

Andrzej Grabowski

Materiały informacyjne dotyczące
możliwości wykorzystania dronów
do wspomagania monitorowania narażenia
pracowników i mieszkańców na obszarach
zagrożonych emisją szkodliwych substancji



Materiały informacyjne dotyczące możliwości wykorzystania dronów do wspomagania monitorowania narażenia pracowników i mieszkańców na obszarach zagrożonych emisją szkodliwych substancji

Opracowano na podstawie wyników IV etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, sfinansowanego w latach 2017-2019 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Projekt III.N.05: Wykorzystanie technologii teleinformatycznych, urządzeń przenośnych oraz pojazdów bezzałogowych do wspomagania monitorowania narażenia pracowników i mieszkańców na obszarach zagrożonych emisją szkodliwych substancji

Autor:

dr hab. inż. Andrzej Grabowski, prof. CIOP-PIB, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Techniki Bezpieczeństwa

Zdjęcie na okładce: Andrzej Grabowski

© Copyright by

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Warszawa 2019

CIOP  **PIB**

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa

tel. (48-22) 623 36 98, www.ciop.pl

Wprowadzenie: przegląd aktualnych rozwiązań

Małe, bezzałogowe pojazdy latające (UAV) zmieniają dotychczasowe podejście do badań zanieczyszczenia powietrza i badań atmosferycznych. Istnieją dwa podstawowe sposoby próbkowania – pierwszy polega na pobraniu próbki powietrza (mieszanki gazów, w tym szkodliwych), a następnie na naziemnej analizie materiału badań, zaś drugi, tzw. pomiar on-line wykorzystuje czujniki cząstek stałych i elektrochemiczne czujniki gazów, z których dane są odczytywane i przesyłane do operatora w czasie rzeczywistym. Największy problem stanowi dobór czujników skorelowany z zakresem substancji szkodliwych oraz stabilność układu, na którą składają się: optymalny czas reakcji czujnika, wpływ zakłóceń zewnętrznych (warunki atmosferyczne, zakłócenia elektromagnetyczne) oraz wewnętrzne związane z warunkami lotu drona (przepływ powietrza, utrzymanie stałej pozycji podczas pomiaru). Tommaso F. Villa i zespół [1] w swoich badaniach zwracają uwagę na rozwiązania i ograniczenia, które generują problemy w uzyskaniu reprezentatywnych wyników. Rozważali również wpływ lokalizacji wlotu czujnika powietrza na optymalizowanie procesu pomiaru [2]. Zaproponowali umieszczenie go w centralnej, spodniej części drona. Konsekwencją siły nośnej drona (efektem *downwash* i *upwash*) jest mieszanie się powietrza w obszarze próbkowania. Pobieranie próbek musi uwzględniać udział wirnika w zakłóceniu tego procesu.

Analizując ten problem, ustalono, że pozycja wlotu silnie wpływa na wyniki pomiaru gazu i występuje znaczny udział zakłócający oporu wiatru spowodowany przez drona [3, 4]. Patrick P. Neuman [3] analizował trzy przypadki podawania gazu (CO₂). Optymalizacja lokalizacji montażu czujnika może poprawić sposób odwzorowania zanieczyszczeń emitowanych przez źródło punktowe oraz pomóc w zebraniu reprezentatywnych danych.

System opracowany przez Villa i zespół w ramach powyższych badań składa się z sześcioramiennego drona (S800 EVO wyprodukowany przez DJI, Shenzhen, Chiny) z czterema czujnikami gazów: CO, CO₂, NO i NO₂. Wyposażony jest również w czujniki temperatury i wilgotności, a także interfejs wizualizacji w czasie rzeczywistym. Wszystkie czujniki były zintegrowane z płytą mikrokontrolera Arduino MEGA 2560. Rysunek 1. przedstawia system pomiarowy.



Rys. 1. System pomiarowy wykorzystujący UAV do pomiaru punktowego gazów autorstwa Villa i in.

Czujniki gazów stosowane w małych jednostkach bezzałogowych są klasyfikowane zgodnie z ich zasadami działania. Najbardziej powszechnymi są: termiczne (*thermal*), masowe (*mass*), elektrochemiczne (*electrochemical*), potencjometryczne (*potentiometric*), amperometryczne (*amperometric*), konduktometryczne (*conductometric*) i optyczne (*optical*) [3].

Latające laboratorium prezentowane przez firmę Scentroid [4] imponuje zakresem badanych substancji. Prezentowany system Scentroid DR300 monitoruje ponad 50 substancji chemicznych mogących zanieczyszczać powietrze. Dane z czujników pokładowych przekazywane są do tabletu, w którym są rejestrowane, a operator dysponuje podglądem mierzonych i zapisywanych wartości w czasie rzeczywistym. Dron wyposażony jest w sondę i zestaw czujników oraz 3 zbiorniki do pobierania próbek. Fotografia 1. przedstawia system do detekcji zanieczyszczenia powietrza.



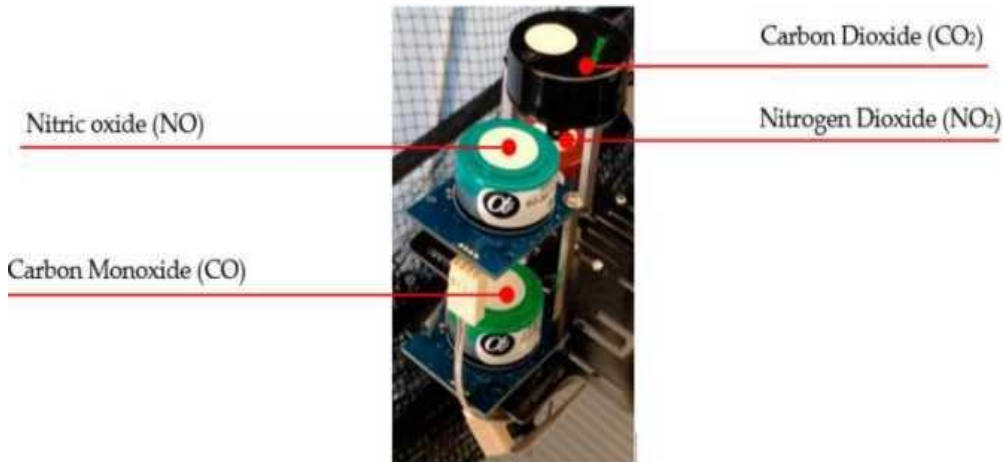
Fot. 1. System Scentroid RD300

Natomiast system pomiarowy Scentroid DR1000 [5] składa się z laboratorium umieszczonego na dronie. Posiada zdolność pomiaru zanieczyszczeń chemicznych, dymów przemysłowych i innych w czasie rzeczywistym. W dronie można zaprogramować domyślne ścieżki pomiaru i poboru próbek lub zdefiniować je zgodnie z zaistniałą potrzebą. Dron wyposażony w odpowiednie urządzenie i zasobnik umożliwia także pobranie próbek badawczych do oceny stopnia zanieczyszczeń pyłowych, pochodzących z indywidualnych systemów grzewczych oraz zanieczyszczeń komunikacyjnych. Dane pochodzące z czujników pokładowych są przesyłane do telefonów komórkowych z systemem Android, w których mogą być wyświetlane on-line. Podczas lotu samolot rejestruje co 2 sekundy pozycję GPS, wysokość, temperaturę, wilgotność oraz wszelkie chemikalia, które są monitorowane. Na fotografii 2. ukazano system Scentroid DR1000.



Fot. 2. System do badania zanieczyszczeń powietrza Scentroid DR 1000

Villa i jego zespół [2] zajmowali się walidacją systemu opartego na UAV zdolnego do pomiaru: CO₂, CO i NO₂. Ładunek gazu obejmował 3 czujniki gazu Alphasense i jeden czujnik SprintIR CO₂. Czujniki Alphasense to ogniwa elektrochemiczne działające w trybie amperometrycznym i generujące prąd, który jest proporcjonalny liniowo do ułamka objętości mierzonego gazu. Służą one do pomiaru CO, NO i NO₂. Czujniki SprintIR CO₂ do pomiarów stężenia CO₂ opierają się na technologii bezdyspersyjnej podczerwieni (NDIR). Na fotografii 3. został przedstawiony ten system czujników.



Fot. 3. System czujników do pomiaru CO₂, CO, NO₂ i NO

Zaprezentowany system czujników zamontowany na UAV (fot. 3) zawierał interfejs kontroli naziemnej do wizualizacji i przechowywania danych wysyłanych przez czujniki pokładowe w czasie rzeczywistym. Testy przeprowadzono w laboratorium (hangar lotniczy). Sprawdzone funkcjonalność pokładowych czujników, oceniono prędkość strumieni powietrza wytwarzanych przez śmigła drona oraz najkorzystniejszą lokalizację miejsca montażu czujników poprzez pomiar gazu i cząstek smugi emitowanej przez olej napędowy. Czujniki zamontowano na wysięgnikach, aby uniknąć skutków turbulencji i efektu mieszania powietrza przez śmigła drona. Wysięgniki mogły zbierać powyżej lub nawet poniżej niego, używając do tych pozycji przegubu. Maksymalną odległość od śmigieł, gdzie czujniki można było zamontować, ograniczono do 1200 mm, aby utrzymać równowagę UAV bez potrzeby montowania przeciwwagi na drugim końcu. Dodatkowo na system składały się 4 znaczniki podczerwieni (*Infrared detection markers*), które zostały umieszczone na UAV, aby zarejestrować jego pozycję. Wstępnie wyznaczono mapę prędkości powietrza generowanego przez dron, a następnie skupiono się na analizie skuteczności systemu detekcji zanieczyszczeń. Obserwowano parametry wpływające na pomiar: pracę śmigła (włączone/wyłączone), różną pozycję czujników oraz odległość od drona. Uzyskane wyniki w postaci mapy prędkości powietrza potwierdziły, że montaż czujników jest najkorzystniejszy w odległości 100-1200 mm.

Kolejne badania Villa i zespół [6] przeprowadzili w warunkach rzeczywistych. Tylko niektóre z publikowanych przez nich prac prezentują wyniki uzyskane z badań w środowisku docelo-

wym pracy drona [7-8], inne skupiają się na testach laboratoryjnych i modelowaniu matematycznym. Praca Villa dotyczyła automatycznego śledzenia źródeł zanieczyszczeń w obszarze docelowym oraz dynamicznego kreślenia mapy zanieczyszczenia otaczającego regionu. Pollution-driven UAV Control (PdUC) następuje w dwóch etapach – wyszukiwania, podczas którego rozpoznaje obszar w celu ustalenia maksymalnej wartości zanieczyszczenia, oraz eksploracji, polegającej na tym, że UAV bada obszar otoczenia poprzez wykonywanie spiralnych ruchów. Metoda ta jest czasochłonna, a zbyt długie śledzenie zmian może być spowodowane błędami czujnika. Do eliminacji zbędnych pomiarów proponuje się stosowanie algorytmów optymalizacyjnych PdUC [9] i skuteczniejszego PdUC-D (tzw. dyskretyzowana kontrola zanieczyszczeń).

Qijun Gu i in. prowadzili badania za pomocą systemu systemu wyposażonego w dwa czujniki – cząstek stałych (OPC-N2, Alphasense Inc., Essex, UK) oraz gazu NO₂ (NO₂-B43F, Alphasense Inc., Essex, UK). Sensory – tak jak w większości przypadków – zostały zamontowane w centralnej części drona. Analizie poddano określone rejony: autostradę, skrzyżowanie na autostradzie, postój ciężarówek i przestrzeń nad kominem. Testy prowadzono w deszczowe dni, gdy prędkość wiatru wynosiła poniżej 5 m/s. System do monitorowania zanieczyszczeń z życiem drona przedstawia fotografia 4.



Fot. 4. Dron wyposażony w czujniki cząstek stałych i NO₂

Podobne podejście do integracji sensorów z dronem zaprezentowali Noe M. Yungaicela-Naula i jego zespół [16]. Dron z zamontowanymi czujnikami ilustruje fotografia 5. Badacze odnotowywali, że operacje UAV zakłócały prace czujnika elektrochemicznego podczas lotów. Należy podkreślić, że zastosowanie drona do pomiaru zanieczyszczeń powietrza może być skuteczne tylko wtedy, gdy punkt lokalizacji próbnika powietrza jest zoptymalizowany tak, że pobieranie próbek zanieczyszczeń gazowych i cząstek stałych odbywa się przed wirnikami drona, aby nie dochodziło do mieszania się lub rozpraszania powietrza, które może być odchylane przez działanie wirników [10, 11]. Kolejne prace będą obejmowały badanie sposobu osłony czujników pokładowych przed zakłóceniami elektronicznymi.



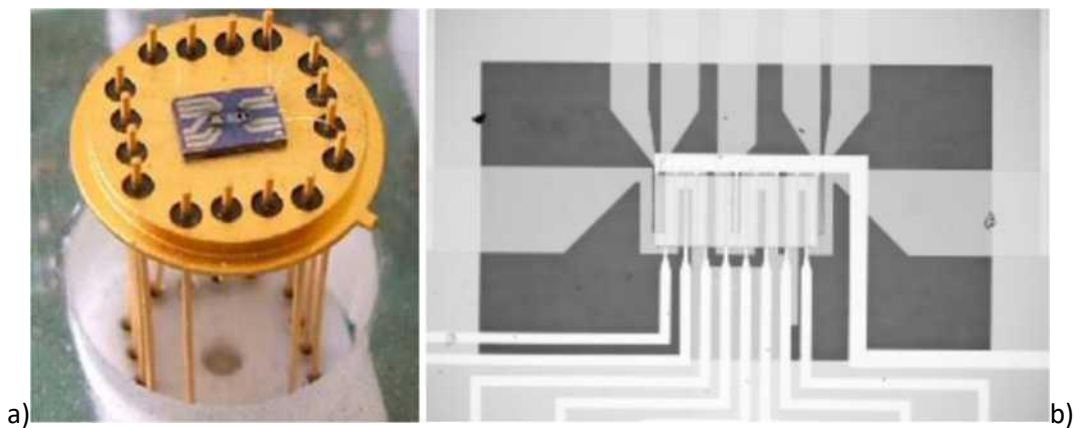
Fot. 5. Dron do pomiaru zanieczyszczeń z zamontowanymi czujnikami autorstwa Noe M. Yungaicela i zespół

Inne podejście prezentują Yuzhe Yang i zespół [16], którzy zamontowali czujniki w perforowanym pudełku na spodniej stronie drona. Konstrukcja drona została przedstawiona na fotografii 6.



Fot. 6. System pomiarowy zanieczyszczeń powietrza z wykorzystaniem drona autorstwa Yuzhe Yang i in.

W reakcji na zakłócenia przepływu powietrza zaczęto poszukiwać (oprócz rozwiązań konstrukcyjnych i optymalnej lokalizacji czujników) takich czujników, dla których wpływ tego czynnika był najmniejszy. Zespoły Maurizio Rossiego [17, 18] oraz Aleksei Shaposhnik [19] analizowali zastosowanie wieloparametrycznych czujników półprzewodnikowych MOX (*Metal Oxide*) do detekcji gazów zamontowanych na pokładzie UAV. Z przeprowadzonych badań wynika, że system jest stabilny i nie osłabia go wpływ ruchu powietrza podczas lotu drona. Czujnik przedstawia fotografia 7.



Fot. 7. Wieloparametryczny czujnik gazu – MOX; matryca czujnika pozwalająca na analizę 8 komponentów jednocześnie

W pracy [19] potwierdzono skuteczność czujnika, którego wykrywalność gazów była na wysokim poziomie, wyższym od innych. Stabilność czujników MOX podważyli Javier Burgues i Santiago Marco [20], twierdząc, że wszelkie turbulencje wywołane przez śruby napędowe lub niewielkie zmiany temperatury otoczenia lub wilgotności mogą zakłócać pomiar (utrudniają odróżnienie reakcji na gaz od hałasu). Wpływem temperatury na czujniki MOX zajmował się Shaposhnik [19]. Specyfika działania oparta na zmianach oporu elektrycznego uzasadnia zmiany odczytu, ponieważ opór materiału półprzewodnikowego – jak również chemisorpcja tlenu i innych składników analizowanego powietrza – są zależne od temperatury.

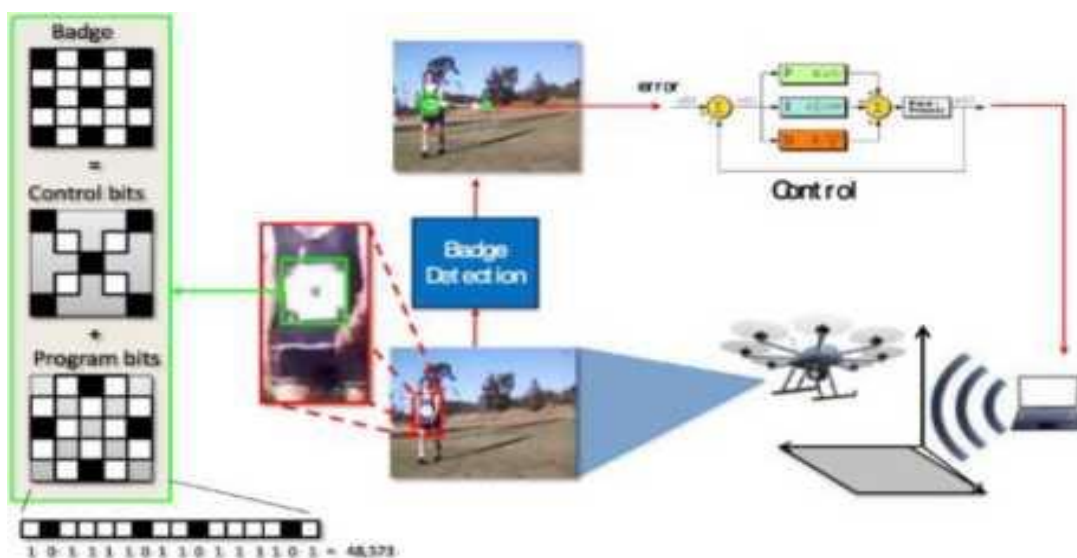
Wcześniej przypuszczano, że pomiar wielu substancji chemicznych można realizować przez budowanie multisensorów (zestawy czujników, z których każdy reaguje na dany czynnik). Jednak błąd jednego czujnika wpływał na pracę innych. Obecnie skupiono się na możliwości przeprowadzenia selektywnej analizy gazu przy użyciu tylko jednego lub dwóch czujników [19]. Ponadto wywnioskowano, że idealna detekcja gazów w warunkach rzeczywistych z użyciem czujników powinna charakteryzować się odpowiednią czułością, krótkim czasem reakcji i selektywnością oraz stabilnością wobec czynników zewnętrznych.

Tendencje rozwojowe dronów wiążą się z miniaturyzacją. Nano-drony mają potencjał do wykonywania zadań polegających na wykrywaniu gazu w złożonych środowiskach. Najnowsze doniesienia [21] wskazują na korzyści z ich miniaturyzacji m.in. z uwagi na bezpieczeństwo lotów w obszarach miejskich oraz możliwość lotów w trudno dostępnych obszarach. Konstrukcja takiego drona może ważyć nawet 27g. Z uwagi na mały współczynnik kształtu może on być wyposażony w czujniki półprzewodnikowe MOX.

W swojej monografii Bart Custers [22] w rozdziale *Future Developments* wśród kierunków rozwoju wymienia, oprócz miniaturyzacji, wzrost autonomii dronów. Drony są często postrzegane jako samoloty zdalnego sterowania, ale istnieją technologie umożliwiające autonomiczne operacje, w których zdalne sterowanie przez człowieka jest częściowo lub całkowicie wyeliminowane. Takie oczekiwania sprowadzają się do wykonywania przez drony manewrów omijających, dostosowanych do zmieniających się warunków topograficznych [23], pogodowych czy idąc dalej mogą być wykorzystywane do śledzenia osób [24].

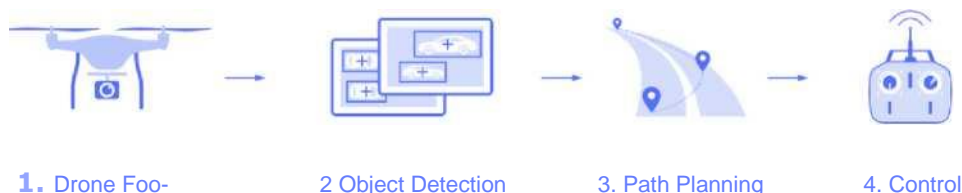
Zaprezentowana metodyka zwana *vision-based UAV control architecture* opiera się na rozpoznaniu znaku zakodowanego. Jego lokalizacja jest wykorzystywana przez algorytm sterowania do regulacji parametrów lotu UAV, tak aby utrzymać użytkownika w środku pola widzenia. Wykryta plakietka jest dalej analizowana w celu wyodrębnienia kodu wizualnego, który steruje zachowaniem UAV, kontroluje wysokość i odległość UAV względem użytkownika.

W ostatnich latach wkłada się wiele wysiłku w stworzenie autonomicznego drona. Autonomiczny dron może latać samodzielnie w inteligentny sposób, np. podąża za osobą lub obiektem zainteresowania, unikając przeszkód [26]. Teoria autonomicznego sterowania według Normana Di Paulo to proces składający się z etapów, które ilustrują rysunki 2 i 3.



Rys. 2. Przykład projektowania algorytmów sterowania dla bezzałogowych statków powietrznych (UAV) do śledzenia celu [25]

Self-flying Drone :The basic steps to reach autonomy



Rys. 3. Schemat realizacji autonomicznego sterowania dronem według Norman Di Palo

W pracy Francisca Vasconcelos i in. [25] zaproponowano realizację etapu wykrywania obiektów przy wykorzystaniu najnowszych metod głębokiego uczenia się (*deep learning*). Opisano implementację prostej wersji wykrywania osób i ich śledzenia za pomocą modelu wykrywania obiektów w TensorFlow i Nanonets Machine Learning API.

Innym trendem rozwoju, powiązaniem z wyżej wymienionym samosterowaniem (*self control, self-steering, self flying*) jest komunikowanie się i współpraca dronów wykonujących zadanie w grupie (w roju; ang. *swarm*).

W odpowiedzi na opisane trendy i tendencje rozwojowe technologii dronów powstała idea samonaprowadzającego lotu drona w kierunku celu. W tym przypadku celem jest najwyższe stężenie szkodliwego gazu.

1. System opracowany w CIOP-PIB

Celem projektu jest określenie potencjalnego zakresu wykorzystania technologii teleinformatycznych, mobilnych czujników oraz bezzałogowych pojazdów do wspomagania monitorowania bezpieczeństwa i ochrony pracy na obszarach, gdzie mogą pojawić się szkodliwe substancje, ze szczególnym uwzględnieniem bezpieczeństwa pracowników i innych osób narażonych na oddziaływanie szkodliwych substancji lotnych uwalnianych w sposób niekontrolowany. W szczególności dotyczy to składowania i transportu paliw płynnych oraz lotnych.

W pierwszym etapie projektu określono – w powiązaniu z krajowymi przepisami dotyczącymi użytkowania dronów – zakres niezbędnej funkcjonalności systemu wspomagania monitorowania zagrożeń mogących pojawić się na skutek niekontrolowanego uwolnienia szkodliwych substancji niebezpiecznych. Opracowano wstępny projekt systemu oraz metody jego badania. Przeprowadzono analizę statystyczną interwencji Państwowej Straży Pożarnej (PSP) w zakresie działań z substancjami niebezpiecznymi. Analiza danych statystycznych obejmowała zakres zdarzeń ratownictwa chemicznego i ekologicznego oraz uwzględniała podział na rodzaj zdarzenia, charakter, miejsce i wielkość zdarzenia oraz zarejestrowane niebezpieczne substancje.

W drugim etapie projektu wybrano komponenty części sprzętowej systemu pomiarowego oraz zbudowano bezzałogowy statek latający UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) typu hexacopter, który jest nośnikiem zestawu sensorów wybranych substancji chemicznych (rys. 1). Na

każdym z sześciu ramion UAV znajduje się głowica z trzema sensorami różnych węglowodorów, gdyż – jak wynika z przeprowadzonej analizy danych statystycznych – tego typu substancje występują najczęściej w czasie działań ratowniczych prowadzonych przez PSP. Dlatego też tego typu substancje chemiczne zostały wybrane dla demonstratora opracowywanego systemu, choć jego funkcjonowanie można łatwo dostosować do innych potrzeb poprzez wymianę głowic pomiarowych. Sensory zamocowane są na teleskopowych rurkach, możliwie jak najdalej odsunięte od zaśmigłowego strumienia powietrza. Ponadto ze względu na stosunkowo długi czas reakcji sensorów zaproponowane rozwiązanie sprzętowe umożliwia lot UAV w kierunku najwyższego stężenia wybranej substancji chemicznej – w kierunku źródła wycieku. Kierunek wybierany jest na podstawie porównania pomiarów pobranych z sensorów zamocowanych na różnych ramionach. Do osiągnięcia celów projektu niezbędne było również zaprojektowanie i oprogramowanie dedykowanych układów elektronicznych, które umożliwiają przesłanie w czasie rzeczywistym danych pomiarowych drogą bezprzewodową w celu ich interpretacji i archiwizacji do ewentualnej dalszej analizy i oceny.

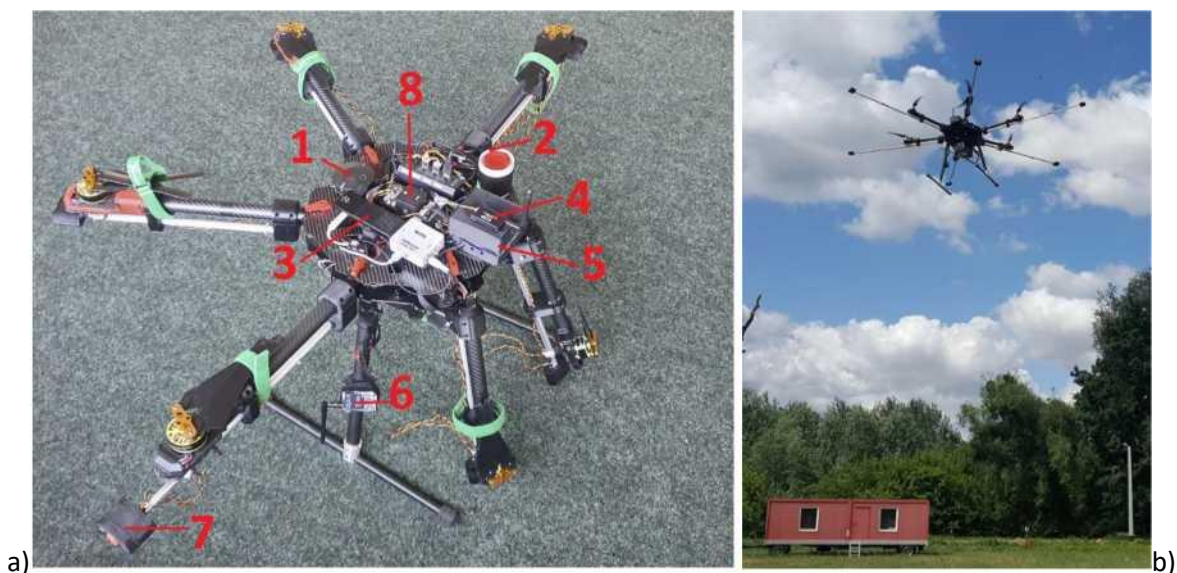
Dane pomiarowe wraz z informacjami o locie i wysokości UAV przesyłane są za pośrednictwem odpowiedniego interfejsu programowania aplikacji (API) do teleinformatycznego narzędzia wspomagającego archiwizację i zarządzanie posiadanymi zasobami. Użytkownicy mogą łączyć się z tym narzędziem za pomocą przeglądarki internetowej, a także poprzez urządzenia przenośne (np. smartfony). W aktualnej wersji oprogramowanie w formie serwisu WWW posiada następujące komponenty:

1. Moduł logowania
2. Moduł zarządzania użytkownikami
3. Moduł zarządzania sprzętem (wyróżniono 3 typy urządzeń: UGV, UAV, Mobilne Centrum Dowodzenia)
4. Moduł zarządzania ratownikami
5. Moduł zarządzania prowadzonymi działaniami ratowniczymi
6. Moduł mapy
7. Moduł zarządzania mapami.

Przeprowadzono również badania wybranych czujników substancji chemicznych oraz próby terenowe lotu UAV na poligonie we współpracy ze Szkołą Główną Służby Pożarniczej (SGSP). Na podstawie analizy wyników testów wprowadzono zmiany w konstrukcji UAV, np.

dodano ultradźwiękowy czujnik wysokości oraz rozpoczęto prace nad zmianą systemu transmisji danych zarówno w części sprzętowej, jak i programowej. Najważniejsza modyfikacja związana jest z koniecznością usunięcia modułu separującego dane z autopilota od danych pomiarowych, gdyż wprowadzał on zbyt duże opóźnienia, co negatywnie wpływało na sterowanie trajektorią lotu UAV.

W trzecim etapie prowadzono intensywne testy opracowanego sprzętu i oprogramowania w warunkach laboratoryjnych i poligonowych, w szczególności na poligonie SGSP (fot. 8). Efekty testów i badań wykorzystywano do modyfikacji i usprawniania pracy UAV i transmisji danych pomiarowych. Przygotowano i przetestowano kilka iteracji różnych rozwiązań sprzętowych, aż osiągnięto zakładany efekt działania UAV. Wersję ostateczną z wyróżnionymi głównymi modułami przedstawia fotografia 8a, a fotografia 8b testy przeprowadzone na poligonie SGSP.



Fot. 8. Bezzałogowy statek latający (UAV) ze złożonymi i rozłożonymi ramionami. 1 – moduł GPS, 2 – czujnik odległości, 3 – komputer pokładowy podłączony do przetwornika zamieniającego sygnał cyfrowy ze złącza HDMI na sygnał analogowy, 4 – moduł telemetry do transmisji danych pomiarowych, 5 – układy elektroniczne agregujące i przetwarzające dane pomiarowe, 6 – moduł transmisji obrazu z kamery IR lub obrazu z wyjścia komputera pokładowego, 7 – moduł z trzema czujnikami gazów, 8 – autopilot sterujący lotem UAV

1.1. Opis działania systemu i jego weryfikacja w warunkach poligonowych

Statek latający typu UAV dedykowany do detekcji zagrożeń (pomiaru stężeń chemicznych wybranych substancji) powstał na bazie ramy Tarot X6. Zdecydowano się na ten rodzaj ramy

w układzie 6 silników (hexacoptera) ze względu na duży udźwig przy stosunkowo małych wymiarach oraz zastosowanie śmigieł o mniejszej średnicy, które powodują mniejsze oddziaływanie strumienia zaśmigłowego na czujniki gazów. Zastosowano śmigła o stosunkowo niewielkiej średnicy – 356 mm. Wybór autopilota Pixhawk 2 został podyktowany dostępnością wielu komponentów kompatybilnych z tym autopilotem oraz dużą liczbą różnych interfejsów, w jakie on został wyposażony (Serial, SPI, CAN, I2C, ADC, USB). Umożliwia to dołączenie do toru transmisji danych autopilota danych pomiarowych z 18 czujników zainstalowanych na UAV (dzięki czemu nie jest konieczne dodawanie do systemu dodatkowego nadajnika i odbiornika do bezprzewodowej transmisji danych).

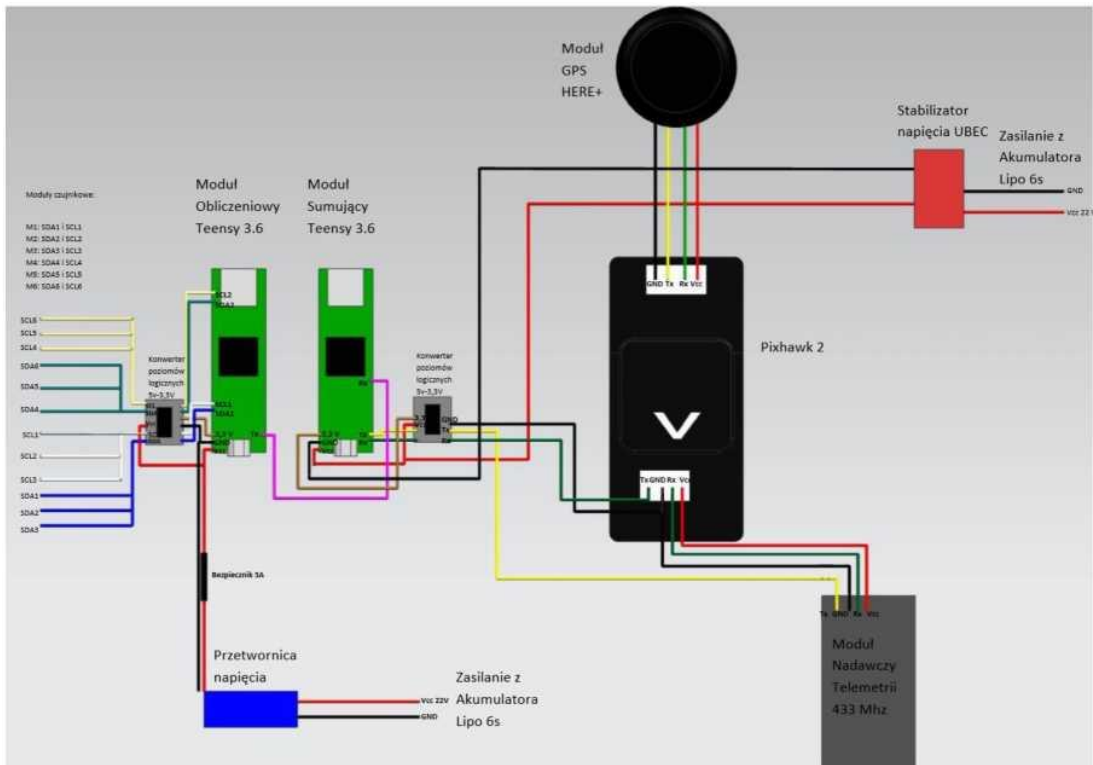
Wykorzystanie wspólnego toru transmisji danych wymagało zaprojektowania, wykonania i oprogramowania dwóch urządzeń. Pierwsze z nich zainstalowane na dronie integruje dane z sensorów i dołącza je do pakietu danych przesyłanych przez wbudowane oprogramowanie autopilota Pixhawk 2. Drugie urządzenie jest podłączone do odbiornika danych i komputera klasy PC. Jego zadaniem jest odseparowanie pakietu danych pomiarowych od danych przesyłanych do oprogramowania sterującego pracą UAV (Mission Planner). Dane pomiarowe są kierowane na port COM, gdzie dalej są odczytywane przez program przesyłający je do bazy danych.

Na każdym ramieniu na wysuwanym wysięgniku zainstalowane są obok siebie trzy różne sensory firmy Figaro (TGS 822, TGS 2602, TGS 2610), dzięki czemu są odsunięte od strumienia zaśmigłowego (fot. 9).



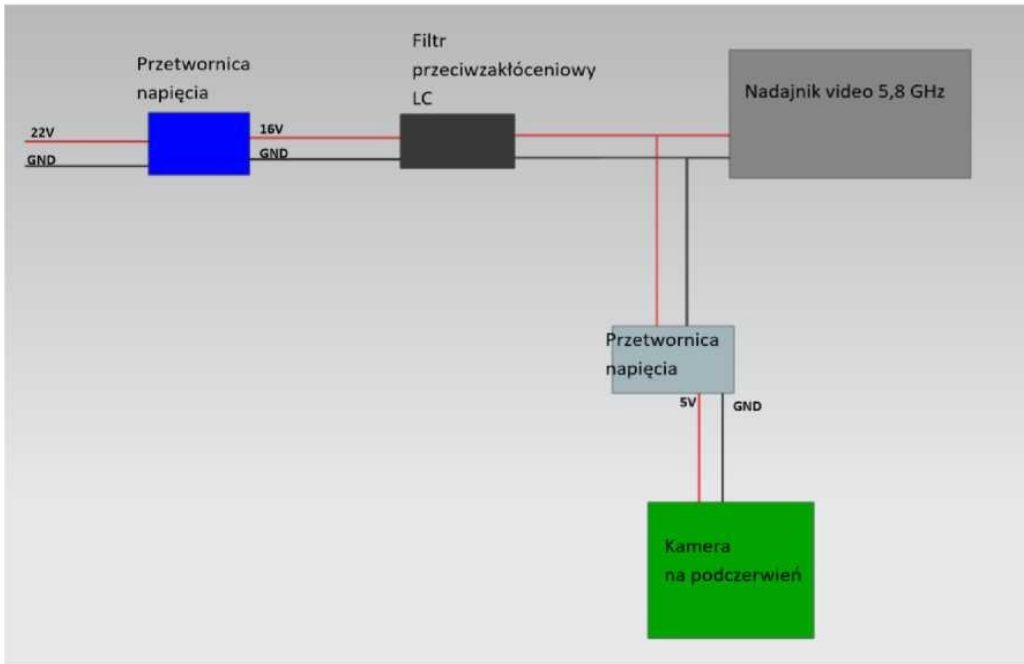
Fot. 9. Bezzałogowy statek latający (UAV) z wysuniętymi ramionami zawierającymi moduły pomiarowe – w trakcie lotu nad poligonem SGSP

Zastosowanie sześciu zestawów sensorów rozwiązuje problem długiego czasu „odtruwania” czujnika, czyli powrotu do stanu, w którym możliwy jest wiarygodny pomiar niższych wartości stężenia wybranych substancji chemicznych. Ponieważ czas reakcji na wyższe stężenia jest stosunkowo krótki, możliwe jest wykonanie trajektorii lotu przeciwnego do gradientu stężenia wybranej substancji chemicznej, czyli w kierunku wykrycia źródła tej substancji. Schemat połączeń uwzględniający numer złączy przedstawia rysunek 4.



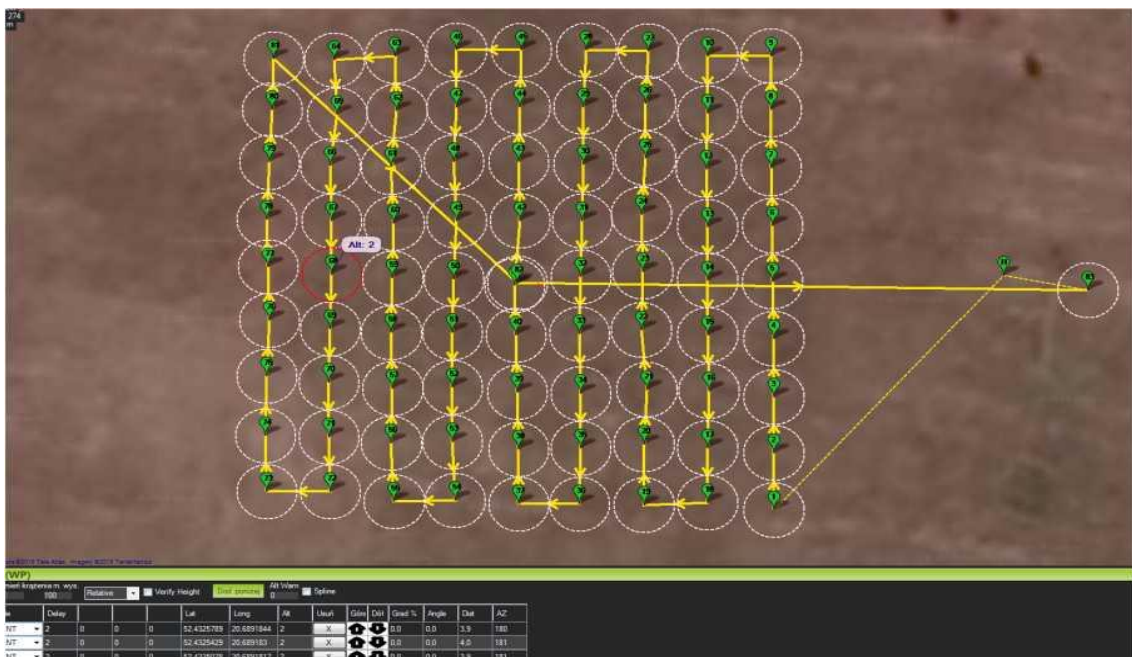
Rys. 4. Schemat połączeń komponentów UAV związanych z rejestracją i przetwarzaniem danych

Umożliwia on odtworzenie zaprojektowanego urządzenia. Dodatkowo UAV wyposażony jest w kamerę termowizyjną. Schemat połączeń związanych z rejestracją obrazu podczerwonego zawiera rys. 5.



Rys. 5. Schemat połączeń komponentów UAV związanych z rejestracją obrazu wideo

Powyżej opisana konfiguracja UAV została przebadana w czasie lotów nad poligonem SGSP (zaplanowaną trajektorię lotu przedstawia rys. 6). W przeciwieństwie do badań laboratoryjnych badania poligonowe umożliwiły wykonanie testów całości systemu, gdyż zaprogramowany lot odbywał się nad poligonem, na którego terenie umieszczone było źródło węglowodorów (etylina w otwartym zbiorniku).



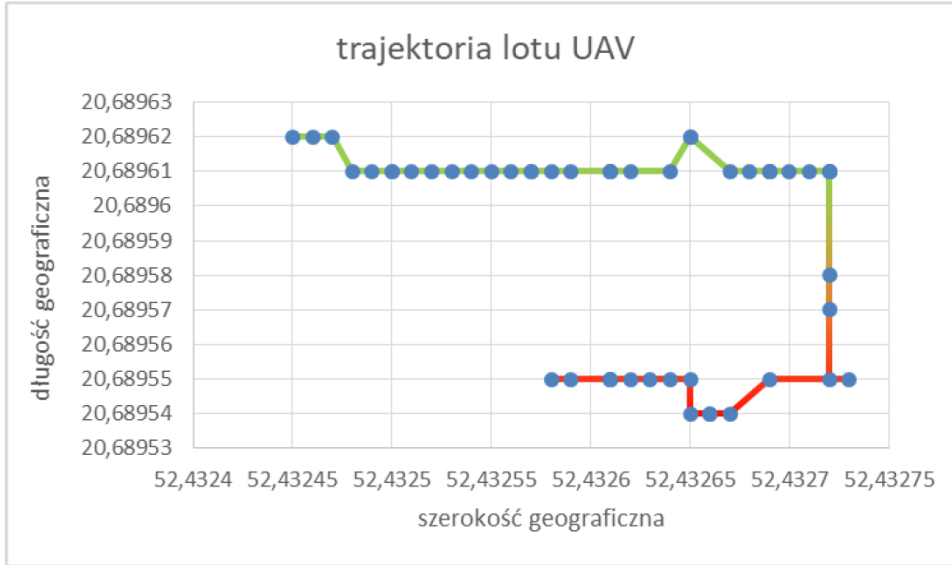
Rys. 6. Trajektoria lotu UAV zaplanowana do testów

Korzystając z wyników testów przeprowadzonych na poligonie w kwietniu 2019 roku, wykorzystano w badaniach zmodyfikowaną wersję oprogramowania Mission Planner (fot. 10). Zmiany dotyczyły m.in. wyświetlania danych pomiarowych w czasie rzeczywistym oraz przesyłania własnych komunikatów, w tym poleceń o zmianie trasy lotu, co ewentualnie mogłoby umożliwić pracę UAV w trybie autonomicznym, czyli automatyczne reagowanie zmianą trajektorii lotu w zależności od aktualnych pomiarów stężeń wybranych substancji chemicznych.

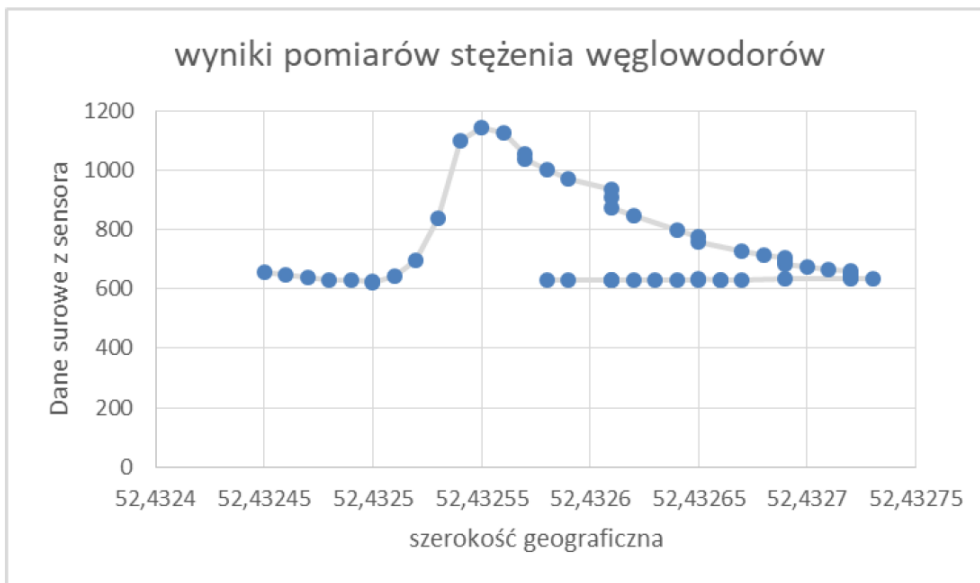


Fot. 10. Okno programu Mission Planer w trakcie lotu nad poligonem SGSP; najwyższe stężenia są rejestrowane na ramieniu UAV z lewej strony

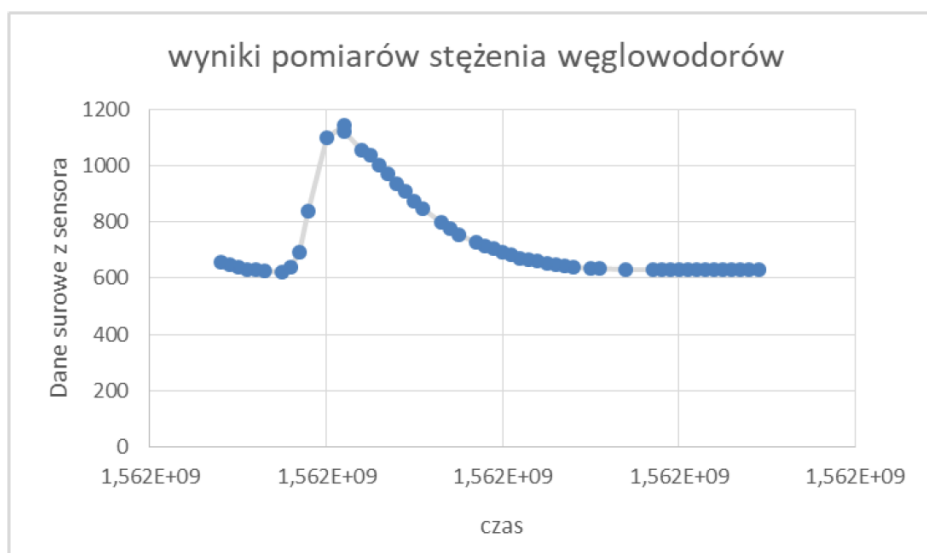
Lot UAV odbywał się nad poligonem wzdłuż wybranych wartości długości geograficznej. Po dotarciu do krańca wyznaczonej do testów przestrzeni na poligonie, UAV przesuwał się na kolejną długość geograficzną i wracał, co ilustruje rysunek 7. W czasie takiego lotu zmieniała się przede wszystkim szerokość geograficzna, dlatego dane można przedstawić najlepiej w funkcji szerokości geograficznej (rys. 8) lub funkcji czasu (rys. 9).



Rys. 7. Współrzędne geograficzne lotu (długość w funkcji szerokości geograficznej); wykres przedstawia wyniki dla lotu wzdłuż wybranej, a następnie powrót na innej długości geograficznej; na wykresie widoczne są niedokładne wartości pomiarów bazujących na sygnale GPS, zaś kolor zielony oznacza początek, a czerwony koniec lotu



Rys. 8. Fragment wyników pomiarów zrealizowanych w trakcie lotu nad poligonem SGSP: dane surowe z sensora (zależne od stężenia węglowodorów w powietrzu) w funkcji szerokości geograficznej; wykres przedstawia wyniki dla lotu wzdłuż wybranej wartości długości geograficznej, a następnie powrót na innej długości geograficznej



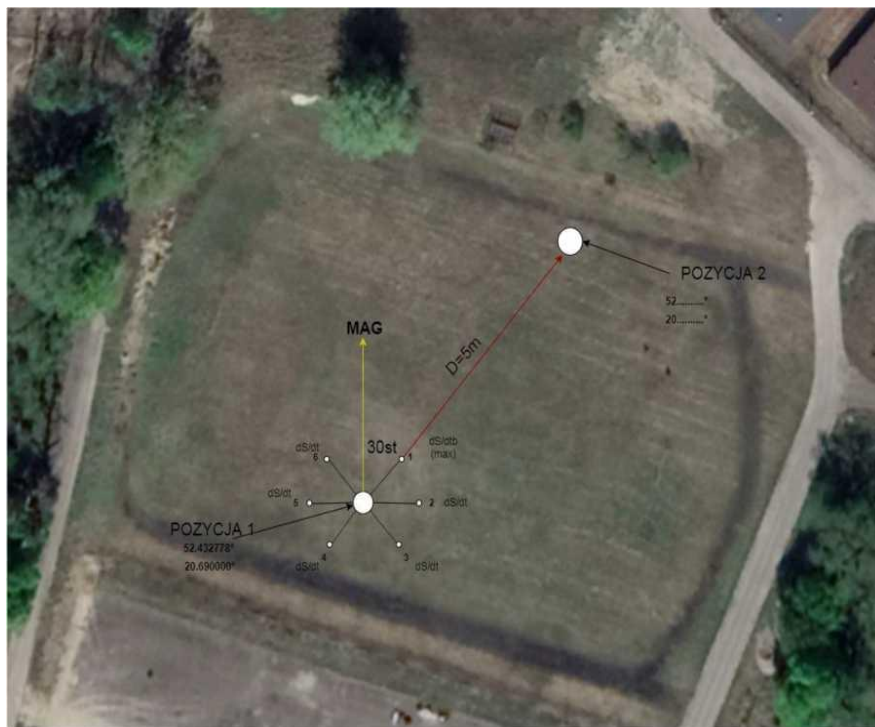
Rys. 9. Fragment wyników pomiarów zrealizowanych w trakcie lotu nad poligonem SGSP: dane surowe z sensora (zależne od stężenia węglowodorów w powietrzu) w funkcji sygnatury czasowej pakietu danych; wykres przedstawia wyniki dla lotu wzdłuż wybranej, a następnie powrót na innej długości geograficznej

Powyższe wykresy zawierają wyniki z wyłączeniem błędnie przesłanych pakietów danych (np. z wartością ujemną, zerową lub poza skalą). Wyniki badań na poligonie pokazały, że w warunkach rzeczywistych występują duże trudności w uzyskaniu satysfakcjonującej niezawodności systemu. Najwięcej problemów było związanych z transmisją danych pomiarowych drogą bezprzewodową do komputera klasy PC. Znaczna część pakietów nie docierała w ogóle lub w nieodpowiednim momencie. Wystąpiły też problemy z synchronizacją danych pochodzących z różnych źródeł, zwłaszcza danych o lokalizacji UAV z danymi z sensorów stężeń wybranych substancji chemicznych. Okazało się również, że dodatkowe układy elektroniczne wprowadzają opóźnienia, z którymi nie radzi sobie oprogramowanie autopilota. Często pojawiały się problemy z przesłaniem danych o nowej trasie lotu, nawet w sytuacji, gdy dron nie był w trakcie lotu. Problemy te starano się rozwiązać poprzez zmianę konfiguracji sprzętowej UAV oraz wprowadzenie znaczących zmian do oprogramowania.

Pomimo występujących trudności zebrane dane – po usunięciu artefaktów i szumów – wykazują działanie sensorów zgodne z tym zaobserwowanym w laboratorium. Początkowo niskie wskazania sensorów gwałtownie rosną, gdy UAV wlatuje nad obszar, gdzie znajduje się źródło węglowodorów. Następnie wartości pomiarowe powoli spadają po tym, jak UAV opuszcza strefę, gdzie stężenie węglowodorów jest wysokie. Gdy UAV dociera do krańca poligonu, uzyskiwane wartości wracają do poziomu podstawowego. Zawraca on w momencie, gdy zainstalowane na nim sensory są całkowicie „odtrute” i gotowe do wykonania kolejnej serii pomiarów.

1.2. Automatyczna kontrola lotu na podstawie gradientu stężeń substancji chemicznych

Aplikacja Mission Planner została zainstalowana na komputerze Intel Compute Stick, który jest połączony bezpośrednio z autopilotem Pixhawk za pośrednictwem złącza serial1. Z modułów Teensy pozostał moduł obliczający, który wysyła dane z czujników do komputera oraz odbiera dane z autopilota m.in. o jego wysokości, pozycji i prędkości. Dane z czujników są przeliczone według odpowiednich wzorów (wyznaczonych na podstawie dokumentacji sensorów oraz własnych testów przeprowadzonych w poprzednim etapie). Z powodu tylko jednego dostępnego wyjścia USB komputera został użyty rozdzielacz USB-HUB pozwalający na podłączenie do 4 urządzeń USB. Program komputerowy automatycznie wybiera to ramię UAV, dla którego rejestrowana jest najwyższa wartość pochodnej po czasie (dS/dt). Zostaje wybrany numer ramienia i na podstawie jego oraz kursu kompasu zostaje wyznaczony kurs do nowego punktu (fot. 11).



Fot. 11. Schemat działania algorytmu wyznaczającego kolejny punkt trajektorii lotu UAV
 $KURS = [30 \text{ st} + (n - 1) * 60 \text{ st}] + MAG$

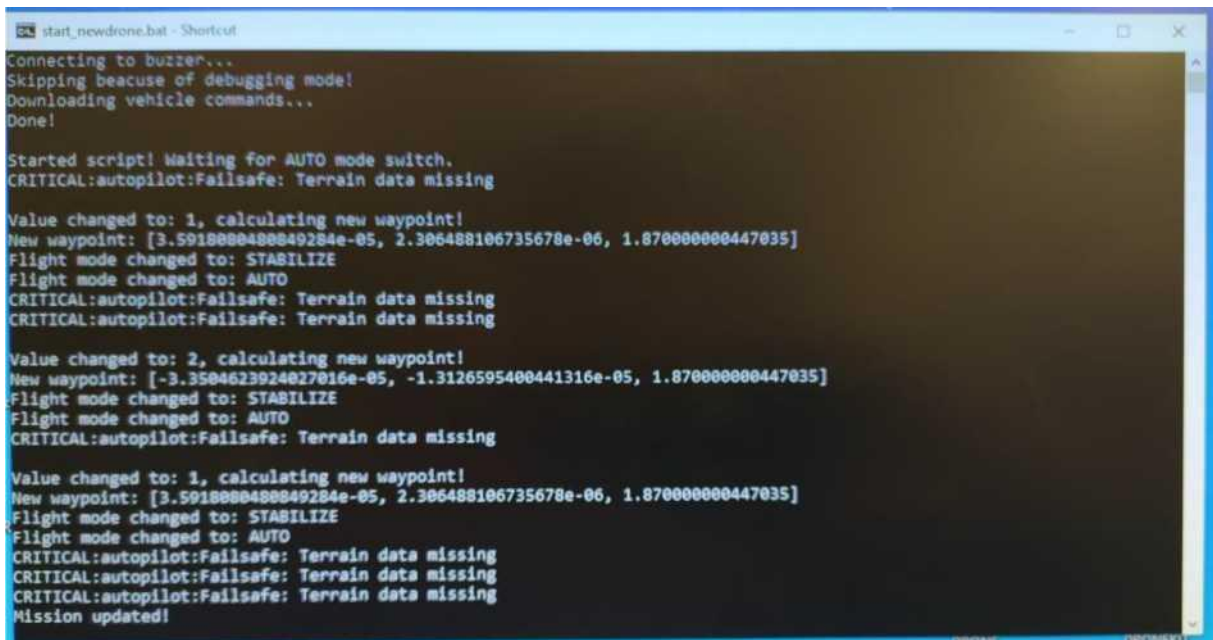
MAG – kurs kompasu wskazywany na dronie

N – numer ramienia UAV

Na podstawie kursu punktu od UAV i założonej odległości od punktu D zostają wyznaczone współrzędne geograficzne nowego punktu.

$$\begin{aligned} szer(2) &= \frac{[\cos(KURS) * D]}{40008548} * 360 \text{ st} + szer(1) \\ dl(2) &= \frac{[\sin(KURS) * D]}{40075704} * 360 \text{ st} + dl(1) \end{aligned}$$

Współrzędne zostają przesłane bezpośrednio z komputera Intel Compute Stick (fot. 12) do autopilota Pixhawk przez port USB UART. Następuje automatyczne włączenie funkcji „USTAW WP”, a wtedy UAV zaczyna lot do wskazanego punktu.



```
start_newdrone.bat - Shortcut
Connecting to buzzer...
Skipping because of debugging mode!
Downloading vehicle commands...
Done!

Started script! Waiting for AUTO mode switch.
CRITICAL:autopilot:FailSAFE: Terrain data missing

Value changed to: 1, calculating new waypoint!
New waypoint: [3.5918880488849284e-05, 2.386488106735678e-06, 1.870000000447035]
Flight mode changed to: STABILIZE
Flight mode changed to: AUTO
CRITICAL:autopilot:FailSAFE: Terrain data missing
CRITICAL:autopilot:FailSAFE: Terrain data missing

Value changed to: 2, calculating new waypoint!
New waypoint: [-3.3504623924027016e-05, -1.3126595400441316e-05, 1.870000000447035]
Flight mode changed to: STABILIZE
Flight mode changed to: AUTO
CRITICAL:autopilot:FailSAFE: Terrain data missing

Value changed to: 1, calculating new waypoint!
New waypoint: [3.5918880488849284e-05, 2.386488106735678e-06, 1.870000000447035]
Flight mode changed to: STABILIZE
Flight mode changed to: AUTO
CRITICAL:autopilot:FailSAFE: Terrain data missing
CRITICAL:autopilot:FailSAFE: Terrain data missing
CRITICAL:autopilot:FailSAFE: Terrain data missing
Mission updated!
```

Fot. 12. Okno programu uruchomionego na komputerze zainstalowanym na UAV; program służy do sterowania aplikacją Mission Planner

Przeprowadzone testy wykazały prawidłowe funkcjonowanie zaproponowanego rozwiązania. Do testów automatycznego podążania za źródłem gazu wykorzystano benzynę. Została ona umieszczona w słoiku o pojemności ok. 400 ml na tyczce. UAV podążył za źródłem benzyny z prędkością ok. 3 km/h (fot. 13).



Fot. 13. Automatyczne podążanie UAV za źródłem węglowodorów

Bibliografia

- [1] Villa, T.F. et al. An Overview of Small Unmanned Aerial Vehicles for Air Quality Measurements: Present Applications and Future Prospectives; Sensors 2016, No. 16(7). [doi: org/10.3390/s16071072](https://doi.org/10.3390/s16071072).
- [2] Villa, T.F. et al. Development and Validation of a UAV Based System for Air Pollution Measurements. Sensors 2016, No. 16(2). doi.org/10.3390/s16122202.
- [3] Neumann, P.P. Gas Source Localization and Gas Distribution Mapping with a Micro-Drone. Freie Universität Berlin, Fachbereich Mathematik und Informatik: Berlin, 2013. [doi: org/10.17169/refubium-11738](https://doi.org/10.17169/refubium-11738).
- [4] Juan, R. et al. Mini-UAV based sensory system for measuring environmental variables in greenhouses. Sensors 2015, No. 15, pp. 3334-3350.
- [5] Xiao, L. et al. A survey on gas sensing technology. Sensors 2012, No. 12, pp. 9635-9665.
- [6] DR1000 FLYING LAB. Drone Based Air Quality Analyzer. www.scentroid.com/scentroid-sampling-drone/.
- [7] www.scentroid.com/scentroid-dr1000/.

- [8] Villa, T.F. et al. Characterization of the particle emission from a ship operating at sea using an unmanned aerial vehicle. *Atmospheric Measure Techniques* 2019, No. 12, pp. 691-702. doi: [org/10.5194/amt-12-691-2019](https://doi.org/10.5194/amt-12-691-2019).
- [9] Westerlund, J., Hallquist, M., Hallquist, A.M. Characterization of fleet emissions from ships through multiindividual determination of size-resolved particle emissions in a coastal area. *Atmospheric Environment* 2015, No. 112, pp. 159-166. doi: [org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.018](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.018),
- [10] www.libelium.com/3d-air-quality-modeling-with-sensor-drones-in-greece/. (IWCMC), IEEE, Jun 2017, Valencia, Spain, pp. 2115-2120.
- [11] Pajares, G. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (uavs). *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 2015, No. 81(4), pp. 281-329.
- [12] Qijun Gu, Michanowicz D.R., Chunrong Jia. Developing a Modular Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Platform for Air Pollution Profiling. *Sensors* 2018, No. 18. doi:10.3390/s18124363.
- [13] Alvear, O. et al. A chemotactic pollution-homing UAV guidance system. 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC 2017), IEEE, 2017, Valencia, Spain, pp. 2115-2120. doi: [ff10.1109/IWCMC.2017.7986610](https://doi.org/10.1109/IWCMC.2017.7986610).
- [14] Yungaicela-Naula, N.M. et al. Design and Implementation of an UAV-based Platform for Air Pollution Monitoring and Source Identification. *Congreso Nacional de Control Automático 2017*, Monterrey, Nuevo León, Mexico, 2017.
- [15] Velasco, A. et al. A Mobile and Low-Cost System for Environmental Monitoring. *Sensors* 2016, No. 16, p. 710.
- [16] Yuzhe Yang et al. Realtime Profiling of Fine-Grained Air Quality Index Distribution using UAV Sensing. *IEEE Internet of Things Journal* 2018, No. 5(1), pp. 186-198. doi: [10.1109/JIOT.2017.2777820](https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2777820).
- [17] Rossi, M. et al. Gas-Drone: Portable gas sensing system on UAVs for gas leakage localization. *Sensors* 2014, IEEE. doi: [10.1109/ICSENS.2014.6985282](https://doi.org/10.1109/ICSENS.2014.6985282).
- [18] Rossi, M., Brunelli, D. Autonomous Gas Detection and Mapping With Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 2016, No. 65(4).
- [19] Shaposhnik, A. et al. Selective Gas Detection by a Single MOX-Sensor; *EuroSensors; Proceedings 2017*, No. 1. doi: [10.3390/proceedings1040594](https://doi.org/10.3390/proceedings1040594).
- [20] Burgues, J., Marco, S. Multivariate estimation of the limit of detection by orthogonal partial least squares in temperature-modulated MOX sensors. *Analytica Chimica Acta* 2018, No. 1019, pp. 49-64.
- [21] Burgues J. et al. Smelling Nano Aerial Vehicle for Gas Source Localization and Mapping. *Sensors* 2019, No. 19. doi: [10.3390/s19030478](https://doi.org/10.3390/s19030478).
- [22] Custers B. et al. The Future of Drone Use. Opportunities and Threats from Ethical and legal Perspectives; *Information Technology and Law Series*, No. 27, Springer, 2016. doi: [org/10.1007/978-94-6265-132-6](https://doi.org/10.1007/978-94-6265-132-6).
- [23] www.interdrone.com/uncategorized/self-driving-drones-navigate-city-streets/.
- [24] mwi.usma.edu/era-drone-swarm-coming-need-ready/.
- [25] Vasconcelos, F., Vasconcelos, N. Person-following UAVs. *Proceedings of IEEE Winter Applications of Computer Vision Conference (WACV)*, Lake Placid, USA: New York, 2016. online: www.svcl.ucsd.edu/projects/dronefollow/2016IEEEWACVPersonFollowingUAVs.pdf.
- [26] medium.com/nanonets/how-i-built-a-self-flying-drone-to-track-people-in-under-50-lines-of-code-7485de7f828e.