.3 ドローンによる撮影映像の品質に関する検証

本実験において、検査用カメラとして、2000万画素のSony UMC-R10[®]を使用した。ドローンの飛行中に撮影した画像を写真5に示す。矢印で示した箇所のき裂も十分に判別できている。

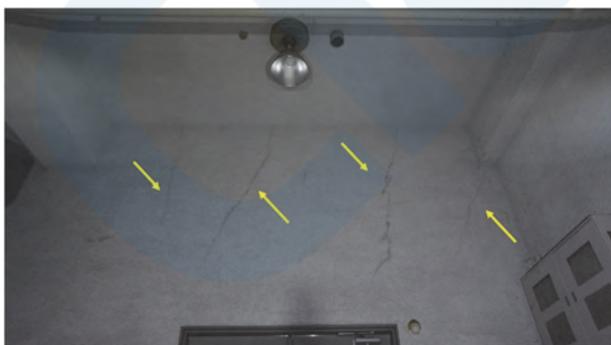


写真5 壁面撮影画像



(拡大倍率 : 560%)

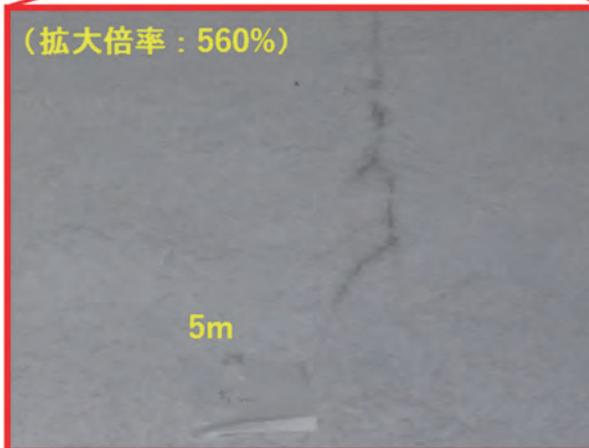


写真7 5mの距離から撮影した場合

本実験では、写真6～9に示すように、被写体との距離を最大10mまで離れたうえで撮影を行ったが、いずれの場合でもき裂の有無は確認ができています。なお、本実験のような暗所環境では、ドローンに取り付けられた照明が唯一の光源であり、当然ながら、



(拡大倍率 : 760%)

7m

写真8 7mの距離から撮影した場合



(拡大倍率 : 1040%)

10m

写真9 10mの距離から撮影した場合

2.4 ドローン撮影画像の有効活用に関する検証

2.4.1 3D点群データ及びオルソ画像の生成

自律飛行ドローンが簡単な操作で運用可能となれ

ば、検査・点検に必要な撮影情報を容易に取得することができる。例えば、船舶が沖待ちをしている時間を使って船員が自律飛行ドローンで貨物艙内部を撮影することも可能となり、その記録映像は有効な事前情報として活用することができる。また、現在では、記録映像から3Dデータを作成することを可能とする技術が既に開発されている。このような技術を活用すれば、効率的に貨物艙内部の状況を把握することが可能となる。

本実験で撮影した写真をSfM処理にかけ、撮影対象の3Dモデルを作成した。SfM処理とは、カメラで撮影した複数の画像から、それらの撮影位置を推定し、同一地点に対するそれぞれの画像の視差から対象物全体の3Dモデルを生成する技術である⁹⁾。3Dモデルの精度は画像のラップ率（ドローンの自動飛行で連続撮影した時の、重なる部分の比率）に依存するため、十分なラップ率を確保する必要がある。今回は自動飛行中に一定間隔で連続撮影し、オーバーラップ率が70%以上となるように設定し、SfM処理に必要な画像を取得した。

3Dモデルは、多くの点群で構成される3D点群データで出力される。また、3D点群データを加工し正射投影することで、2Dモデルであるオルソ画像も取得できる。本実験では、図1に示した2つの飛行経路から撮影した画像から3D点群データ並びにオルソ画像の生成を行った。

2.4.2 3D点群データの検証

作成した3D点群データを図2に示す。2つの飛行経路から撮影したデータが1つの点群データとしてうまく結合できており、様々な角度から、対象物の確認が可能となった。

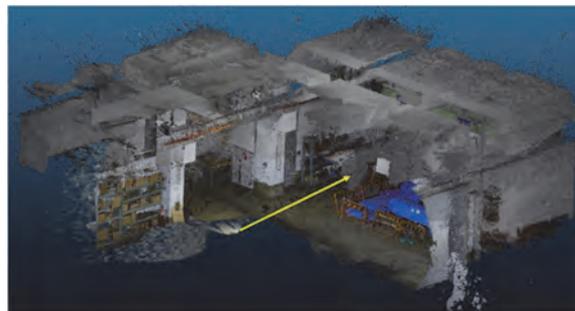


図2 3D点群データ 合成図

図3は図2の矢印の方向から見た時の3D点群データの一部を拡大したものである。点群で構成されているため、細かい部分を確認しようとすると、図3下段のように、点群が疎となるため、画質が荒くなる。

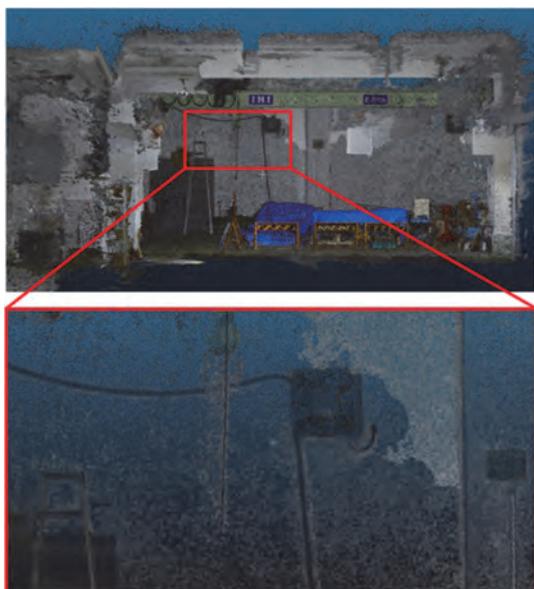


図3 3D点群データ 拡大図

このように、3Dモデル化することにより直感的に状況を把握しやすくなる一方で、点群データ化されることにより、画質そのものは低下してしまう。

実際の船舶検査で活用する場合は、検査対象区画全体の状態を3D点群データで確認し、より詳細な確認が必要な部分については、個別に撮影映像から確認するといった工夫が必要となる。

3Dモデルには位置情報が含まれているため、測長にも活用することができる。測長箇所は図4の線で示す3か所において3D点群データによる測長と実測値の比較を行った。計測結果の比較を表2に示す。



図4 測定箇所

表2 計測結果の比較

	3D点群データでの測長結果[cm]	実測結果[cm]	精度[%]
①棚	209	206	1.46
②消火栓	110	105	4.76
③バリケード	119	121	1.65

cm単位の誤差は出てしまうが、クランク長さ測長や、損傷範囲の大まかな算出には活用できるかもしれない。

2.4.3 オルソ画像の検証

作成したオルソ画像を図5、6に示す。なお、図1において左側の実線の飛行経路での撮影から得られたオルソ画像が図5、もう一方の破線の飛行経路から得られたオルソ画像が図6である。



図5 実線の飛行経路におけるオルソ画像



図6 破線の飛行経路におけるオルソ画像

オルソ画像にすることにより、3Dから2Dに戻るものの画質は撮影画像に近い品質となっている。

3D点群データのように立体的に状況を捉えることはできないが、平面における視覚情報は向上しているため、例えば、塗装状態の把握などはオルソ画像の方が向いているかもしれない。

一方で、オルソ画像は正面から撮影した写真を結合して生成されるため、部材の陰を斜めから写した画像は、ドローンで撮影した映像には映り込んでいても、オルソ化した際に抜け落ちてしまうことになる。そういった意味では、一長一短といえる。

なお、今回、オルソ画像にうまく変換できない部分（黒い部分）が存在した。これは、オルソ化は一つの平面に投影することを前提に処理しているため、本実験環境のような、カメラ方向から見る形状が複雑な場合、ひずみが大きくでてしまい、その結果、オルソ化した際にその部分が抜け落ちてしまったことが原因だと考えている。対策としては、奥行きに差がある梁の部分と壁の部分を別々にデータ化することでひずみを減らすことが考えられる。また、梁や資材等との距離が近かったために、オルソ化に必

要な画像の視差や情報量が十分でなかったことも原因の1つである可能性がある。

2.4.4 考察

船舶の検査・点検への活用という点において、現段階で3D点群データとオルソ画像のどちらが適しているか判断することは難しい。それぞれの特徴を把握した上で、検証事例を増やしつつ、3D点群データとオルソ画像を組合せた活用も含め、引き続き検討していきたい。例えば、3D点群データやオルソ画像を時系列で比較することで、区画全体の経年変化を確認することができれば、船舶の検査・点検への有効活用が期待できる。

また、1つのカメラから、検査・点検のための撮影映像や、その映像を後で確認するための記録、そして、撮影画像の事後処理により3Dモデルが得られるというのは大きな利点に感じる。得られたデータを有効活用していくことは、船級協会においても今後はますます重要となってくる。ドローンで取得したデータの活用方法についても継続して検討していきたい。

2.5 まとめ

本実験では、以下のことが確認できた。

- ・ 体積 (D×W×H) がおおよそ14×15×5 (m) である屋内暗所環境において、100Wの照明システムを機体に搭載することで、非GNSS環境かつ暗所であっても、計画した飛行経路に沿って安定して自動飛行することが確認できた。
- ・ き裂の有無が十分に判別できる画像が暗所でも撮影できることを確認した。ただし、暗所の場合、照度の関係から、機体と被写体との距離により撮影品質が変化する。そのため、カメラの性能、照明の照度にあった適切な距離から撮影することが必要である。
- ・ ドローンで撮影した画像をSfM処理することで、3D点群データとオルソ画像が取得できた。
- ・ 3D点群データでは、対象物を3Dモデル化することにより、直観的に状況を把握しやすくなる。
- ・ 3D点群データ化されることにより、画質そのものは低下してしまう。そのため、船舶検査での活用方法としては、検査対象区画全体の状態を3D点群データで確認し、損傷等が疑われる箇所については、個別に撮影映像から確認するといったことが考えられる。
- ・ 3D点群データからの測長はcm単位の誤差が生じる。大まかなクラック長さの把握や、損

傷範囲の算出等への活用が考えられる。

- ・ オルソ画像では、撮影画像に近い品質で広い面積の平面における視覚情報を確認することができた。船舶でも、塗装状態の把握等は可能と考えられる。一方で、部材の陰を斜めから写した画像は、ドローンで撮影した映像には映り込んでいても、オルソ化した際に抜け落ちてしまう側面もある。

3. おわりに

本実験では、ビジョンセンサを搭載したドローンを使用し、屋内における外部照明のない(暗所)閉囲空間(非GNSS環境下)での安定的な自動飛行が可能なが確認できた。ただし、ビジョンセンサはカメラで捉えた映像の特徴点から自己位置を認識しているため、今回の実験環境よりもより広い空間においても有効に機能するかについては、引き続き検証する必要がある。船舶内でも実証実験を実施し、より実運用に近い条件で検証を進めていきたい。

本会は、船舶の検査・点検が効率的かつ合理的に行われるよう、今後とも関連する研究検証を進めていく。

参考文献

- 1) 日本海事協会：船舶検査におけるドローン使用に係るガイドライン，2018
- 2) Skydio, Inc. : Skydio 2, <https://www.skydio.com/skydio-2>
- 3) ACSL : インフラ点検用ドローン プラント, <https://www.acsl.co.jp/solutions/inspection-industrial-plant/>
- 4) ALSOK : ニュースリリース (2020年7月15日), https://www.alsok.co.jp/company/news/news_details.htm?cat=2&id2=1039
- 5) 北海道電力株式会社 : プレスリリース (2021年3月4日), https://www.hepco.co.jp/info/2020/1251171_1844.html
- 6) Aerosense Inc. : [プレスリリース] 自律飛行ドローンを用いた船舶貨物艙内検査の実証実験を実施～GPS等の電波の入らない暗闇の環境での自律飛行による検査手法を確認～, <https://aerosense.co.jp/pressitems2021/0318>
- 7) Aerosense Inc. : Aero Inspection on Dark site with vSLAM and Light (Aerosense

Inc.), Youtube,

https://www.youtube.com/watch?v=Ov9YtEqZpbI&ab_channel=AerosenseInc.

- 8) SONY : UMC-R10C, Image Sensing Solutions Europe, a division of Sony Europe B.V,
<https://www.image-sensing-solutions.eu/UMC-R10C.html>
- 9) 白谷栄作, 桐博英, 高橋順二, 大石哲, 村木広和 : 無人航空機 (UAV) を活用したストックマネジメントの展望, 農業農村工学会誌, 第83巻, 第10号, 2015年, p839-842,
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsidre/83/10/83_839/_pdf/-char/ja



