

事例研究

表題：湿地生態系モニタリングのための UAV を用いた VR 映像撮影機材の開発

表題（英文）：Development of a UAV-based VR imaging system for wetland ecosystem monitoring

簡略表題： モニタリング用 UAV・VR 撮影機材の開発

著者：山田浩之¹⁾、鈴木透²⁾、中村隆俊³⁾、田開寛太郎⁴⁾

1)北海道大学大学院農学研究院、2)酪農学園大学、3)東京農業大学、4)都留文科大学

Authors: Hiroyuki Yamada¹⁾, Toru Suzuki²⁾, Takatoshi Nakamura³⁾ and Kantaro Tabiraki⁴⁾

1) Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University, 2) Rakuno Gakuen University, 3) Tokyo University of Agriculture, 4) Tsuru University

責任著者：

山田浩之

〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目

北海道大学大学院農学研究院

TEL：011-706-4183 / Fax：011-706-2494

e-mail address: hiroyama@agr.hokudai.ac.jp

Hiroyuki Yamada

Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University

Sapporo 060-8589, JAPAN

TEL：+81-11-706-4183 / Fax：+81-11-706-2494

e-mail address: hiroyama@agr.hokudai.ac.jp

Abstract

In this study, VR image capturing equipment capable of approaching targets and being inserted into vegetation was developed using an unmanned aerial vehicle (UAV) and an omnidirectional camera (VR camera). Furthermore, a capturing protocol for this equipment was established. The effectiveness of the equipment was confirmed through field operations in various wetlands in Hokkaido. To satisfy the requirements of equipment transportation, operational difficulty, flight duration, positioning accuracy, portability, and image quality, a suitable UAV and VR camera were selected. Subsequently, custom parts for the equipment were developed to satisfy these requirements. To enable efficient and rapid deployment, a dedicated capturing protocol was also developed. Performance tests and VR image capturing were conducted at 26 wetlands in Hokkaido using the developed equipment and protocol. Issues encountered during capturing were addressed, and the parts and protocols were improved accordingly. Consequently, 85% of all flight and capturing attempts were successful. The previously existing issues associated with using UAVs and VR cameras have now been significantly improved. As a result, a method for acquiring high-resolution VR images with high-precision coordinate information has been established. This non-invasive, immersive, wide-ranging, and high-resolution capturing method has the potential to be a significant tool and monitoring technique for the accurate archiving of the status of wetland ecosystems for future reference.

Keywords

Drone, Virtual reality, 360 camera, Flight Protocol, Panorama tour

はじめに

多くの湿地は流域の末端に形成されることが多いため、人為的な環境変化の影響を累積的に受け易い。湿地生態系のなかでも特に湿原の植物の分布特性は水位や水質に極めて敏感に反応するため（Nakamura et al. 2002; Rydin & Jeglum 2013）、わずかな環境変化によって分布の様子が劇的に変化し易い。それらの理由から、最も脆弱で減少が著しい生態系であると位置づけられており、世界では湿地（浅い水域も含む）生態系の 51%（Zedler and Kercher 2005）、国内では明治・大正時代に存在した湿地の 60%以上減少したと報告されている（環境省 2004）。残存している湿原でさえも劣化が進行している状況にあるが、湿原の集中する北海道で、1990 年以降植生調査が行われている湿地は全体のわずか 35%で、今後のモニタリング体制強化の必要性が指摘されている（鈴木ほか 2016）。これらのことから、現存している湿原の保全・維持のためにも、とりわけ湿地の生態系の基盤となる植生変化のモニタリングは急務である。

従来、湿原の植生調査は、研究者や技術者等が実施してきたが、アクセスし難さ、立ち入りによる植生へのダメージ、タンチョウ等の希少動物への影響から、熟練した者であっても十分な調査データが得られないことがあった。これが先のモニタリング体制整備の遅れの主な理由となっている。このままでは、十分なモニタリングが行われないうまま、湿原の劣化や消失が進行するものと考えられる。

一方、最近では、ロボット、AI（人工知能）、画像解析、通信技術などの最新技術が労働力不足を補うものとして期待されており、特に無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle、以後、UAV）については、空撮に限らず野生動物監視の分野など様々な分野で活用されている（例えば、Cruzan et al. 2016; Dronova et al. 2021）。その後、仮想空間の中で現実のように事象を目視で確認できる VR 技術が注目を集め、全方位カメラ（VR カメラ）の普及とともに、医学教育、理科教育、技能教育等の様々な教育分野の利用が進められ、その効果が検証されている（田開ほか 2023）。こうした VR 技術を利用することによって、現地調査の省力化・効率化に貢献するだけでなく、生態系の現在の姿をより現実に近い状態で記録

し、共有することが可能となる。そのため、VR 映像を UAV で安定して取得する方法を確立することは、先の労働力不足の問題を解決し、植生のみならず生態系の現況を正確な記録として将来に残すために必要な技術開発となると考えている。

こうした UAV と VR カメラを利用したシステムや撮影機材は既にいくつか存在している（例えば、Lan et al. 2016; Humpe 2020）。生態系を構成する植生のモニタリングを目的とした VR 映像撮影機材もある（中村ほか 2021）。この報告のなかで、VR カメラを UAV に装着する方法は、群落下層に生育する希少種の確認ができないことから、VR カメラを下方の植物に接近させる、あるいはカメラ自体を群落内部に挿入するといった下層の植物相を調査できる撮影装置が必要と指摘されている。この問題に対応するために、我々は、植生に挿入しその内部の撮影を可能とする複数の撮影機材を開発してきた。しかし、それらは水平数メートル程度と測位の誤差が大きく記録位置の再現性がない、携行性が悪くアクセスし難い場所での機材搬入が困難、飛行時間が短く撮影範囲が限られるという問題があった。

そこで、本研究ではそれらの問題を解決すべく UAV および VR カメラを用いて、対象物に接近、植生などに挿入可能な VR 映像撮影機材の開発と撮影プロトコルの作成を行い、様々な湿地での運用を通して、それらの有効性を確認した。

方法

撮影機材の選定

著者らは、これまでに Matrice 600 Pro (DJI) と Insta360 Pro (Arashi Vision, Inc.)、障害物回避用のセンサ類で構築した高解像度映像撮影用大型タイプ、Mavic2Pro (DJI) と GoPro Fusion (GoPro, Inc.) で構築した小型タイプの 2 つの撮影機材を製作している（図 1）。前者は、0.68 kg のバッテリーを 6 個搭載した幅 1.13 m、高さ 1.03 m（マウントおよび VR カメラ含む）、総重量 12.5 kg の大型の撮影機材であり、機材の運搬と操縦が難しいという課題があった。後者は、幅 0.24 m、長さ 0.32 m、高さ 1.4 m（マウントおよび VR カ

74 メラ含む)、総重量 1.2 kg と小型軽量で運搬し易いものの、飛行時間が 10 分程度と短く、
75 水平測位精度も 10 m 程度と低いという課題があった。

76 これらの課題を解決するために、UAV と VR カメラ等の構成機器類を選定し直し、新た
77 な撮影機材を製作することとした。その際、UAV は携行性と飛行時間、測位精度を向上さ
78 せることを選定の条件にした。VR カメラは、飛行時間を減少させないように、できるだけ
79 軽量であること、高解像度で画質が良いこと、時間間隔 10 秒以内のインターバル画像を記
80 録できること、さらに撮影位置の座標を Exif (Exchangeable Image File Format) 情報とし
81 て記録できることを選定の条件とした。

82 様々な UAV を試用した結果、UAV には測位精度が高く携行性に優れた Matrice 30(DJI)
83 を選定した。この機体は長さ 0.47 m、幅 0.59 m、高さ 0.22 m、総重量 3.8 kg で、最大飛
84 行時間が 48 分である。この機体は折り畳みが可能で、折り畳み時には、長さ 0.37m、幅
85 0.22 m、高さ 0.20 m の大きさとなる。本機種は、RTK (Real Time Kinematic) 測位デー
86 タを使用することが可能である。RTK 測位モードで飛行させた場合、測位精度は、水平 0.01
87 m+1 ppm、鉛直 0.015 m+1 ppm となる。これを使用することで、GCP (Ground Control
88 Point) を用いた補正や GNSS 基地局の設置が不要となる利点がある。

89 VR カメラについては、Insta360 Pro、GoPro Fusion、Theta X (Ricoh Co., Ltd.)、Insta360
90 X3 (Arashi Vision, Inc.) をそれぞれ UAV に搭載して、2022 年に歌才湿原、静狩湿原、美
91 唄湿原、マクンベツ湿原、勇払湿原、幌向湿原再生地、能取湖、柏原東湿原にて撮影試験
92 を実施し、それぞれのカメラの性能評価を行った。その結果、先に挙げた条件を満足して
93 いた Insta360 X3 を選定した。このカメラは静止画で 72 Mpx の全方位画像を得ることが
94 でき、オプションの Insta360 GPS アクションリモコン (Arashi Vision, Inc.) と併用するこ
95 とで、撮影箇所の位置座標を Exif 情報 (Exif 2.3) に記録することができる。それらの UAV
96 と VR カメラを組み合わせて撮影機材を製作することとした。

97

98 撮影機材接続用パーツの製作

99 先の UAV と VR カメラを接続するために、カメラ接続マウント等の各種パーツを設計
100 および製作を行った。その際、VR カメラを対象に接近して撮影可能なこと、植生に挿入し
101 て撮影が可能なこと、画像に写り込む UAV を小さくすること、VR カメラの搭載により飛
102 行と離発着が不安定にならないことを要求仕様とした。

103 複数回の飛行テストを繰り返すことで、各種パーツの強度と飛行、離発着時の安定性に
104 ついて評価してパーツの改良を施した。最終的に、カメラ接続マウント、ユニバーサルジ
105 ョイント、カメラ用延長バー、ランディングスキッド、カメラ用の GPS ユニットケースを
106 製作した（図 2）。カメラ接続マウントは、Matrice 30 のドングル収納部カバー部に（DJI
107 2024）に取り付けられるカメラ接続用のマウントで、カバーにカメラ取付け用ボルト
108 （UNC1/4 インチ）が付属している（図 2a）。ユニバーサルジョイントは、VR カメラを取
109 り付けた UAV の飛行の安定性を保つために重要なパーツである。2 軸方向に可動すること
110 で、カメラを取り付けたバーの縦横の揺れを解放するようになっている（図 2b）。また、カ
111 メラの振動を抑える防振材、バーの揺れを抑える制動装置としても機能する。この締め付
112 けネジの締め付け方によりバーの動きを調整できるようにしているが、完全に締め付けた
113 場合はバーの揺れが解放されずに飛行中に機体が墜落する可能性が高まるため、締め付け
114 強度には注意を要する。

115 カメラ用延長バーは、草丈の高い草本や灌木内に挿入できるように 1 m のカーボンパイ
116 プ（外径 12 mm）とユニバーサルジョイントを連結させたもので、先端にはカメラ取付け
117 用ボルト（UNC1/4 インチ）が付属しており、ここに VR カメラなどのカメラを装着する
118 ことができる（図 2c）。この延長バーは、カメラ取付け用ボルト（UNC1/4 インチ）が付
119 属したカメラ用マウントを取り付け可能な UAV であれば、ここで用いた機体に限らず使
120 用可能である。飛行テストの段階で、Mavic2Pro（DJI）と Phantom 3 Professional（DJI）
121 については、手動操縦での安定した飛行を確認している。

122 ランディングスキッドは、UAV とカメラ用延長バーの接触を防ぐもので、Matrice 30 の

図 2

標準のスキッドに取り付けられる形状に設計した（図 2d）。GPS ユニットケースは、
Insta360 GPS アクションリモコンを UAV 上面に設置できるようにしたものである（図 2e）。

カーボンパイプとボルトナット類以外の 3D モデルは、3D プリンタを用いて出力すること
で製作した。ここで、フィラメントは、ランディングスキッドの一部を除いて強度が
大きく耐久性のあるカーボン配合ポリカーボネートを使用した。UAV 機体に接触するパー
ツについては UAV との密着性と防振性を高めるために TPU フィラメントを使用した。な
お、これらの各種パーツの 3D モデルの説明と組み立て方法については、付録資料 1 に示
した。

これらの各種パーツを使用して UAV と VR カメラを接続し、VR 映像撮影用 UAV を構
築した（図 3）。これらを合わせた機材の高さは 1.4 m、総重量は 4.43 kg で、前述の大型タ
イプの撮影機材の総重量の 30%程度まで抑えることができた。機体は折りたたみ式で、各
パーツ類も取り外し可能にしており、傾行性の条件についても満足している。

図 3

撮影プロトコル

撮影対象地で、短時間で効率的に飛行させることを目的に、撮影プロトコルを作成した。
その際、自動飛行用のフライトプランを独自のプログラムやアプリケーションを使用せず
に済むように、UAV に標準に付属する自動飛行用アプリケーション DJI Pilot 2（DJI）を
用いることとした。

1) 事前準備

撮影に必要となる機器類を表 1 に示した。事前準備として、UAV 機体と飛行の安全性
を高めるためのファームウェアアップデート、機体や各種機材の整備や接続、各種バッテ
リ残量、RTK 測位に用いる Wi-Fi ルータと UAV との接続、RTK 補正信号の受信の確認を
実施しておくことを推奨する。RTK の補正信号は、独自に基地局を設置して取得すること
もできるが、携帯電話無線網を用いた Wi-Fi ルータより RTK 補正情報を入手できる高精

表 1

148 度位置測位サービスを使用したほうが簡便である。ここでは、そのサービスのひとつであ
149 る ichimill (Softbank) を使用した。

150 Insta360 X3 の設定は、撮影モードをインターバル撮影、時間間隔を 3 秒に設定した。オ
151 ートホワイトバランス、EV 値等の撮影設定は、基本的にデフォルトで使用しているが必要
152 に応じて変更することも可能である。

153 そのほか、機体登録、撮影予定地の地権者の許可、飛行制限地域の有無、住宅や道路・
154 送電線の有無等の UAV を使用する際に必要な申請の実施を済ませること、撮影時の天候
155 を確認して安全な飛行が可能かを確認しておくことも重要である。

156

157 2) フライトプランの作成

158 フライトプラン作成には送信機に予めインストールされている DJI Pilot 2 を用いた。こ
159 のプラン作成の各種設定を表 2 に記載した。ここではウェイポイント撮影モードを使用し、
160 自動運転で飛行させた。対象域は、機体の飛行可能時間を考慮し、最小で 4 ha の範囲とし
161 た。対象域の植生を網羅できるようにライン間隔を 20~40m となるようにウェイポイント
162 を設定した (図 4)。また、湿地の植物など興味のある対象物に接近して VR 映像を取得す
163 るために、植生が異なる領域や興味のある地点に調査用ウェイポイントを複数点追加する
164 ようにした。

表 2

図 4

165 飛行速度はカメラのインターバル撮影時間間隔に応じて変化させ、約 10 m で 1 回の撮
166 影が可能となるようにした。ここでは、VR カメラ位置を植生面の植物種を確認できる程度
167 高度にして、飛行高度を 3 m に設定した。離陸速度は、それを高めることにより、カメラ
168 用延長バーが大きく揺れ、飛行が安定しなくなることがあるため、できるだけ速度を下げ
169 3 ms^{-1} に設定した。

170

171 3) VR 映像の空撮

172 空撮を開始直前に前述のカメラ用延長バー、ランディングスキッド、GPS ユニット、VR

173 カメラ、バッテリー等を機体に装着し（図 3）、各部のネジ類に緩みがないか確認した。カメ
174 ラは、機体の進行方向にレンズ正面が向くように設置した。

175 周囲に障害物の無い安全で平坦な場所にヘリパッドとランディングネットを配置した。
176 ヘリパッドには機体、ランディングネットにはレンズが損傷しないようにカメラを配置し
177 た。

178 全ての機材の電源を投入し、UAV と送信機間の接続、RTK 補正情報の受信、VR カメラ
179 と GPS アクションリモコンの接続をそれぞれ確認することで動作確認を行った。

180 UAV のカメラと VR カメラのレンズをクリーニングし、GPS アクションリモコンを用
181 いて VR カメラのインターバル撮影を開始した。

182 予め作成したフライトプランを DJI Pilot 2 を用いて機体に送信し、自動飛行ミッション
183 を開始した。基本的にフライトプランに従った自動運転を行うが、調査用ウェイポイント
184 では、DJI Pilot 2 のミッション一時停止機能を用いて、自動運転ミッションを停止し、手
185 動運転によりカメラを下層植生などの対象が見える位置まで UAV を降下させ、降下地点
186 で 1 から 2 回の撮影ができるように 10 秒程度ホバリングさせた。降下高度は、UAV カメ
187 ラの FPV 映像を確認しながら、VR カメラが地面に接触しない高度に設定した。この手動
188 運転後には、一時停止機能を解除して自動運転を再開させた。これを繰り返して予め設定
189 したウェイポイントの撮影を完了させ、機体を帰還させた。撮影中に UAV のバッテリー残
190 量が 20% より低下した場合は、ミッションを中断させ機体を帰還させた。

191 帰還後の着陸時には、カメラが地面に当たり破損しないようにランディングネットでカ
192 メラを捕捉し、延長バーが機体のプロペラに接触しないよう送信機を用いて手動運転で降
193 下させ着陸させた（図 5）。
194

図 5

195 4) データの事後処理

196 Insta360 X3 で撮影された画像は insp フォーマット形式で記録されている。この形式で
197 は、一般の画像（jpg 等）として閲覧や編集ができないため、Insta360 STUDIO（Arashi

2198 Vision, 2024) を用いて jpg フォーマット形式に変換した。その際、VR 画像はエクイレク
2199 タングラー形式として出力するようにした。この出力時の設定を表 3 に記載した。手振れ
2200 補正の自動水平補正を実施すると、水平線が概ね水平に自動修正されるが、方位が実際と
2201 は異なる方向に変更される場合があるため、その補正は実施しないようにした。色彩の強
2202 度などは、どの場合でも問題なく撮影できるように設定したが、撮影後の画像を確認しな
2203 がら再調整することを推奨する。

2204 上記によって変換した jpg 画像の Exif 情報には GPS アクションリモコンから得られた
2205 位置座標（緯度経度、高度）と方位が記録される。この GPS アクションリモコンの測位精
2206 度は、仕様上で 10 m 程度となっている。また、仕様に記載はされていないが、方位の誤差
2207 が大きいことがここで実施した試験によりわかっている。この精度では、植生調査を別の
2208 機会に実施する際に、再現性を得ることが難しい。そこで、ここではそれらの値をより精
2209 度の高い値として記録させるため、UAV の RTK 測位データが記録されているフライトロ
2210 グを用いて Exif 情報を修正することとした。その際、この修正（後処理）を一括で実施で
2211 きるプログラムを使用した（山田ほか 2025）。このプログラムは、VR 画像とフライトログ
2212 の時刻を参照して、該当する Exif 情報の座標と方位データを書き換えるものであり、フラ
2213 イットログ時刻と画像の撮影時刻が同期されていれば、VR 画像以外の画像にも使用するこ
2214 とができる。

2215 ここでは、Matrice 30 のフライトログのアーカイブや編集を可能とする AirdataUAV
2216 (AirData.com) を使用して、フライトログを csv 形式（カンマ区切りテキストデータ）の
2217 ファイルとして出力した。このファイルには、時刻毎の位置座標、高度、衛星数、飛行時
2218 間、飛行距離、飛行速度、方位、動作等が記録されている。

2219

2220

結果および考察

2221 ここで製作した撮影機器類と撮影プロトコルを用いて、2023 年 6 月から 2024 年 9 月に
2222 かけて北海道内の 26 箇所の湿原にて計 72 回のフライトを行うことにより性能試験および

223 VR 映像空撮を実施した（表 4）。ここで、湿地の名称および位置、固有番号（ID）は、富
224 士田ほか（2020）に従った。

225 飛行試験および撮影の結果、飛行時間は、1 セットのバッテリーで最長約 25 分、飛行距離
226 は最長 3178 m であり（表 4）、これまでの著者らの製作した機材よりも長かった。これは
227 機体自体の性能向上だけでなく、カメラやマウント類の軽量化によるものと考えられた。
228 墜落の事例は、生花苗沼での 1 件のみであった。これは、ユニバーサルジョイントのネジ
229 の緩みと UAV の離陸速度が大きかったために、カメラ延長バーが大きく揺れ機体の安定
230 性が損なわれたためであった。また、ユニバーサルジョイントが破損し、カメラ落下した
231 事例が風連川湿原で 1 件生じた。これは、そのジョイントの耐久性が低く、度重なる使用
232 で疲労破壊したためと考えられた。上の 2 件の対策として、ジョイント部のモデルを補強
233 したものに變更し、離陸時にネジの緩みの確認を行うことをプロトコルに追加した。これ
234 により、安定した離発着と飛行・撮影が可能となり、先の 2 件以降は墜落やカメラ落下の
235 トラブルは発生しなかった。そのほか、自動飛行中にカメラが地面に接触するケースがあ
236 った（表 4 の能取湖）。これは、対象地の地形の起伏が大きく、UAV の高度を一定とした
237 自動飛行の場合では、その地形の変化に対応できないためであった。このことから、この
238 プロトコルでは、平坦な湿地には適用できるが、地形の起伏が大きい傾斜地や樹高の高い
239 樹木が点在するような場所には適していないと考えられた。このほか、見通しが良くない
240 地点での手動運転による降下撮影を行った場合、機体と送信機間の通信が一時的に途切れ
241 やすくなる、機体の障害物回避センサが作動して操縦できなくなるといったトラブルがあ
242 った。前者は、操縦者が機体の見える位置に移動すること、後者は下方の障害物センサ検
243 知機能をオフにすることで対処可能であった。

244 VR カメラを使用した画像の取得については、雨滴や汚れが付着した画像が得られるこ
245 とがあった。雨天時には撮影を実行しない、レンズのクリーニングを度々実施するなどの
246 対策が必要と考えられた。そのほか、得られた画像の方位が実際の飛行方向と異なる画像
247 がいくつか得られた（表 4 の画像方向の不一致）。これは、マウントに装着したカメラが進

248 行方向からずれていた、あるいは、フライトログの方位データにエラーがあったというこ
249 とが推測されたが、原因は特定できなかった。また、カメラ時刻が不正確で実際の時刻と
250 合っていないという問題もあった。これは、カメラの設定時に時刻合わせができていない
251 という設定ミスと、カメラに GPS 座標、時刻情報を送信する Insta360 GPS アクションリ
252 モコンとの通信リンクが切れて正確な情報がカメラに記録されなかったことが原因であっ
253 た。これらについては、事前の準備段階で確認することで対処可能である。こうしたトラ
254 ブルはあったものの、全フライト中 85%（72 回のフライト中 61 回）の飛行と撮影に成功
255 した。

256 画像のエクイレクタングラーおよび jpg 形式の変換、Exif 情報のフライトログデータ置
257 換（後処理）は、画像の Exif 情報に記録された時刻が不正確であった画像を除いて問題な
258 く実行できた。これにより、植生面や植生内部の下層植生の状況を把握することが可能と
259 なった（図 6、図 7）。画像方位にずれがあった画像については、パノラマツアー（バーチ
260 ャルツアー）制作用ソフトウェアの Pano2VR7.1（Garden Gnome GmbH）を用いて機体
261 の進行方向に方位を合わせることで修正することができた。なお、この試験で得た各湿地
262 の VR 画像は、鈴木ほか（投稿中）で閲覧および利用が可能である。この画像を VR 画像
263 閲覧用ソフトウェア等で閲覧することで、VR 上で対象物を拡大し、実際に植物に接近した
264 ように状況を確認することができる（図 8）。

図 6、
図 7

図 8

265 これらのことから、UAV と VR カメラを用いた撮影機材の課題となっていた機材の運搬
266 と操縦し難さ、飛行可能時間、測位精度、携行性、画質といった問題が改善された。また、
267 平坦な湿地という場所に限られるものの高解像度で高精度座標情報を有する VR 画像を
268 UAV で安定して取得する方法が確立できたものと考えている。

269

270

おわりに

271 本研究では、アクセスが困難な湿地生態系のモニタリングのツールとして、植物等の生
272 物に接近して VR 画像を撮影することのできる撮影機材を製作した。また、安全に効率的

273 に撮影を実施するプロトコルを作成し、複数回の現地試験によりその有効性を確認した。
274 それらを通して、高解像度で高精度座標情報を有する VR 画像を UAV で安定して取得す
275 る方法を確立できた。航空写真や衛星画像に基づく画像調査では下層植生などの群落内部
276 の情報が得られなかったが（例えば、Xie et al. 2008; Adam et al. 2010）、この撮影方法によ
277 り、従来の植生調査に近い精度のデータ取得をはじめ詳細な生物相調査が可能となるもの
278 と考えている。また、衛星画像や航空写真のグラントゥールスの取得方法としても活用
279 可能である。こうした湿地への立ち入りを伴わない調査が可能となることで、調査の効率
280 性やデータ取得の迅速性の向上が見込めるだけでなく、調査員の踏圧などによる植生の破
281 壊も防止する非侵襲的な調査が可能となる。さらには、取得したデータの蓄積により生態
282 系の変化を従来の人の調査より早く、適切に捉えることができるようになると考えられる。
283 こうしたツールは、生態系の現況を正確な記録として将来に残すために必要なものとなる
284 だろう。今後は、VR カメラの画像のリアルタイム視聴やリアルタイム物体認識や物体検
285 知、手動で行っていた UAV の下降の自動化などの改良が課題として残される。

286 現在、著者らは、こうした現地の状況を分かりやすく記録する VR 映像のアーカイブ方
287 法と、その蓄積した VR 映像より制作した VR コンテンツの利活用について検討している。
288 人の立ち入りが難しい湿地での VR 映像を用いた環境教育の学習効果の高さが認められつ
289 つあり (Ou et al. 2021)、多くの湿地でその映像が公開されている（例えば、Ducks Unlimited
290 Canada 2024; The Wetlands Institute 2024）。それを踏まえて、環境教育を目的に VR ツア
291 ーの制作と公開を進めているところである（湿地 VR 教育グループ 2024）。今後、様々な
292 生態系での映像によるアーカイブ化が進み、モニタリングや環境教育の教材として有効利
293 用されることを期待している。

294 最後に、ここでは航空法の遵守など UAV の飛行の安全性確保や規則に関する内容は割
295 愛した。また、この撮影機器類の装着は改造機体にあたるため、運用の際には改造機とし
296 ての登録が必要となる。それらの詳細については無人航空機の飛行ルール（国土交通省
297 2024）等を確認して安全に運用して欲しい。

298

299

謝辞

300

301

302

303

304

本研究を遂行するにあたり北海道大学農学部 of 生態環境物理学研究室の小野有衣子氏を
はじめ学生・院生諸君の多大なる協力を得た。ここに記して謝意を表する。なお、本研究
は JSPS 科研費（課題番号 18H03409、22H03788）の助成を受けたことを付記する。

305

摘要

306

307

308

309

310

311

312

313

314

315

316

317

318

319

320

引用文献

321

322

323

324

325

326

327

本研究では、UAV および全方位カメラ（VR カメラ）を用いて、対象物に接近、植生などに挿入可能な VR 用映像撮影機材の開発と撮影プロトコルの作成を行った。様々な湿地での運用を通して、それらの有効性を確認した。機材の携行性や長時間飛行、測位精度の高精度化等を条件として、UAV と VR カメラの選定と各種パーツ開発を行った。それらを組み合わせて撮影機材を製作した。さらに、この機材を短時間で効率的に飛行させることを目的に、撮影プロトコルを作成した。その撮影機器類と撮影プロトコルを用いて、北海道内の 26 箇所の湿原にて性能試験および VR 映像空撮を実施した。撮影中に生じたトラブルに対応し、パーツやプロトコルの改良を行うことで、全フライト中 85% の飛行と撮影に成功した。UAV と VR カメラを用いた撮影機材の課題となっていた機材の運搬と操縦し難さ、飛行可能時間、測位精度、携行性、画質の問題が改善され、高解像度で高精度座標情報を有する VR 画像を取得する方法を確立できた。非侵襲的で、没入感が高く広範囲で、高解像度の VR 映像の取得を可能とする本手法は、湿地生態系の現況を正確な記録として将来に残す有力なツールやモニタリング手法となるだろう。

Adam E., Mutanga O. & Rugege D. (2010) Multispectral an hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: a review. *Wetlands Ecology and Management* 18: 281-296.

Calantropio A., Chiabrando F., Einaudi D. & Teppati L.L. (2019) 360° Images For UAV Multisensor Data Fusion: First Tests and Results, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W13*: 227-234. (doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-227-2019).

328 Cruzan M.B., Weinstein B.G., Grasty M.R., Kohn B.F., Hendrickson E.C., Arredondo T.M.
 329 & Thompson P.G. (2016) Small unmanned aerial vehicles (micro-UAVs, drones) in
 330 plant ecology. *Appl Plant Sci* 4(9): apps.1600041. (doi: 10.3732/apps.1600041).

331 Dronova I., Kislik C., Dinh Z. & Kelly M. (2021) A Review of Unoccupied Aerial Vehicle Use
 332 in Wetland Applications: Emerging Opportunities in Approach, Technology, and Data.
 333 *Drones* 5(2): 45 (<https://doi.org/10.3390/drones5020045>).

334 Ducks Unlimited Canada (2024) Discover Conservation in Canada, Education
 335 (<https://www.ducks.ca/our-work/education/>, 2024 年 12 月 4 日確認).

336 富士田裕子・李娥英・孫仲益・倉博子・首藤光太郎・小林春毅 (2020) 全国湿地データベ
 337 ース(<http://wetlands.info/tools/wetlandsdb/wetlandsdb/>, 2024 年 12 月 4 日確認).

338 Humpe A. (2020) Bridge Inspection with an Off-the-Shelf 360° Camera Drone. *Drones*,
 339 4(4): 67. (doi: <https://doi.org/10.3390/drones4040067>).

340 環境省 (2004) 自然再生 釧路から始まる. 環境省自然環境局 自然環境共生技術協会,
 341 東京.

342 国土交通省 (2024) 無人航空機 (ドローン・ラジコン機等) の飛行ルール
 343 (https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html, 2024 年 12 月 4 日確認).

344 Lan G., Sun J., Li C., Ou Z., Luo Z., Liang J. & Hao Q. (2016) Development of UAV based
 345 virtual reality systems. *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and*
 346 *Integration for Intelligent Systems (MFI)*, Baden-Baden, Germany, pp. 481-486. (doi:
 347 10.1109/MFI.2016.7849534.)

348 中村隆俊・大木慎也・山田浩之 (2021) UAV 空撮による全方位動画を用いた湿原植生調査
 349 法の開発と評価. *応用生態工学* 23(2): 383-393. (doi: [https://doi.org/10.3825/ece.19-](https://doi.org/10.3825/ece.19-00022)
 350 00022).

351 Nakamura T., Uemura S. & Yabe K. (2002) Hydrochemical regime of fen and bog in north
 352 Japanese mires as an influence on habitat and above-ground biomass of *Carex* species.
 353 *Journal of Ecology* 90: 1017-1023.

354 Ou K.L., Chu S.T. & Tarng W. (2021) Development of a Virtual Wetland Ecological System
 355 Using VR 360° Panoramic Technology for Environmental Education. *Land* 10(8): 829.
 356 (doi: <https://doi.org/10.3390/land10080829>).

357 Rydin H. & Jeglum J.K. (2013) *The Biology of Peatlands*. 2nd edition. Oxford University
 358 Press, Oxford.

359 湿地 VR 教育グループ (2024) 湿地環境教育 VR オープン教材 ([https://wetland-vr-](https://wetland-vr-education.org/)
 360 [education.org/](https://wetland-vr-education.org/), 2024 年 12 月 4 日確認).

361 鈴木透・富士田裕子・小林春毅・李娥英・新美恵理子・小野理 (2016) 北海道の湿地に
 362 おける植物データベースの構築と保全優先湿地の選定. *保全生態学研究* 21: 125-134.

363 鈴木透・山田浩之・中村隆俊・田開寛太郎 (投稿中) オルソ画像と VR 画像を用いた植生
 364 画像デジタルアーカイブの構築: 静狩湿原の事例, *応用生態工学*.

365 田開寛太郎・山田浩之・鈴木透・中村隆俊 (2023) VR 教材を用いた教育実践の研究動向と
 366 環境教育に関する一考察. *教育総合研究* (7): 51-64.

367 The Wetlands Institute (2024) The Virtual Wetlands Experience
 368 (<https://wetlandsinstitute.org/virtual-wetlands->, 2024 年 12 月 4 日確認)

369 Xie Y., Sha Z. & Yu M. (2008) Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review.
 370 *Journal of Plant Ecology* 1: 9-23.

371 山田浩之・菅原隆介・鈴木透・中村隆俊・田開寛太郎 (2025) UAV フライトログを用いた
 372 後処理ジオタグ修正プログラム, *Jxiv* (doi: <https://doi.org/10.51094/jxiv.1311>) .

373 Zedler J.B. & Kercher S. (2005) WETLAND RESOURCES: Status, Trends, Ecosystem
 374 Services, and Restorability. *JF Annual Review of Environment and Resources* 30: 39-74.
 375 (doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144248>).

付録資料

376

377

378 S1. 撮影機材接続用パーツ 3D モデルの説明と組立方法

379 STL1. DJIM30_mount_PC.stl

380 STL2. DJIM30_skid_front_TPU.stl

381 STL3. DJIM30_skid_rear_PC.stl

382 STL4. DJIM30_skid_rear_TPU.stl

383 STL5. GPSunitcase_PC.stl

384 SRL6. Univesaljoint_PC.stl

385

386

表

387 表 1. VR 空撮用準備物一覧.

表1. VR空撮用準備物一覧.

物品名	個数	備考
Matrice30	1	事前にファームウェアアップデート、機体の整備を行うこと。
Matrice30用バッテリー	2	予備を含めて4個が望ましい。事前に充電しておくこと。
ルータ	1	事前に機体との接続を確認しておくこと。
UAV画像記録用マイクロSDカード	1	128GB程度
Insta360X3	1	
Insta360 GPSアクションリモコン	1	
VR画像記録用マイクロSDカード	1	128GB程度
Insta360X3用バッテリー	1	予備を含めて2個が望ましい。事前に充電しておくこと。
カメラ接続マウント	1	
ユニバーサルジョイント	1	
カメラ用延長バー	1	
ランディングスキッド	1	
GPSユニットケース	1	
ヘリパッド	1	直径1～2 mが望ましい。
ランディングネット	1	口径0.3 m以上が望ましい。
各種バッテリー充電用モバイルバッテリー		必要に応じて準備
ヘルメット・安全ベスト		必要に応じて準備

388

389

390 表 2. DJI Pilot 2 でのフライトプラン設定.

表2. DJI Pilot 2 でのフライトプラン設定.

設定名	設定値	備考
高度モード	ALT	
安全離陸高度	10	周囲の樹木などの障害物に合わせて設定すること。
始めの位置へ上昇	ON	
速度	2	撮影6秒間隔で12m間隔の地点の撮影
高度	3	カメラ用延長バーの長さに応じて設定。1mの場合は2～3mが望ましい。
離陸速度	3～6	
RTH高度設定	20	周囲の樹木などの障害物に合わせて設定すること。
その他設定	デフォルト値	

391

392

393 表 3. Insta360 STUDIO での画像変換時の設定値.

表3. Insta360 STUDIOでの画像変換時の設定値.

設定名	設定値	備考
手振れ補正の種類（自動水平補正）	OFF	補正すると方位も変更されるため
ステッチング（レンズステッチオプション）	正常	
ステッチング機能最適化（オプティカルフローステッチング）	ON	
ステッチング機能最適化（ステッチング色彩補正）	ON	
メディア処理（色彩鮮やか）	ON	強度30程度
ロゴ設定	なし	
一括エクスポート	360度写真書き出し・オリジナル解像度・出力形式JPG	
その他設定	デフォルト値	

394

395

396 表 4. 撮影地点の状況一覧.

表4. 撮影地点の状況一覧.

ID	Site	Lat	Lon	Date	Whether	Battery	Take-off (%)	Battery	Landing (%)	Flight time (min)	Flight distance (m)	Trouble
101008	猿払川下流湿原	N45°16'07.15" E142°13'48.05"		2023/8/24	Fine	89	41	17.57	1700			画像方位の不一致
				2023/8/24	Fine	89	49	11.85	1018			
				2023/8/24	Fine	89	56	9.95	666			
101012	浅茅野湿原	N45°12'42.72" E142°14'57.68"		2023/8/24	Cloudy	90	47	12.80	1584			画像方位の不一致
101080	馬主来沼	N42°55'55.43" E143°59'28.14"		2024/7/11	Cloudy	99	24	20.32	1301			
				2024/7/11	Cloudy	99	32	19.07	1446			
101081	直別湿原	N42°51'18.72" E143°52'30.00"		2024/7/4	Cloudy	89	29	17.40	1112			
				2024/7/4	Cloudy	99	28	18.77	1345			
				2024/7/4	Cloudy	92	47	14.02	1178			
101084	長節湖	N42°39'55.55" E143°36'03.94"		2024/7/11	Fine	99	22	19.65	1401			
				2024/7/11	Fine	99	28	18.88	1621			
				2024/7/11	Fine	92	60	10.45	1323			
101086	湧洞沼	N42°37'10.55" E143°31'32.57"		2023/8/3	Cloudy	99	33	18.83	2128			画像方位の不一致
				2023/8/3	Cloudy	96	45	15.87	1910			
				2023/8/3	Cloudy	99	47	15.10	940			
101088	生花苗沼	N42°33'19.24" E143°29'24.51"		2023/6/15	Fine	-	-	-	-			墜落、回収データ無 画像方位の不一致
				2023/8/2	Fine	88	26	17.68	1711			
				2023/8/2	Fine	89	52	11.33	1198			
				2023/8/2	Fine	100	51	13.93	641			
101093	汐見・フィハップ湿地	N42°32'37.00" E141°57'08.87"		2024/7/3	Fine	90	25	18.92	979			
				2024/7/3	Fine	89	36	15.65	828			
101102	ヨコスト湿原	N42°33'34.40" E141°22'47.68"		2024/7/3	Cloudy	99	61	10.70	705			
				2024/7/3	Cloudy	100	36	16.75	841			
				2024/7/3	Cloudy	100	69	9.15	876			
101107	歌才湿原	N42°37'54.63" E140°21'26.85"		2023/7/21	Cloudy	89	64	7.98	590			レンズ汚れ
				2023/7/21	Cloudy	63	40	6.55	307			
101108	静狩湿原	N42°34'15.61" E140°25'52.38"		2023/7/21	Cloudy	87	20	19.43	1952			
				2023/7/21	Cloudy	89	48	12.17	1171			
				2023/7/21	Cloudy	89	45	12.97	985			
				2024/7/17	Rainy	90	30	17.73	1109			
				2024/7/17	Rainy	90	25	18.83	1602			
				2024/7/17	Rainy	99	31	19.65	1646			
101127	美唄湿原	N43°19'24.06" E141°48'38.24"		2024/7/16	Cloudy	92	26	19.83	1175			
				2024/7/16	Cloudy	99	25	18.92	1356			
				2024/7/16	Cloudy	100	55	12.35	1059			
101011	モケウニ沼	N45°13'19.79" E142°15'17.57"		2024/6/29	Fine	97	45	13.30	501			
101026	能取湖	N44°03'26.28" E144°08'52.80"		2023/9/6	Cloudy	99	58	12.93	680			カメラ地面接触・時刻不正確
				2024/8/8	fine	98	15	21.98	1458			
101029	湧沸湖	N43°56'07.78" E144°23'35.03"		2024/8/3	fine	99	35	16.35	1949			
				2024/8/3	fine	99	24	20.03	1860			
				2024/8/3	fine	96	20	18.82	2099			
101043	西別湿原	N43°23'21.29" E145°03'38.52"		2023/6/16	Cloudy	99	38	17.52	777			
				2023/6/16	Cloudy	100	15	24.35	1360			
101046	茨散沼	N43°24'53.12" E145°15'04.73"		2023/6/15	Cloudy	99	15	24.50	804			レンズ汚れ
				2023/6/15	Cloudy	96	17	24.17	905			
101052	風蓮川湿原	N43°15'49.56" E145°13'10.83"		2023/5/20	Cloudy	96	53	14.02	1515			カメラ時刻不正確 ユニバーサルジョイント破損
				2023/6/14	Cloudy	93	50	23.40	1895			
				2023/9/3	Fine	82	19	21.07	1929			
				2023/9/3	fine	99	27	24.78	2411			
				2023/9/3	fine	100	83	5.37	780			
				2023/5/20	fine	85	18	17.17	1978			
101060	根室半島湿原群	N43°21'43.65" E145°45'54.95"		2023/5/20	fine	100	66	10.67	1736			カメラ時刻不正確 カメラ時刻不正確
				2023/6/17	Fog	95	42	16.90	1304			
				2023/6/17	Fog	70	23	13.13	867			
				2023/6/17	Fog	87	76	3.68	239			
				2023/9/3	Fine	96	18	23.63	1230			
				2023/9/3	Fine	96	22	21.35	1060			
				2023/5/22	Fine	97	57	12.78	833			
101063	落石湿原	N43°11'45.06" E145°31'23.60"		2023/6/17	Fine	100	44	16.87	605			
				2023/6/17	Fine	99	34	19.35	759			
				2023/6/17	Fine	99	34	19.35	759			
101100	弁天沼	N42°38'27.16" E141°45'57.15"		2024/6/4	Cloudy	94	16	20.32	1056			
				2024/6/4	Cloudy	90	22	20.42	1432			
				2024/6/4	Cloudy	99	91	2.65	633			
101114	サロベツ湿原	N45°05'57.23" E141°42'07.20"		2024/6/28	Cloudy	97	30	17.77	1546			
				2024/6/28	Cloudy	97	16	22.13	2047			
101187	達古武湖	N43°06'16.73" E144°29'07.78"		2024/7/27	Cloudy	90	49	12.30	823			
101189	シラルトロ湖	N43°10'46.95" E144°30'05.04"		2023/10/24	Fine	87	68	6.70	3178			
				2023/10/24	Fine	90	82	2.82	237			
101140	鏡沼湿原	N42°53'14.54" E140°40'36.22"		2023/10/24	Fine	81	44	11.23	1773			
				2024/9/12	Fine	91	46	12.73	636			
101141	大谷地	N42°54'09.31" E140°36'12.54"		2024/9/12	Fine	99	16	19.97	786			
				2024/9/12	Fine	99	79	4.68	393			
				2024/9/12	Fine	78	24	12.58	837			

図の説明

398

399 図 1 VR 撮影機材. a) Matrice600Pro・Insta360Pro 大型タイプ, b) Mavic2Pro・GoproFusion
400 小型タイプ.

401 図 2 撮影機材接続用パーツ. a)カメラ接続マウント, b)ユニバーサルジョイント, c)カメラ
402 用延長バー, d)ランディングスキッド, e) GPS ユニットケース. UAV の機体モデル
403 は DJI Web サイト (<https://enterprise.dji.com/>) を使用.

404 図 3 VR 映像撮影用 UAV.

405 図 4 各種ウェイポイントの配置とフライトルートの概要.

406 図 5 離発着の様子. a)離陸時の配置, b)着陸時のランディングネットを用いたカメラの捕捉.

407 図 6 撮影後各処理により生成した VR 画像の一例 (2023 年 6 月 17 日落石湿原の植生面の
408 画像).

409 図 7 撮影後各処理により生成した VR 画像の一例 (2023 年 6 月 15 日茨散沼の植生内部の
410 画像).

411 図 8 植生に接近した VR 画像を VR 表示で拡大した例 (2023 年 6 月 17 日落石湿原).

412

413 図 1

414

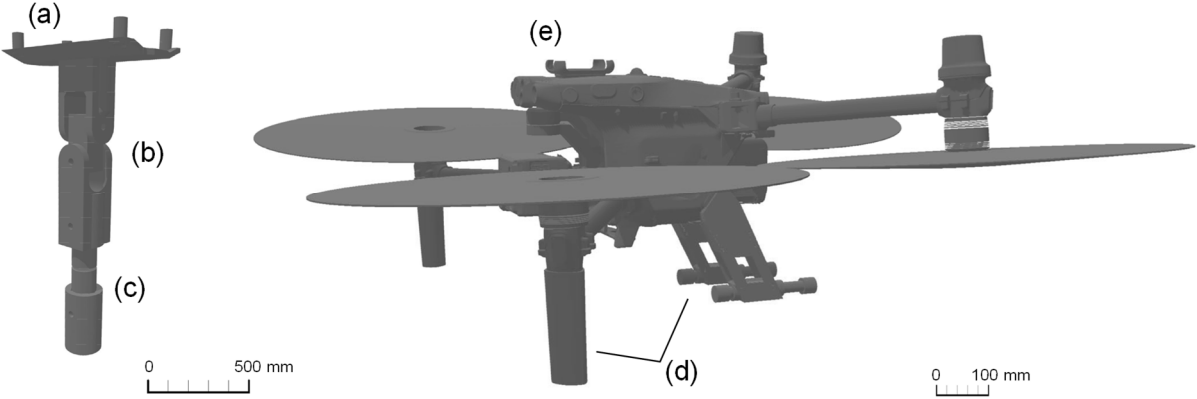
415

416



417 図 2

418

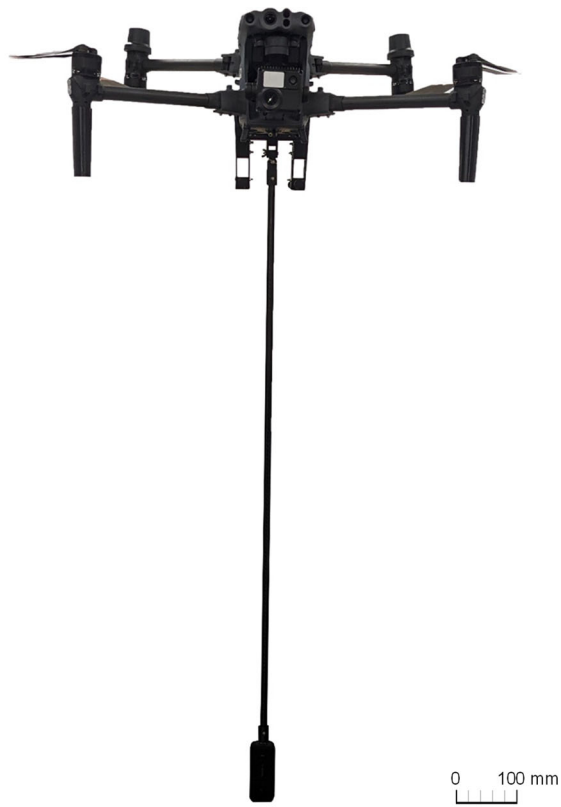


419

420

421 图 3

422

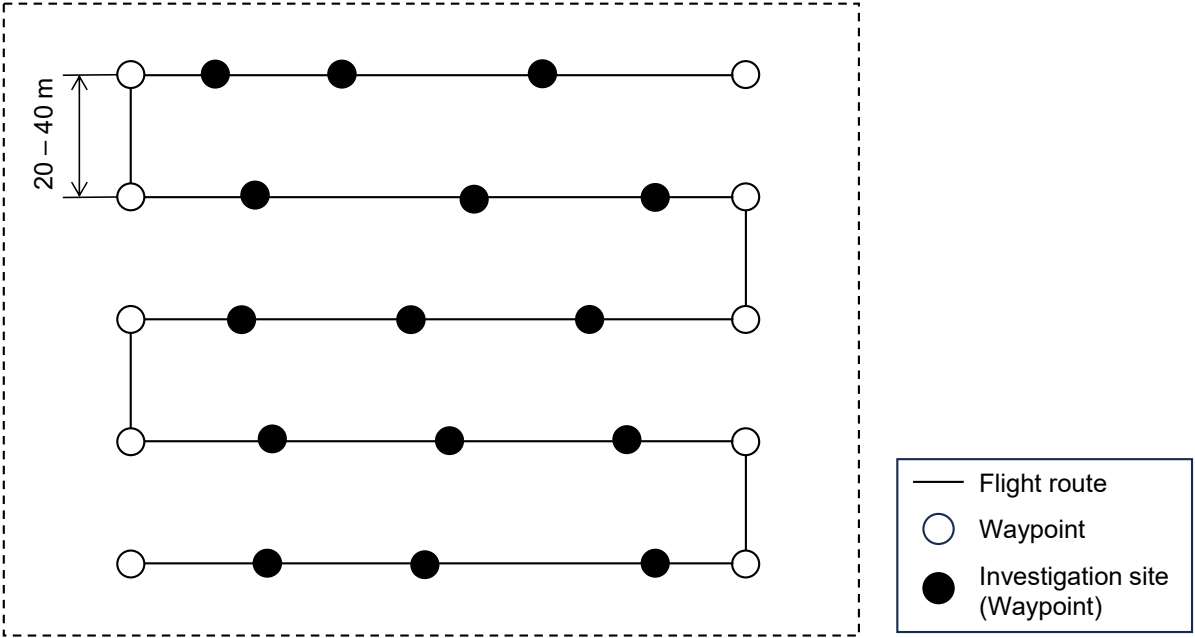


423

424

425 図 4

426

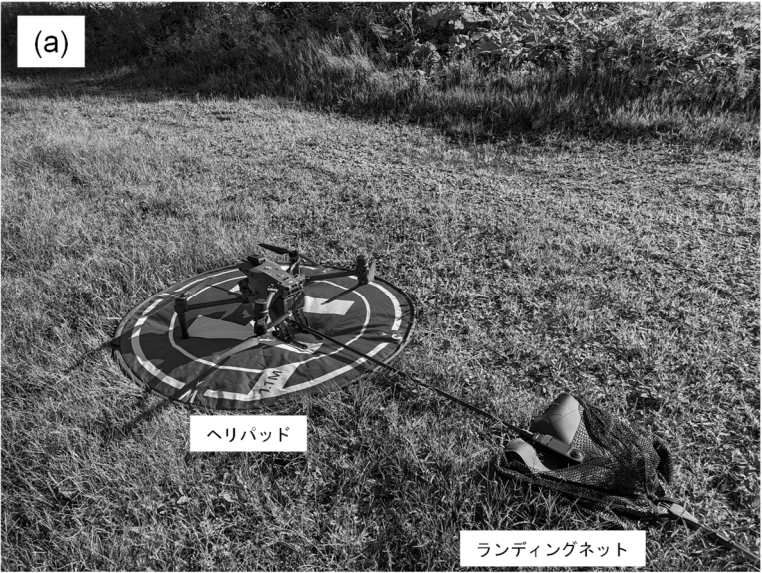


427

428

429 図 5

430



431

432 図 6

433



434

435

436 图 7

437



438

439

440

441 图 8

442



443

444

445