

Wpłynęło dnia .....16. 10. 2023.....

Zarejestrowano pod nr .....

Łódź, dn. 20.09.2023 r.

Podpis .....

dr hab. inż. Grzegorz Granosik, prof. uczelni  
Politechnika Łódzka  
Instytut Automatyki

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Grzegorza Suchanka na temat  
„Budowa i algorytmy sterowania inspekcyjnego robota latającego”**  
(Opinia niniejsza została przygotowana na zlecenie Prodziekana Wydziału  
Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej  
Akademii Górniczo-Hutniczej)

### 1. Przedmiot rozprawy

Badania dotyczą autonomicznego robota latającego przeznaczonego do pomiaru zanieczyszczeń i poszukiwania źródeł tych zanieczyszczeń. Z jednej strony to zagadnienie o ogromnej wartości społecznej, dbanie o środowisko jest tematem niezwykle aktualnym, często poruszonym w kontekście smart cities. Z drugiej aktualny temat naukowy, podejmowane przez zespoły badawcze na całym świecie, choć raczej niszowy – może także ze względu na naturalne trudności wynikające z silnego zakłócania mierzonego środowiska przez przyrząd pomiarowy. Biorąc pod uwagę publikacje z dwóch ostatnich lat zgromadzone w bibliotece cyfrowej IEEE Explore można znaleźć ponad 20 artykułów na ten temat (stosując słowa kluczowe: air pollution i UAV).

Realizacja takiego zadania wymaga podejścia interdyscyplinarnego i rozwiązania szeregu problemów naukowych i technicznych, w szczególności dotyczących: modelowania propagacji zanieczyszczeń, modelowania przepływów wokół drona dla określenia zakłóceń pomiarów, planowania ruchów drona i pomiarów w trakcie poszukiwań, doboru platformy, czujników i algorytmów spełniających ograniczenia implementacyjne. Takiego interdyscyplinarnego zadania podjął się Pan Grzegorz Suchanek wykazując się wszechstronną wiedzą teoretyczną oraz umiejętnościami inżynierskimi, w zakresie różnych narzędzi symulacyjnych i budowy urządzeń robotycznych. Poświęcił temu zagadnieniu kilka lat pracy, bowiem projektowaniem drona zajmował się już podczas pracy magisterskiej (ukończony w 2017).

Przedstawiony w rozprawie projekt jest kompletny: obejmuje rozważania teoretyczne dotyczące sposobów modelowania przepływów i propagacji zanieczyszczeń, przeprowadzenie bardzo dużej liczby symulacji, analizy danych i wnioskowania naukowego, te prowadzą do sformułowania założeń konstrukcyjnych oraz syntezy algorytmów, co warto podkreślić projekt kończy się stworzeniem funkcjonalnego, pełnowymiarowego prototypu i eksperymentami w terenie.

Podsumowując te wstępne uwagi, stwierdzam że rozprawa mgr inż. Grzegorza Suchanka podejmuje bardzo ważną i trudną tematykę. Rozważany problem z całą pewnością można uznać za aktualne zagadnienie naukowe w obszarze automatyki i robotyki oraz w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, a do jego rozwiązania potrzebne były studia literaturowe (przeprowadzone w sposób właściwy), samodzielne rozszerzenie znanych wcześniej wyników teoretycznych oraz wykonanie szeregu testów

symulacyjnych i badań eksperymentalnych nowo opracowanych algorytmów na samodzielnie zbudowanych stanowiskach i prototypach. Aspekt praktyczny jest szczególnie wart podkreślenia, gdyż uwzględnia nie tylko teoretyczne rozwiązanie problemu ale bierze pod uwagę cały szereg ograniczeń technicznych, środowiskowych i trudności implementacyjnych.

## 2. Ocena zawartości rozprawy

Układ pracy jest logiczny i spójny. Podział treści jest właściwy i ściśle podporządkowany osiągnięciu celu pracy, który został sformułowany następująco:

*zaprojektowanie, wykonanie konstrukcji oraz synteza algorytmów sterowania wyspecjalizowanego wielowirnikowego robota latającego, dedykowanego do lokalizacji źródeł zanieczyszczeń powietrza cząstkami stałymi PM, a następnie weryfikacja poprawności jego działania. Autorski układu sterowania ma poszukiwać źródła zanieczyszczeń i wyznaczać trajektorię lotu w czasie rzeczywistym.*

Dodatkowo Doktorant wskazał 9 zagadnień szczegółowych, którymi się zajął w drodze do celu, tworząc rozwiązania oryginalne lub modyfikując podejście znane z literatury:

- budowa systemu pomiarowego robota, umożliwiającego w możliwie najkrótszym czasie zlokalizowanie najsilniejszego źródła zanieczyszczenia,
- modelowanie i analiza numeryczna pola przepływu z wykorzystaniem metody objętości skończonych w celu opracowania metod przetwarzania danych pomiarowych,
- opracowanie algorytmów lokalizacji źródeł emisji zanieczyszczeń,
- dobór parametrów algorytmu sterowania lotem oraz struktury robota na podstawie modelu dynamicznego ruchu i metody planowania eksperymentu,
- opracowanie projektu i wykonanie systemu pomiarowego robota wielowirnikowego,
- projekt i wykonanie autorskiego dedykowanego stanowiska hamowni zespołów napędowych robotów wielowirnikowych,
- opracowanie metody przetwarzania danych pomiarowych z zastosowanych czujników cząstek stałych, charakteryzujących się zmienną częstotliwością próbkowania, zależną od mierzonego stężenia,
- przeprowadzenie testów robota w warunkach eksploatacyjnych i weryfikacja zaimplementowanych algorytmów poszukiwania źródła zanieczyszczeń,
- przeprowadzenie analizy statystycznej, korelacji, głównych składowych i wizualizacji wielowymiarowych wyników przeprowadzonych pomiarów w warunkach rzeczywistych, dla czujników cząstek stałych w zależności od miejsca montażu tych czujników.

Cel pracy jest oryginalny i użyteczny, świadczy o bardzo dobrej znajomości aktualnych badań naukowych i rozwiązań komercyjnych dotyczących automatycznego pomiaru zanieczyszczeń przez pojazdy autonomiczne. Wykazuje też, że Autor potrafi formułować nowe, ambitne zadania badawcze oraz dążyć do ich co najmniej zadowalającego rozwiązania.

Praca liczy 236 stron, została podzielona na 6 zasadniczych rozdziałów i podsumowanie, oraz zawiera 4 załączniki z materiałami dodatkowymi. Każdy rozdział ma dobrze zorganizowaną strukturę z krótkim wprowadzeniem na początku i podsumowaniem jego treści na końcu, co wygodnie porządkuje wiedzę. Literatura obejmująca 235 pozycji jest trafnie dobrana, i niemal wszystkie zestawione publikacje są cytowane w rozprawie. Należy odnotować, że mgr Suchanek jest współautorem 7 przywołanych artykułów (w tym kilku opublikowanych w czasopismach z IF).

Rozprawę rozpoczyna Wprowadzenie, w którym Autor na początek dokonuje rozbudowanego i uporządkowanego przeglądu literatury analizując 4 zagadnienia: wykorzystania dronów do monitorowania środowiska, rodzajów i sposobów rozmieszczania czujników, modelowania zjawiska rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń, oraz metod poszukiwania źródeł tychże zanieczyszczeń. Dalej przytacza odpowiednie normy związane z pomiarem zanieczyszczeń oraz przykładowe dane pomiarowe ze środowiska lokalnego będącego w obszarze zainteresowania badacza. Te wstępne analizy pozwalają na sformułowanie założeń dla budowanego inspekcyjnego robota latającego oraz celu pracy i szczegółowego zakresu. Tutaj ujawnia się bardzo dobre rozeznanie Autora w dostępnych rozwiązaniach i umiejętne ich wykorzystywanie oraz wiedza o brakach (technicznych i algorytmicznych) i skupienie się na wypełnieniu tych luk. Pojawia się także zgrubna wizja autonomicznej pracy robota w poszukiwaniu źródeł zanieczyszczeń.

Kolejne pięć rozdziałów poświęconych jest ściśle realizacji nakreślonych zadań badawczych. Modelowaniu pojazdu latającego, doborowi jego struktury i sterowania poświęcono rozdział drugi – bazując na standardowym dla robotyki podejściu energetycznym i korzystając z kilku pozycji literatury Autor wyprowadza równania dynamiki dla drona (w trzech konfiguracjach) oraz implementuje je w środowisku Matlab/Simulink. Stają się one podstawą do analizy zapotrzebowania mocy dla rozważanych konfiguracji i przyjętych założeń udźwigu – wybrana zostaje wersja sześciowirnikowa. Model zostaje użyty również do dobrania parametrów regulatorów w kontrolerze lotu. Ta procedura poprzedzona jest teoretycznym opisem trzech rozważanych regulatorów (PID, LQR i MPC) oraz planu stworzenia własnego regulatora lotu. Ostatecznie zbudowany hexacopter używa komercyjnego kontrolera Pixhawk (bardzo szczegółowo opisanego przez Doktoranta) a w nim regulatorów PID. Systematyczny dobór nastaw regulatorów dotyczy kilku kaskadowych układów regulacji, zaś minimalizowanym kryterium jakości była całka z kwadratu uchybu. Nastawy poddano jeszcze końcowemu ręcznemu strojeniu a wszystkie ich wartości zestawiono w tabelach. Rozdział ten w elegancki sposób pokazuje wstępną część projektu i nawiązuje do wcześniejszych prac Autora.

W rozdziale trzecim analizowany jest układ pomiarowy w kontekście struktury drona i zakłóceń wprowadzanych przez wirniki. Autor sprawnie posługuje się kolejnymi narzędziami inżynierskimi – oprogramowaniem ANSYS Fluent i Catia – budując model śmigła (geometryczny i numeryczny) i jego otoczenia. Wyniki symulacji porównano z danymi z eksperymentu w zakresie momentu i siły ciągu generowanych przez wirnik – dla dwóch badanych śmigieł porównanie to wypadło zadowalająco (błędy poniżej 10% dla mniejszego śmigła i poniżej 14% dla większego), nieco większe rozbieżności pojawiły się przy porównaniu mocy mechanicznej. To pozwoliło na wykonanie dalszych symulacji dotyczących pola ciśnień dynamicznych i prędkości na wlocie i wylocie, oraz rozszerzenie badań na układy dwóch,

czterech i sześciu wirników. Symulacje prowadziły do określenia najlepszej lokalizacji wlotu układu pomiarowego stężenia cząstek stałych, przy czym jako parametry do wyboru właściwej lokalizacji autor zaproponował natężenie turbulencji i prędkość przepływu. Wskazano dwie lokalizacje: jedną w obrysie drona pod centerplate i drugą poza obrysem drona i poniżej wirników. Biorąc pod uwagę, że wartości prędkości przepływu są jeszcze mniejsze w centrum drona, ciekawe dlaczego taka lokalizacja nie została wybrana do dalszej analizy.

Kolejny rozdział przedstawia proces tworzenia algorytmu poszukiwania źródeł zanieczyszczeń. Wymagał on najpierw zamodelowania pola zanieczyszczeń, dla którego, po krótkiej analizie, Autor przyjął model dyfuzji gazu, wg. artykułu [63]. Po przygotowaniu środowiska testowego i planu badań przeprowadzono testy działania kilku algorytmów poszukiwania źródła: z wykorzystaniem regularnej siatki punktów pomiarowych, bazujący na infotaksji (zmodyfikowany dla przypadku nieznanego położenia źródła), generujący okręgi wokół punktów o wykrytym najwyższym stężeniu i kolejny rozszerzający tę metodę o aproksymację rozkładu stężeń za pomocą funkcji przestrzennych drugiego i trzeciego stopnia (i wyznaczający kierunek lotu na podstawie znalezionego maksimum) oraz ostatni poszukujący strugi zanieczyszczeń i podążający za gradientem zmian stężenia w strudze. Badania prowadzono w środowisku Matlab i bardzo szczegółowo porównano wyniki, biorąc pod uwagę: odległość znalezionego położenia źródła do modelowego, całkowitą przebytą drogę, czas lotu i udział czasu pomiarów, czas obliczeń i zmierzone stężenie zanieczyszczeń. Proces badań oraz analiza wyników są prawidłowo zilustrowane, zaś wnioski logicznie wynikają z tej analizy. Dalej algorytm poszukiwania jest rozszerzony dla przypadku z wieloma źródłami zanieczyszczeń i rozsądnie łączy dwa z wcześniej analizowanych podejść o najmniejszym zapotrzebowaniu na moc obliczeniową i czas misji – co jest kluczowe z praktycznego punktu widzenia.

Rozdział piąty to opis części praktycznej projektu – budowy układu pomiarowo-sterującego i jego testów, programów przetwarzających dane pomiarowe, budowy stanowiska hamowni silników oraz prototypu drona. Stanowisko hamowni pozwoliło na zebranie szeregu danych wymaganych we wcześniej opisanych zadaniach badawczych. Prototypowanie drona było iteracyjne – dwuetapowe – z analizą przypadku czterowirnikowca i hexacoptera bazujących na komercyjnej ramie Tarot.

Opracowane prototypy drona i układu pomiarowego oraz algorytmy poszukiwania źródła zanieczyszczeń poddane są rozbudowanym eksperymentom opisanym w rozdziale 6. Kampania testowa została dobrze przygotowana, opisana odpowiednimi schematami postępowania, zaś robot wyposażony w odpowiednią sygnalizację swojego stanu. Robot posiadał czujniki umieszczone w obu wskazanych wcześniej lokalizacjach dla dalszego porównania wyników rzeczywistych. Wstępne eksperymenty pozwoliły na porównanie zmierzonych stężeń dla 4 przypadków opisanych w tabeli 6.1 oraz na określenie właściwego sposobu przetwarzania danych. Kolejne próby terenowe obejmują kilka godzin lotów w różnych warunkach atmosferycznych, ich wyniki zestawiono w tabeli 6.2. Autor dokonuje rozbudowanej analizy statystycznej dla obu lokalizacji czujników i dalej wizualizuje wyniki w postaci glików (z użyciem 8 cech porównywanych). Dla nich dokonuje z kolei analizy PCA i obserwuje wyraźne rozdzielenie wyników eksperymentów ze źródłem zanieczyszczenia od tych bez źródła, przy czym rozróżnienie jest wyraźniejsze dla czujnika umieszczonego bliżej środka drona. W podsumowaniu tego rozdziału pokazano także ilustracje eksperymentów dla

różnych metod poszukiwania źródła na wykresach 2D i 3D, co wraz z właściwym omówieniem pozwala ocenić skuteczność metod, które oszacowano na 90%. Autor wskazuje także na niezbędne korekty algorytmów lub właściwy dobór progów działania, aby poradzić sobie z różnymi zakłóceniami. Wskazuje także interesujące kierunki dalszych badań.

Praca jest zakończona zwięzłym podsumowaniem odnoszącym się do celu rozprawy i każdego rozdziału w kontekście określonych wcześniej zadań badawczych oraz wskazującym dalsze kierunki badań.

Za najważniejsze osiągnięcia Autora rozprawy uważam:

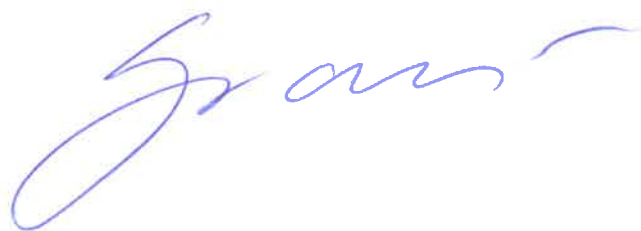
- Stworzenie algorytmu poszukiwania źródeł zanieczyszczeń powietrza cząstkami stałymi, który może być zrealizowany autonomicznie z uwzględnieniem określonego układu pomiarowego i ograniczeń technicznych niedużego pojazdu latającego.
- Adaptację algorytmu infotaksji do potrzeb efektywnego poszukiwania nieznanego źródła zanieczyszczeń.
- Dobór lokalizacji czujników zanieczyszczeń według zaproponowanego kryterium prędkości przepływu i natężenia turbulencji oraz późniejsza weryfikacja eksperymentalna potwierdzająca słuszność założeń oraz pokazująca przewagę tego rozwiązania nad prezentowanymi w literaturze.
- Zaproponowanie metody klasyfikacji czy przelot pomiarowy był w obszarze ze źródłem zanieczyszczeń czy bez bazującej na glyphach i analizie PCA.
- W wymiarze praktycznym niezwykle cennym osiągnięciem jest budowa pojazdu latającego, układu czujnikowego i sterowania zapewniającego autonomiczne poszukiwanie źródeł zanieczyszczeń i eksperymentalne zweryfikowanie jego skuteczności.

### 3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

1. Praca zawiera niestety bardzo dużo (co najmniej kilkadziesiąt) błędów interpunkcyjnych, gramatycznych oraz pisowni łącznej i rozdzielnej różnych słów, jakiegokolwiek wykorzystanie w dalszych publikacjach wymaga staranniejszej edycji.
2. Błąd w opisie dotyczącym lokalizacji czujników stężenia na dronie (str. 113): Innymi słowy prędkość przepływu jest większa od wartości progowej dla promienia mniejszego od  $r_{int}$  i większego od  $r_{ext}$ .
3. Autor szacuje w rozdziale 6 skuteczność zaproponowanych metod poszukiwania na 90%, a jak wygląda sprawa niezawodności systemu?
4. Bardzo często stosowanym obecnie środowiskiem implementacji aplikacji robotycznych jest Robot Operating System, oferujący bardzo wiele gotowych komponentów, zwłaszcza z obszaru nawigacji. Czy stworzone algorytmy mogłyby być zintegrowane z tym środowiskiem?

#### **4. Podsumowanie i wniosek końcowy**

Wymienione uwagi mają głównie charakter dyskusyjny i nie umniejszają podstawowych zalet rozprawy, które wymieniłem w pkt. 2. Z pełnym przekonaniem uważam, że mgr inż. Grzegorz Suchanek wykazał się znakomitymi umiejętnościami prowadzenia pracy naukowej w dyscyplinie automatyka i robotyka a w nowej klasyfikacji automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. W mojej ocenie, zawartość merytoryczna przedstawionej rozprawy spełnia wymagania stawiane przez art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 21.06.2016r, poz. 882). Praca jest bardzo obszerna i po staranniejszym zredagowaniu jej fragmenty mogą posłużyć jako baza do dalszych publikacji, zaś stworzona konstrukcja może być komercjalizowana.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Grasz', is written across the middle of the page.