

**Prof. dr hab. inż. Michał Ciałkowski**  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Instytut Energetyki Ciepłej  
Politechnika Poznańska  
ul. Piotrowo 3  
60-965 Poznań

Poznań, 18 września 2024r.

## **RECENZJA**

### **rozprawy doktorskiej mgra inż. Rafała Frąckowiaka pt.: Badanie i optymalizacja zastosowań kamer multi spektralnych i termowizyjnych w inżynierii leśnej.**

Podstawę do opracowania recenzji pracy doktorskiej mgra inż. Rafała Frąckowiaka stanowi pismo z Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna o sygnaturze RND.IM.521.12.2024 podpisane przez Przewodniczącego Rady Prof. dra hab. inż. Roberta Sitnika.

Praca zawarta jest na 158 stronach i jest podzielona na 11 rozdziałów . Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Zdobysław Goraj z Politechniki Warszawskiej.

#### **1. Uwagi wstępne**

Rozwój techniki pozwala na prowadzenie badań przyrodniczych nie tylko w szerszym zakresie lecz również przy niższych kosztach. Przykładem jest wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych wyposażonych w kamery ( termowizyjne lub multispektralne ) do inwentaryzacji jak również do obserwacji środowiska przyrodniczego. Korzyści z zastosowania bezzałogowych statków powietrznych są szczególnie widoczne w badaniu trudno dostępnych obszarach leśnych ( rezygnacja z pieszo poruszających się badaczy ), obserwacji zwierzyny bez uciążliwego oddziaływania na nią ( hałas w przypadku samolotów z klasycznym napędem oraz zmniejszenie stresu zwierząt z tym związanym ). Prowadzenie badań w różnych porach dnia i roku. Wykorzystanie nowych możliwości badań z użyciem bezzałogowych statków powietrznych wymaga zoptymalizowania szeregu parametrów takich jak na przykład : pora roku czy dnia, wybór rodzaju statku bezzałogowego z kamerami, wysokość i prędkość lotu, czas pracy baterii, wybór miejsca międzylądowania, wielkość obszaru badawczego, ograniczenia prawne i jeszcze szereg innych parametrów.

Nie bez znaczenia jest możliwość szybkiej identyfikacji obszarów zagrożonych różnymi pasożytami ( na przykład owadami zagrażającym równowadze biologicznej). Zatem zastosowanie platformy bezzałogowej z zintegrowanymi kamerami multispektralną i termowizyjną dają nowe możliwości badania stanu przyrody jak również pozwalają na bezinwazyjne szacowanie stanu populacji zwierzyny bytującej w badanym obszarze przy istotnie mniejszym oddziaływaniem hałasu.

Nowoczesne kierunki badań z zastosowaniem bezzałogowych statków powietrznych stanowią priorytetowe kierunki Unii Europejskiej ( dokument Flightpath 2050 ).

Dobór kamer jest podstawowym problemem, gdyż w lasach liściastych występuje wysokie tłumienie listowia co implikuje określenie prędkości i wysokości przemieszczania się kamer na wybranym statku bezzałogowym. Wybór rodzaju statku bezzałogowego zależy od charakteru badanego ekosystemu. Ze strony technicznej należy uwzględnić sterowanie statkiem bezzałogowym w różnych warunkach pogodowych ( ograniczona widoczność czy zasięg łączności ). Ważnym elementem jest niezawodność jak również niski koszt przeprowadzenia badań odniesiony do tradycyjnego sposobu badania ekosystemu czy inwentaryzacji zwierzyny.

**Wymienione aspekty nie są zdeterminowane opisem matematycznym przeto dla opracowania parametrów lotu statku bezzałogowego dla zbadania ekosystemu należy dokonać dużej liczby testów praktycznych i spośród nich wybrać optymalny dla otrzymania wiarygodnych wyników badawczych z użyciem:**

- kamery multispektralnej ( monitorowanie stanu drzewostanów lasów iglastych, liściastych i dalej ich stanu zagrożenia przez szkodniki, stanu wilgotności podłoża jak również warunki atmosferyczne) ,
- kamery termowizyjnej dla zbadania stanu zagęszczenia zwierzyny grubej .

Parametry pracy statku bezzałogowego będą miały różne wartości dla różnych obszarów ( na przykład obszary górskie, pagórkowate, nizinne, otwarte, o różnym stopniu nasłonecznienia, wilgotności, temperaturze i ciśnieniu powietrza, sile wiatrów, ograniczeniach prawnych ), przeto określenie rodziny tych parametrów stanowi cenną wiedzę do wykorzystania w równych obszarach badawczych. Wspomniane wiatry, temperatura powietrza, pora wykonywania badań, ograniczenia prawne jak również wysokość lotu są istotne dla bezpiecznego przeprowadzenia badań.

Doktorant dla przeprowadzenia testów terenowych wybrał obszar Nadleśnictwa Czarna Białostocka charakteryzujący się niewielką zróżnicowaną wysokością co jest właściwe dla terenów nizinnych.

Dla wspomnianego obszaru Doktorant przeanalizował wybrane cechy klimatu dla zapewnienia bezpieczeństwa wykonywania lotu przez bezzałogowe statki powietrzne. Cechy klimatu w różnych przedziałach czasowych zestawiono w postaci tabelarycznej ( temperatura i średnia prędkość wiatru ) i w postaci wykresu wynikającego z pomiarów średniej temperatury powietrza w stacji meteorologicznej w Białymstoku.

Analiza przebiegów temperatury powietrza, ciśnienia, zachmurzenia i dni słonecznych oraz wiatrów pozwala na określenie tych parametrów do przeprowadzenia bezpiecznych lotów. Rozmieszczenie rodzaju drzewostanu z uwzględnieniem jego wieku i pory roku jest istotne przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej.

**Analiza omówionych parametrów pracy bezzałogowej platformy z kamerami termowizyjną i multispektralną pozwoliła Autorowi na określenie celu pracy, to jest :**

- wykrywania zwierzyny grubej,
- analizy stanu drzewostanów zagrożonych przez szkodniki, lokalizacje potencjalnie osłabionych drzew, lokalizacje wywrotów, złomów.

Dla realizacji badań ekosystemu należy wybrać bezzałogowe platformy, których wyposażenie we wspomniane wyżej kamery pozwoli na wiarygodne dostarczenie wyników badań. Wymagania te Autor opisuje w punkcie 1.2.3. Przedstawione przez Autora wstępne analizy prowadzą do postawienia też badawczych :

- ❖ dołączenie do wyposażenia platformy kamery termowizyjnej pozwala na oszacowanie zwierzyny grubej ( łoś euroazjatycki, jelen śzlachetny, dzik euroazjatycki ),

- ❖ wykorzystanie bezzałogowych platform lotniczych wyposażonych w kamerę multispektralną jest podstawą do przeprowadzenia skutecznych zabiegów pielęgnacyjnych w lasach,

## 2. Omówienie pracy

Analiza literatury przedmiotu pozwala Doktorantowi na zwrócenie uwagi na:

- czytelność termogramów w zależności od pory dnia i roku,
- właściwości termiczne zwierzyny latem i zimą,
- wykrywalność zwierzyny,
- wpływ wiatru ( zwiększona wymiana ciepła na powierzchni zwierzyny, bezpieczeństwo ),
- zalety stosowania kamer termowizyjnych w stosunku do kamer wizyjnych,
- zagadnienie optymalizacji wysokości lotu i kąta widzenia kamery ( minimalna liczba pikseli ).

Istotnym problemem jest analiza pozyskanych danych z kamery termowizyjnej. Z analizy literatury wynika, że wyniki algorytmicznej analizy są w wielu przypadkach gorsze niż ich czasochłonna ręczna analiza. Autor w oparciu o literaturę podaje przyczyny nieskuteczności automatycznej analizy termogramów. Powyższe uwagi wskazują na potrzebę wykonania szeregu badań celem zwiększenia wykrywalności zwierzyny.

Jedną z prostszych metod szacowania liczby zwierzyny jest metoda pędzeń próbnych. Wyniki metody tej można wykorzystać w prostych przypadkach do porównania z wynikami badań z zastosowaniem platformy bezzałogowej z kamerą termowizyjną.

Biorąc pod uwagę koszty organizacyjne, to do wykonania inwentaryzacji z kamerą termowizyjną wystarczą 2 osoby.

Wykrywanie obszarów o trudnym dostępie ( np. bagienne ) narażonych na degradację w wyniku działania szkodników jest bardzo trudne lub niemożliwe dla badaczy poruszających się pieszo. Tutaj znaczenie bezzałogowych platform (BSP) z kamerą multispektralną jest bezdyskusyjne.

Połączenie leśnej mapy numerycznej zsynchronizowanej ze zdjęciami wykonanymi w podczerwieni (<https://geoportal360.pl/blog/ortofotomapa-jak-powstaje-i-do-czego-sluzy/>) z bezzałogowego powietrznego statku ( BSP ) pozwala na bieżące określenie między innymi

- ❖ lesistości kraju,
- ❖ stanu zdrowotnego roślin,
- ❖ wilgotności gleby,
- ❖ dokładnej lokalizacji luk i przerzedzeń w drzewostanach,
- ❖ wyznaczenie prawidłowego przebiegu granic wyłączeń,
- ❖ cech taksacyjnych drzewostanu, takich jak: skład gatunkowy, zwarcie, formy mieszaniania, ekspozycja i nachylenie stoku, liczba, wielkości i lokalizacja powierzchni niestanowiących wydzieleni ( tzn. kępy, gniazda, luki, przerzedzenia ) – źródło: „Wykorzystanie ortofotomapy w Lasach Państwowych”, Krzysztof Okła – Wydział Urządzania Lasu i Geoinformatyki DGLP

Przykładowe wykorzystanie ortofotomapy przedstawia Doktorant na rys. 6 ( miejsca intensywnego wydzielania się posuszu sosnowego ) i 7 ( uszkodzenie pól kukurydzy przez zwierzynę i inne przykłady uszkodzeń, rys. 8 i 9 ). Bez wykorzystania statków bezzałogowych lokalizacja pokazanych na tych rysunkach zmienionych obszarów byłaby utrudniona lub wręcz niemożliwa. Dalsze obszary zastosowania BSP z kamerą termowizyjną omawia Autor w punkcie inwentaryzacji zjawisk kłęskowych. Zjawiska kłęskowe istotnie wiążą się z zagadnieniami ochrony lasu. Autor w tej części cytuje na podstawie przeglądu literatury stosowanie różnych kamer do badania stanu wody w uprawach rolnych, zdrowej i chorej roślinności, przytacza wskaźniki kondycji roślinności, wykorzystanie kompozycji

barwnych ( między innymi do rozróżniania lasów liściastych od iglastych ). Bardzo ważnym elementem pielęgnacji lasu jest obserwowanie różnych szkód do których należy okieścić. Również potrzeba badania miejsc niedostępnych o cennych walorach przyrodniczych może być z powodzeniem dokonane przez zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych. Nie umyka uwadze Autora problem ochrony przed kłusownictwem.

Zachowanie równowagi pomiędzy rozwojem gospodarczym kraju a ochroną przyrody nie powinno stać w sprzeczności. Przeto dla właściwego zaplanowania inwestycji i jej nadzorowania w pobliżu lasów i terenów ochronnych jak również turystyki jest efektywniejsze przez wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych. Pozwala to na ciągłe czy okresowe monitorowanie tych procesów.

Wielość problemów do rozwiązania przedstawionych w pracy, do których mogą być wykorzystane bezzałogowe statki powietrzne jest duża. Rozwiązywanie tych problemów wymaga stosownej aparatury zamontowanej na bezzałogowych statkach powietrznych. Aparatura ta jest zależna od realizowanego zadania w określonym środowisku ( zachmurzenie, mgła, silne wiatry, różnorodność roślinna, znajomość cech identyfikowanych gatunków zwierząt i ich zwyczajów). Wiedza z tym związana determinuje bezzałogowy statek z wyposażeniem (rodzaj napędu, kamery, baterie ) .

Wykonanie lotów ( wysokość, czas, miejsca startu i lądowania, lokalizatory, awaryjne lądowanie, wykonanie zwisu ) wymaga nie tylko technicznego przygotowania bezzałogowego statku z kamerami lecz musi być zgodne z obowiązującymi przepisami Urzędu Lotnictwa Cywilnego Dla uzyskania stabilnego obrazu z kamery termowizyjnej wymaga się jej zamontowania na gimbalu zaś dla kamery multispektralnej wymaga się skierowania jej obiektywu możliwie prostopadle do podłoża. Użycie bezzałogowego statku powietrznego odbywa się według określonych scenariuszy opisanych przez Autora w punkcie 2.

Uzasadnienie wyboru platformy bezzałogowej Autor opisuje w punkcie 3. Argumentami za użyciem wielowirnikowców są : cicha praca, możliwość dokonania zwisu, zmiany wysokości, wykonanie pionowego startu i lądowania w dostępnych miejscach ( luki pomiędzy drzewami ), operowanie w ciasnej przestrzeni, przerwy dla wymiany baterii, duża sterowalność. Zalety te pozwalają na inwentaryzację drzewostanu czy zwierzyny na dużym obszarze.

W punkcie 4 Doktorat przedstawia podstawowe elementy pracy wielowirnikowca, działania sił i momentów powodujących jego ruch. Jest to opis jakościowy wystarczający do sterowania wielowirnikowcem.

**Zarysowane fakty istotnie wskazują na zalety stosowania bezzałogowych ( wielowirnikowych ) statków powietrznych. Pokazanie szeregu możliwych zastosowań bezzałogowych statków powietrznych na podstawie literatury przedmiotu i rzeczowych przypadków stanowiących dorobek Doktoranta świadczy o szerokim spojrzeniu Doktoranta na ochronę przyrody.**

Uzyskanie poprawnej konfiguracji platformy bezzałogowej czy to z kamerą multispektralną czy termowizyjną wymaga wyboru kamery i wykonania licznych testów nad wybranym obszarem leśnym ( obręb Czarna Białostocka dla inwentaryzacji

zwierzyny, rys. 23 ). Przy wyborze kamery należy rozważyć : kąt widzenia kamery, rozdzielczość terenową zdjęć, szacowany obszar pokrycia w zależności od wysokości lotu (50, 100, 150, 200 metrów nad ziemią ). Szacunkowe obszary pokrycia w funkcji parametrów kamery i wysokości lot Autor przedstawił w tabeli 10. Dla wybranej kamery *Flir Vue Pro R* .

Rys. 25 przedstawia liniową zależność wysokości w funkcji rozdzielczości terenowej piksela. Zwiększenie kąta widzenia kamery zwiększa pokrycie inwentaryzowanego obszaru zaś zmniejszenie kąta widzenia jest korzystne dla wyszukiwania zwierzyny. Jednakże należy wziąć pod uwagę generowanie hałasu przez wielowirnikowca, który jest zależny od wysokości lotu i wielkości ( ciężaru ) samego wielowirnikowca. Zastępując większy wielowirnikowiec dwoma lub trzema wielowirnikowcami hałas będzie mniejszy lecz na długości inwentaryzowanej powierzchni trzeba dokonać międzylądowań dla wymiany baterii. Szereg doświadczeń Doktorant uzyskał przez realizację usługi badawczej pt.: Weryfikacja innowacyjnej metody inwentaryzacji zwierzyny grubej z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych. Powyższe uwagi są istotne dla oszacowania niezbędnego czasu lotu z kamerą termowizyjną skierowaną prostopadle do podłoża na co wpływ mają następujące parametry : inwentaryzowany obszar, szerokość i długość inwentaryzowanej powierzchni, pokrycie boczne pomiędzy transektami ( przyjęto 10 % ) jak również dodatkowy czas wykonania operacji. Do wytypowania właściwego obiektywu do określenia czasu inwentaryzacji zwierzyny w funkcji wysokości lotu Autor dokonał obliczeń przedstawionych w tablicy 11. Dalsze obliczenia związane są z oszacowaniem czasu lotu z kamerą termowizyjną, oszacowaniem rozdzielczości piksela w funkcji kąta pochylenia kamery. Zachowanie lotu poziomego na wysokości nie mniejszej niż 70 m od poziomu gruntu pozwala ( przy zmienności wysokości terenu ) na bezpieczny lot nad drzewostanem.

Na podstawie przedstawionych wymagań Autor dokonał wyboru wielowirnikowca gwarantującego około godzinną pracę, zwartą konstrukcję i generowaniu niewielkiego hałasu. Dla wytypowanej kamery przyjęto dwukrotną wymianę baterii.

Osiągnięcie jednego z celów pracy, to znaczy efektywne liczenie zwierzyny wymaga określenia liczby pikseli na których powinna zostać zarejestrowana długość zwierzęcia Autor wziął pod uwagę dwa warianty pikseli ( 10 i 20 ) wystarczające do identyfikacji zwierzyny : sarny europejskiej, jelenia szlachetnego, łosia euroazjatyckiego i dzika europejskiego. Dla długości ich ciał zarówno dla wariantu pierwszego ( 10 piksel ) i drugiego ( 20 pikseli ) Autor wyznaczył wymagane wartości wysokości lotu. Dla zachowania przepisów obowiązującego prawa test rozpoczęto od wysokości 120 metrów powyżej poziomu gruntu z możliwością jej obniżenia.

Dla prawidłowego przeprowadzenia misji liczenia zwierzyny łownej za pomocą kamery termowizyjnej nie powinna zachodzić potrzeba wymiany baterii zaś pokrywanie się boczne transektów rzędu 10% sprzyja prawdopodobieństwu podwójnego liczenia zwierzyny lub też uznanie dwóch osobników za jednego. Na podstawie zebranego doświadczenia przyjęto, że odległość startu lub lądowania wielowirnikowca od inwentaryzowanej powierzchni powinna się mieścić w granicach 200 – 300 metrów co istotnie redukuje negatywne oddziaływanie hałasu na zwierzynę. Pozyskane doświadczenie Autor wykorzystał do modyfikacji lotów z kamerą termowizyjną przy założeniu lotu bezzałogowego statku z jedną baterią jak również poszerzeniem odległości

pomiędzy środkami sąsiadującymi transektami do 120 – 150 metrów. Miejsce lądowania powinno być oddalone od inwentaryzowanej powierzchni o ok. 200 – 300 metrów co zapewnia minimalne natężenie dźwięku.

Zarysowane uwarunkowania stanowią podstawę do wyboru statku bezzałogowego wyposażonego w kamerę multispektralną, która musi spełniać wykorzystanie kompozycji barw jak również być pomocna w określaniu wybranych wskaźników vegetacyjnych. Autor wytypował kamerę na podstawie porównań [106] wielu wielowirnikowców. Parametry techniczne tej kamery zestawiono w tablicy 25. Do opracowania zdjęć z kamery multispektralnej Autor wykorzystał dostępne oprogramowanie Aigisoft Metashape Professional Edition pozwalające na tworzenie, między innymi zdjęć trójwymiarowych, cyfrowego modelu terenu, ortofotomap. Jednym z ważnych zastosowań tego pakietu była możliwość opracowania materiałów pozwalających na wykrycie miejsc z osłabionymi drzewami czy to zasiedlonymi przez szkodniki czy też będącymi martwymi ( posusz jałowy ) lub złomami albo wywrotami. Ponadto cenne jest sporządzenie ortofotomap czy też indeksów vegetacyjnych. Opracowane dane na podstawie zdjęć zweryfikowano w terenie.

Jednym z czynników poprawnego procesu inwentaryzacji za pomocą platformy bezzałogowej jest niezaburzona łączność pomiędzy platformą a operatorem. Stało się to powodem wykorzystania anteny kierunkowej. Jakość łączności przebadano w obszarze leśnym i w przestrzeni otwartej.

Zestawienie aparatury badawczej pozwoliło Doktorantowi na weryfikację użyteczności kamery termowizyjnej. Na podstawie wykonania misji lotów na wysokości 120 m powyżej ziemi w porze słonecznej ( 10.X.2021 ) z kamerą termowizyjną i kamerą w świetle widzialnym ( RGB ) stwierdzono, że inwentaryzacja zwierzyny podczas lotów słonecznych jest nieskuteczna. Powtórzenie misji 14.X.2021 roku w godzinach wieczornych pozwoliło na rejestrację sygnatur ciepłych zwierząt. Lot na wysokości 120 m nie pozwolił na określenie gatunku zwierząt ( rozmiar piksela terenowego wynosił 11 cm GSD) zaś wykonanie lotu na poziomie 80 m zmniejszyło długość piksela terenowego do 7 cm co spowodowało większą czytelność termogramów. Obniżeniu wysokości lotu towarzyszy zwiększenie natężenia dźwięku pracującego wielowirnikowca zaś jego oświetlenie może być stresujące dla zwierzyny powodując efekt odstraszenia. Doktorant zwraca też uwagę na hałas towarzyszący procedurze lądowania i startu ( związanego z potrzebą wymiany baterii ) co jest szczególnie istotne jeśli operator znajduje się w środku inwentaryzowanego obszaru. Stąd proponuje się oddalenie miejsca startu i lądowania wielowirnikowca o 200 – 300 metrów od inwentaryzowanej powierzchni. Fakty te potwierdza wykonanie misji w przedziale czasu od 15.X do 17.XI. Fakt ten został potwierdzony eksperymentalnie. Pora wykonania lotów godzinę po zachodzie słońca lub przed wschodem słońca jest niezwykle istotna, gdyż wtedy zwierzęta wykazują swoją aktywność i prawdopodobieństwo, że nie znajdują się pod okapem drzew. Swego rodzaju wyjątkiem jest dzik, który największą aktywność wykazuje w późnych godzinach nocnych. Pora między zachodem a wschodem słońca powoduje zwiększenie kontrastu termalnego pomiędzy zwierzyną a jej otoczeniem co jest szczególnie istotne dla kamery termowizyjnej. Pora nocna nie pozwala na użycie kamery RGB. Doświadczenia z kamerą termowizyjną wskazują na jej zastosowanie do wiarygodnej identyfikacji większych gatunków zwierząt, są to jeleni i łoś. Porównanie wyników szacowania grubej zwierzyny otrzymanych z kamery termowizyjnej z wynikami ankietowymi myśliwych

odpowiedzialnych za obszar łowiecki, jedynie w przypadku sarny europejskiej jest duża zgodność. Doktorant podaje przyczyny różnic w liczeniu zwierzyny grubej. Jedną z nich jest wykonanie misji w niewielkich przedziałach czasowych. Innym sposobem inwentaryzacji jest metoda całorocznej obserwacji a porównanie liczenia zwierzyny grubej z wynikami liczenia z misji bezzałogowych statków powietrznych też wykazuje rozbieżności. Przykładem jest inwentaryzacja jelenia szlachetnego charakteryzującego się skupiskowym typem występowania w okresie zimowym a w okresie jesiennym zwierzyna gromadzi się w mniejszych stadach co pozwala na zmniejszenie błędu oszacowania jej liczby. Oznaczenie płci jelenia szlachetnego udało się Doktorantowi w dwóch przypadkach. Omówione w pracy metody inwentaryzacji zwierzyny ( pędzenie próbne, całoroczna obserwacja, loty wielowirnikowca z kamerami ) nie dają w pełni wiarygodnych wyników. Różnice wynikają z wielu aspektów, które zostały przedstawione w pracy.

Doświadczenia zebrane przez Doktoranta wskazują na najodpowiedniejszy czas wykonywania inwentaryzacji zwierzyny, którym jest jesień ( negatywne oddziaływanie między innymi listowia w okresie letnim ).

**Przeprowadzone badania wskazują na ważne elementy niezbędne do możliwie jak najdokładniejszej inwentaryzacji zwierzyny grubej a są to : znajomość zwyczajów tych zwierząt, wpływ pory dnia i roku i pogody, wysokość lotu wielowirnikowca i jego prędkości, miejsce startu i lądowania, wybór wielowirnikowca pod względem generacji hałasu i czasu pracy, zasięg łączności, pojemność baterii. Doktorant w swej pracy zawarł te informacje, które są wynikiem przeprowadzonych wielu eksperymentów.**

Do realizacji drugiego celu pracy, to jest analizie stanu drzewostanów, Doktorant wykorzystał bezzałogowy statek powietrzny zaopatrzonego w kamerę multispektralną. Kamera ta jest przydatna do wykonania ortofotomapy ( w barwach naturalnych oraz kompozycji barwnej ) jak również mapy indeksów wegetacyjnych. Materiały pozyskane z misji z kamerą multispektralną są analizowane za pomocą oprogramowania QGIS. Wyniki tej analizy służą do lokalizacji miejsc na które ma zwrócić uwagę operator pieszy. W lokalizacjach tych znajdują się mogą osłabione czy martwe drzewa, wywroty, złomy. Inwentaryzacja piesza pozwala również na znalezienie drzew będących posuszem jałowym co nie zawsze jest widoczne w opracowaniu wspomnianym wyżej oprogramowaniem. Ważną zaletą analizy za pomocą kamery multispektralnej jest wskazanie miejsc z osłabionymi lub chorymi drzewami. Bez tej informacji obserwator pieszy miałby trudności w znalezieniu tych miejsc. Ma to oczywiście wpływ na koszty określenia tych lokalizacji. W tabeli 30 zestawiono wykryte stany drzewostanu za pomocą analizy z wykorzystaniem wspomnianego oprogramowania a inwentaryzacją w terenie . Skuteczność wykrycia nieprawidłowości kamerą multispektralną wyniosła ~64,28%. Stanowi to kolejne uzasadnienie do stosowania wielowirnikowców z kamerą multispektralną do badania stanu drzewostanu. Analiza map indeksów wegetacyjnych pozwoliła na wykrycie posuszu jałowego świerka pospolitego. Dla zwiększenia pewności oceny wybranych obszarów można dokonać zawisu wielowirnikowca co oczywiście przedłuża czas misji. Ciekawe spostrzeżenie Autora dotyczy inwentaryzacji młodników, które są gęste o zmniejszonej widoczności co utrudnia inwentaryzację. Tutaj jest szczególnie ważna rola kamery multispektralnej pozwalająca na wykonanie zdjęć, które można szybko przeanalizować pod kątem osłabionej kondycji młodnika.

Jak już wspomniano, hałas wywołany przez wielowirnikowiec może stresować zwierzynę, przeto Autor dokonał pomiaru natężenia hałasu dla różnych odległości mikrofonu od miejsca startu i lądowania bezzałogowego statku powietrznego. W procesie startu statku generowany hałas

jest mniejszy niż w procesie jego lądowania ( trwa dłużej niż start ). Wykresy na stronie 119 pokazują przebiegi poziomu dźwięku w przedziale czasu <0,200> sekund w zależności od poziomu wyniesienia statku na wysokość 80 m i 120 m przy dwóch ustawieniach mikrofonu ( 4 i 200 metrów od miejsca startu ). Różnice w poziomie natężenia dźwięku są nieistotne. Oddalenie miejsca startu i lądowania o 200 m od inwentaryzowanej powierzchni nie powoduje efektu płoszenia zwierzyny.

Poprawne przeprowadzenie misji inwentaryzacyjnej wymaga nieprzerwanej i niezakłóconej łączności platformy z aparaturą sterującą. Zatem zachodzi pytanie do jakiej odległości pomiędzy operatorem a bezzałogowym statkiem powietrznym ( w funkcji wysokości lotu ) zachodzi bezawaryjna inwentaryzacja. Z badań autora wynika, że lot na wysokości 80 m AGL dla wytypowanego sprzętu powoduje sprawne przeprowadzenie misji na odległość 1200-1300 metrów. Istotną rolę odgrywa też zasięg wzrokowy w terenie otwartym co Autor szczegółowo omawia w swej pracy.

Rozpoczęcie inwentaryzacji lasu wymaga ustawienia początkowych (szacunkowych ) parametrów bezzałogowego statku powietrznego. Do tego celu Autor wykorzystuje oprogramowanie xcopter. Danymi wejściowymi do tego programu są : liczba wirników, masa wielowirnikowca, cechy baterii i silników, prędkość lotu, planowany zasięg i czas lotu. Na podstawie doświadczenia operatora i znajomości inwentaryzowanego terenu pierwotne parametry ulegają modyfikacji.

Przeprowadzone przez Doktoranta badania pozwoliły Mu na sformułowanie najważniejszych wniosków :

❖ badanie stanu zdrowotnego lasu ( kamera multispektralna )

- do określenia miejsc z osłabionym drzewostanem użyteczna jest teledetekcja niskiego pułapu co istotnie ułatwia odszukanie miejsc wyznaczających pieszą inwentaryzację i dostarcza szczegółowszy opis rodzajów drzew ( iglaste, liściaste ) co na podstawie kompozycji CIR może prowadzić do fałszywych interpretacji,
- zobrazowanie CIR w połączeniu z mapami indeksów wegetacyjnych pozwalają na identyfikację sosen porażonych jemiolą pospolitą; metoda ta jest przydatna w inwentaryzacji młodników ( ich piesza identyfikacja jest bardzo utrudniona ),
- ważnym elementem inwentaryzacji jest zachowanie niezakłóconej łączności pomiędzy bezzałogowym statkiem powietrznym a operatorem i z doświadczeń Doktoranta jest to zapewnione w trakcie lotu na wysokości 80 m AGL i odległości poziomej w przedziale 1200 – 1300 m.

❖ inwentaryzacja zwierzyny ( kamera termowizyjna )

- istotny jest wpływ wyboru kamery do inwentaryzowania poszczególnych gatunków zwierzyny grubej, które różnią się rozmiarami,
- wpływ pory roku ( optymalny według opinii myśliwych to jesień ) na wiarygodność policzenia zwierzyny grubej,
- brak obiektywnych wyników inwentaryzacji zwierzyny grubej na podstawie wyników uzyskanych z bezzałogowego statku powietrznego,
- loty nie należy wykonywać zimą ze względu na skupiskowy typ występowania zwierzyny,
- loty w terenach leśnych nie należy wykonywać latem ze względu na tłumiący charakter listowia a ponadto zachodzi możliwość występowania efektu maskującego rozgrzanych koron drzew,
- istnieje ryzyko wielokrotnego policzenia zwierzyny lub uznanie dwóch osobników za jeden,



- przeprowadzone badania wskazały na możliwość określenia płci osobników co wymaga jeszcze dodatkowych badań,
- możliwość generowania filmu z przebiegu misji co umożliwiłoby lepsze określenie rozmiaru zwierzęcia i przyporządkowanie do danego gatunku ; film ponadto może pokazywać sposób przemieszczania się zwierzęcia charakterystyczny do danego gatunku,
- redukcja stresu zwierzęcia wywołanego przez hałas wielowirnikowca, miejsca jego startu i lądowania jest uzyskiwane przez zwiększenie odległości od inwentaryzowanej powierzchni.

### 3. Uwagi

- Zwyczajowo numerację kolejnych wzorów ujmuje się w nawiasy okrągłe a nie klamrowe, które są stosowane do numeracji cytowanej literatury.
- Str. 20<sup>12</sup> , jest ciepłe a powinno być ciepłne
- Str. 20<sub>3</sub> , jest ..cieplejsza.. a powinno być wyższa,
- Str. 21<sub>16</sub> , jest : Pewnym problem... a powinno być Pewnym problemem...
- Str. 27<sub>7</sub> , jest : ..istnienie... a powinno być ...istnieje...
- Str. 29<sup>11</sup> , jest ...w równaniu... , nigdzie nie m równania ! O co tutaj chodzi ?,
- Str. 31<sup>5</sup> , jest ... miejsca objęte **mała** retencja, powinno być **retencją**,
- Str. 41<sub>2</sub> , jest klempe a powinno być klempe ,
- Str. 49-52, opisywanie wysokomanewrowych samolotów jest zbędną częścią ,
- Str. 61<sub>7</sub> , jest wystrzyżenie, chyba powinno być wystrzeganie,
- Str. 82<sup>2</sup> , jest : sygnatury ciepłe a powinno być sygnatury ciepłne.

Uwagi te nie umniejszają wartości merytorycznej omawianej pracy doktorskiej

### 4. Podsumowanie

Stosowane przez doktoranta metody badawcze są prawidłowe do rozwiązania postawionego celu pracy. Zgromadzone przez Doktoranta doświadczenie pozwoliło na zastosowanie w praktyce wyników badań do inwentaryzacji zwierzyny grubej z wykorzystaniem kamery termowizyjnej. Ponadto wykonano pierwsze badania dotyczące płci badanej zwierzyny. Zgromadzone doświadczenie zostało przedstawione w jasny sposób w postaci wniosków. Ważną częścią pracy było przedstawienie metodyki badań dotyczącej zdrowotności lasu z zastosowaniem kamery multispektralnej.

Przedstawione w pracy wyniki badań stanowią podstawowe kompendium wiedzy niezbędnej do prowadzenia badań nad inwentaryzacją zwierzyny grubej i zdrowotności lasu z wykorzystaniem kamery multispektralnej i termowizyjnej. Stanowi to oryginalne osiągnięcie Doktoranta. Doktorant prezentuje ogólną wiedzę w swojej dyscyplinie i jest przygotowany do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

W moim przekonaniu rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Frąckowiaka spełnia wymagania zawarte w art.13 ustawy z dnia 14 marca 2003 (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z póź. Zm. Dz. U. z 2005 r. nr164 poz. 1365 o stopniach naukowych i tytule naukowym.

Wnoszę więc do Rady Naukowej Inżynierii Mechanicznej Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Zawarte treści w doktoracie wynikające z ogromu badań wykonanych przez Doktoranta o znaczeniu praktycznym skłaniają mnie do postawienia wniosku o jej wyróżnienie.

*Michał Ziarkowski*