

Implementacja projektu systemu monitorowania stanu gazociągów przesyłowych i ich otoczenia

Implementation of the design of the system for monitoring the condition of gas transmission pipelines and their surroundings

Anna Timofiejczuk¹, Sebastian Rzydzik¹, Jadwiga Holewa-Rataj², Mateusz Rataj², Mariusz Kastek³, Daniel Pawelski³, Sebastian Brawata⁴, Bartosz Gawęda⁴

¹ Politechnika Śląska

² Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

³ TECHNOVIS Sp. z o.o.

⁴ VORTEX Sp. z o.o.

STRESZCZENIE: Artykuł prezentuje etap implementacji bezinwazyjnego systemu pozwalającego na okresowe monitorowanie szczelności gazociągów i stanu ich otoczenia. System składa się z podsystemu pomiarowego – śmigłowiec załogowy z zamontowanym spektrometrem podczerwieni i kamerą światła widzialnego oraz podsystemu informatycznego – serwer obliczeniowy z zainstalowanym oprogramowaniem do przetwarzania zarejestrowanych danych, w tym danych hiperspektralnych. W zakresie integracji systemu pomiarowego ze śmigłowcem zbudowano specjalne podwieszenie, które umożliwia bezpieczne użytkowanie kamery hiperspektralnej, oraz wykonano przewody pozwalające na niezakłóconą wymianę danych pomiędzy kamerą a systemem kontrolno-pomiarowym zamontowanym w kabinie helikoptera. Podwieszenie zostało przetestowane podczas prób w locie w zakresie drgań przekazywanych z układu napędowego helikoptera na układ pomiarowy spektrometru. Przeprowadzona analiza w dziedzinie częstotliwości oraz czasu sygnałów przyspieszeń, prędkości i przemieszczeń potwierdziła poprawność wykonanego projektu podwieszenia. W kolejnych testach postanowiono zweryfikować gotowość techniczną systemu pomiarowego. W tym celu wytyczono różne trasy przelotu, z uwzględnieniem ograniczeń toru optycznego spektrometru, skonfigurowano oprogramowanie, uwzględniając różne tryby rejestracji danych, a następnie wykonywano loty nad zbudowanym specjalnie dla potrzeb projektu stanowiskiem doświadczalnym, pozwalającym na symulowanie naziemnych i podziemnych wycieków metanu z infrastruktury gazowej. Wielokrotnie wykonane rejestracje danych w zakresach światła podczerwonego i widzialnego pozwoliły zgromadzić materiał badawczy niezbędny do weryfikacji gotowości technicznej systemu pomiarowego, poprawności działania stanowiska doświadczalnego oraz opracowanych algorytmów obliczeniowych. Podsystem informatyczny zbudowany jest ze zintegrowanych modułów obliczeniowych, które pozwalają na przetwarzanie danych hiperspektralnych w zakresie detekcji i kwantyfikacji emisji metanu oraz przetwarzanie obrazów w świetle widzialnym w zakresie klasyfikacji obiektów niedozwolonych, występujących w otoczeniu gazociągów. W kolejnym etapie moduły przeznaczone do przetwarzania zarejestrowanych przez kamerę hiperspektralną danych zostaną poddane testom w warunkach rzeczywistych oraz zostaną zoptymalizowane do postaci funkcjonalnego systemu informatycznego.

Słowa kluczowe: detekcja i kwantyfikacja metanu, rozpoznawanie obrazów, ortofotomapa, symulowanie nieszczelności gazociągu.

ABSTRACT: The paper presents implementation of the design of a non-invasive system that allows periodic monitoring of the tightness of gas pipelines and the condition of their surroundings. The system consists of a measurement subsystem – a manned helicopter with an infrared spectroradiometer and a visible light camera, and an IT subsystem – a computing server with software for processing recorded data, including hyperspectral data. In terms of integrating the measurement system with the helicopter, a special suspension was built to enable safe use of the hyperspectral camera, and cables were made to enable uninterrupted data exchange between the camera and the control and measurement system installed in the helicopter cabin. The suspension was tested during flight tests in terms of vibrations transmitted from the helicopter's propulsion system to the spectroradiometer measurement system. The analysis carried out in the frequency and time domain of acceleration, velocity and displacement signals confirmed the correctness of the suspension design. In further tests, it was decided to verify the technical readiness of the measurement system. For this purpose, various flight routes were marked, taking into account the limitations of the optical path of the spectroradiometer, software was configured taking into account various data recording modes, and then flights were made over an experimental station built especially for the project, allowing the simulation of above-ground and underground methane leaks from the gas infrastructure. Multiple data recordings in the infrared

Autor do korespondencji: S. Rzydzik, e-mail: Sebastian.Rzydzik@polsl.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 24.11.2023 r. Zatwierdzono do druku: 21.05.2024 r.

and visible light ranges allowed collecting research material necessary to verify the technical readiness of the measurement system, the correct operation of the experimental station and the developed computational algorithms. The IT subsystem consisting of integrated calculation modules is currently being developed. It makes it possible to process hyperspectral data in the field of methane detection and quantification, and process visible light images in the field of classification of prohibited objects in the vicinity of gas pipelines. In the next stage, the modules intended to process the data recorded by the hyperspectral camera will be integrated into a functional IT system.

Key words: methane detection and quantification, image recognition, orthophotomaps, simulating a gas pipeline leak.

Wstęp

Artykuł stanowi opis kolejnych etapów realizacji projektu o akronimie iDiaGaSys, którego celem jest budowa systemu do identyfikacji wycieków metanu wzdłuż gazociągów oraz inspekcja gazociągów ukierunkowana na wykrywanie nieprawidłowości na ich terenie. Pierwsze etapy miały na celu opracowanie architektury systemu pomiarowo-obliczeniowego oraz założeń do jego praktycznego zastosowania. Opis tych etapów został przedstawiony w artykule pt. *Koncepcja systemu monitorowania stanu gazociągów przesyłowych i ich otoczenia* (Timofiejczuk et al., 2023).

Budowany system przewidziany jest docelowo jako narzędzie wspierające działania eksploatacyjne prowadzone przez operatora gazociągów przesyłowych związane z monitorowaniem infrastruktury gazowej i powinien umożliwiać:

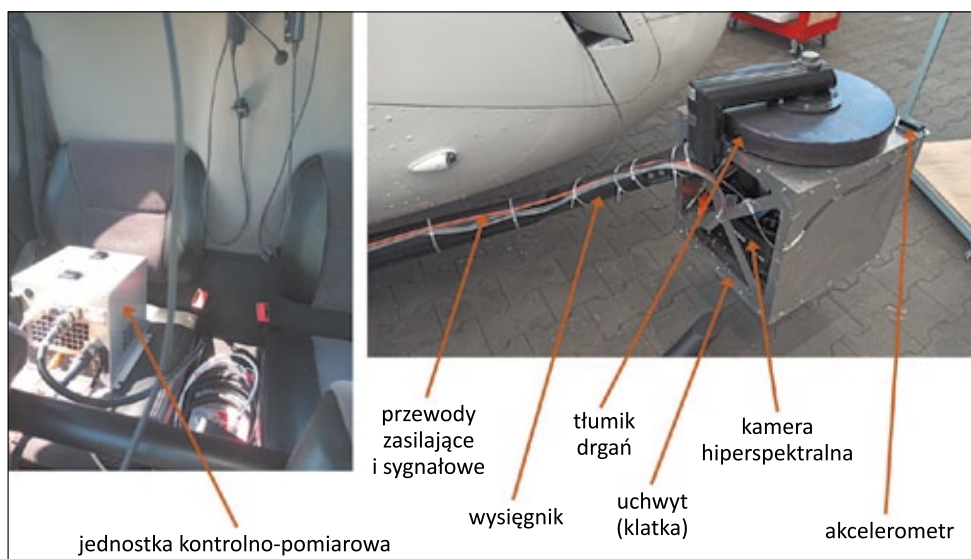
- szybsze i automatyczne wykrywania emisji metanu;
- wykrywanie anomalii w otoczeniu infrastruktury przesyłowej;
- wykrywanie ingerencji osób trzecich.

W artykule skupiono się na integracji systemu pomiarowego ze śmigłowcem oraz na wnioskach i wynikach z pierwszych lotów próbnych z jego użyciem. Opisano także implementację projektu podsystemu informatycznego w zakresie

modułów detekcji i kwantyfikacji emisji metanu oraz klasyfikacji obiektów niedozwolonych występujących w otoczeniu gazociągów.

System pomiarowy

System pomiarowy składa się z dwóch elementów (rysunek 1): jednostki kontrolno-obliczeniowej umieszczonej wewnątrz śmigłowca oraz kamery hiperspektralnej (inaczej urządzenie do obrazowania hiperspektralnego, którego celem jest uzyskanie widma elektromagnetycznego dla każdego piksela na zarejestrowanym obrazie, np. w paśmie podczerwieni) – składającej się z głowicy pomiarowej osadzonej na platformie stabilizacyjnej (Telops: Hyperspectral Cameras) – umieszczonej na zewnątrz śmigłowca w uchwycie (klatce) chroniącym ją przed wpływem czynników zewnętrznych. Uchwyt jest przymocowany do śmigłowca poprzez wysięgnik i opcjonalny tłumik drgań, co pozwala zredukować wpływ drgań układu napędowego śmigłowca na układy optyczne, a tym samym na ostrość zarejestrowanych obrazów w paśmie widzialnym i podczerwieni, co ma bezpośredni wpływ na jakość uzyskiwanych wyników analizy otoczenia gazociągu i emisji metanu. Całość połączona jest przewodami zasilającym i sygnałowym,



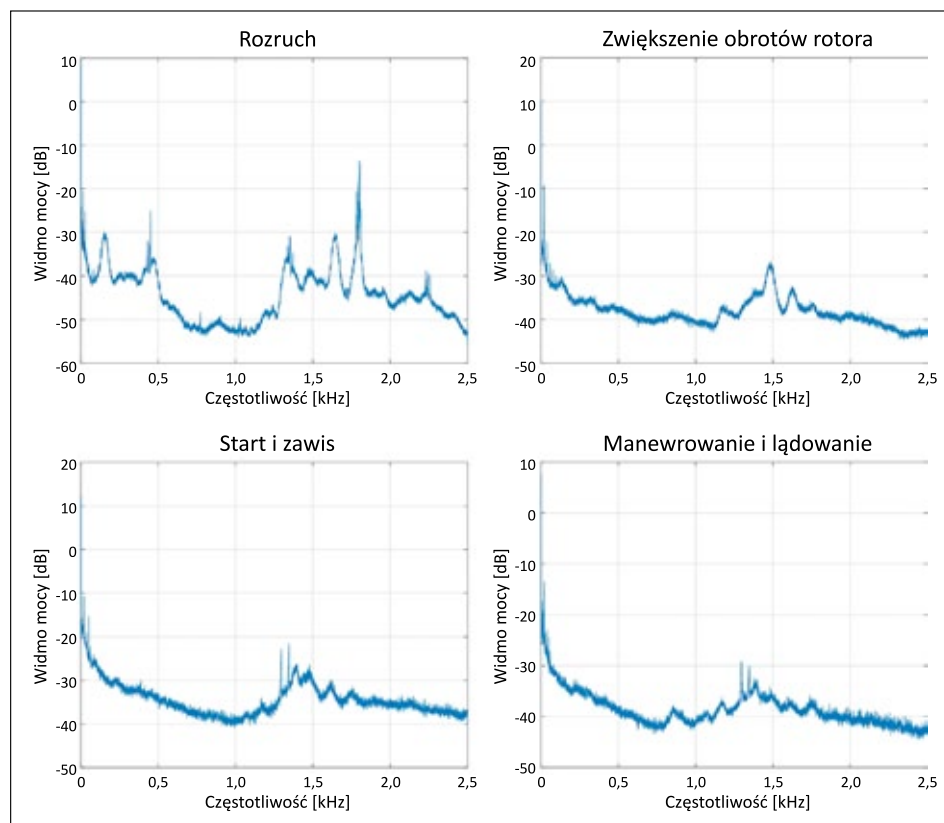
Rysunek 1. System pomiarowy zamontowany na śmigłowcu

Figure 1. Measurement system mounted on the helicopter

w postaci światłowodu, co z kolei pozwala wyeliminować ryzyko zakłóceń elektromagnetycznych pomiędzy urządzeniami pokładowymi śmigłowca a kamerą hiperspektralną.

Podczas testów sprawdzono również potrzebę stosowania dodatkowego tłumika drgań. Pomiary wykonywano z użyciem

pod uwagę uzyskane wyniki, można wnioskować, że obudowa podwieszona pod uchwytem śmigłowca została skonstruowana poprawnie, a zarejestrowane obrazowe dane pomiarowe nie będą zakłócone drganiami pochodzącymi z układu napędowego.

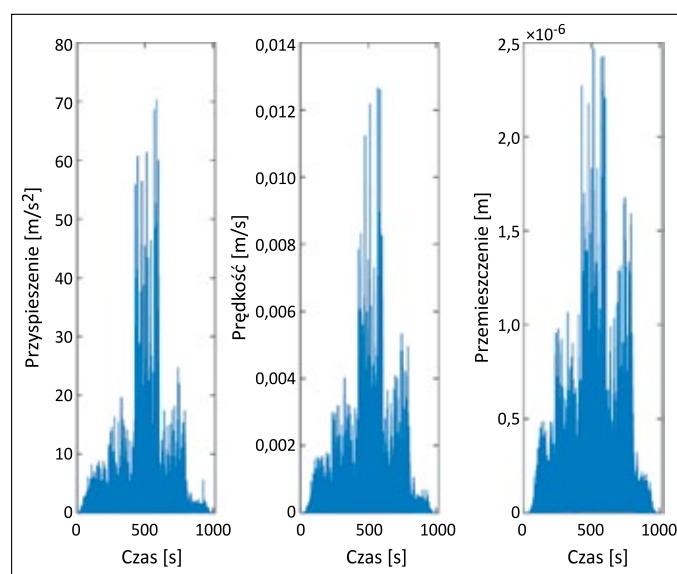


Rysunek 2. Widma sygnałów przyspieszeń drgań uchwyty kamery dla różnych faz lotu

Figure 2. Spectra of camera handle vibration acceleration signals for different phases of flight

akcelerometru (inaczej przyspieszeniometer – urządzenie lub przetwornik mierzące przyspieszenie liniowe lub kątowe elementu czynnego). Wykazały one, że występujące drgania uchwyty są na tyle małe, że nie ma konieczności stosowania dodatkowych elementów tłumiących. Na wykresach (rysunek 2) pokazano widma przyspieszeń dla poszczególnych faz lotu.

Analiza tych sygnałów wskazuje na to, że największe drgania pojawiają się podczas fazy rozruchu rotora śmigłowca. Przyczyną tego stanu są prawdopodobnie pokrywające się częstotliwości drgań składowych harmonicznym wyższych rzędów przekładni silnika i rotora głównego. Uzasadnienia tego stanu można również poszukiwać w pobudzeniu drgań własnych konstrukcji śmigłowca lub wysięgnika, do którego zamocowano uchwyt z kamerą hiperspektralną. Niemniej jednak wartości przemieszczeń obudowy kamery są na bardzo małym poziomie i osiągają wartości *peak-to-peak* mniejsze niż $10\ \mu\text{m}$. Na rysunku 3 pokazano zbiorcze zestawienie zarejestrowanego sygnału z akcelerometru – w dziedzinach przyspieszenia, prędkości i przemieszczenia drgań. Biorąc

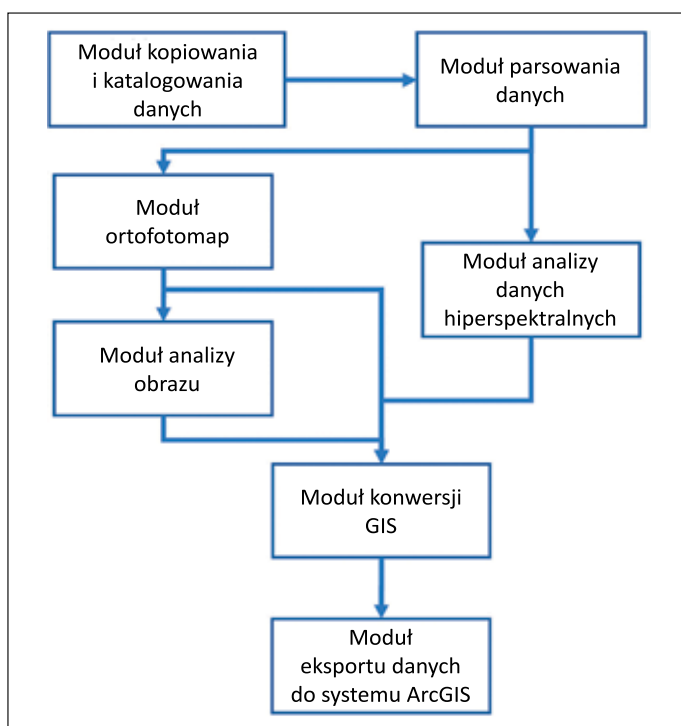


Rysunek 3. Sygnał drgań uchwyty w dziedzinach przyspieszenia, prędkości i przemieszczenia

Figure 3. Handle vibration signal in acceleration, velocity and displacement domains

Implementacja systemu informatycznego

Oprogramowanie podsystemu naziemnego składa się z modułów obliczeniowych, dla których diagram relacji pokazano na rysunku 4. Zadaniem modułów obliczeniowych jest analiza dostarczonych danych pomiarowych pod kątem emisji metanu z nieszczelności w infrastrukturze przesyłowej (*Moduł analizy danych hiperspektralnych*) oraz obecności obiektów niedozwolonych w pobliżu gazociągu (*Moduł ortofotomap* i *Moduł analizy obrazu*). Przetworzone dane agregowane są w *Module konwersji GIS* i dalej przygotowywane w *Module eksportu danych do systemu ArcGIS* jako warstwy dla Systemu Informacji Geograficznej (GIS) stosowanego przez zamawiającego, firmę GAZ-SYSTEM S.A. W dalszej części artykułu opisano integrację modułów programowych na serwerze obliczeniowym.



Rysunek 4. Schemat blokowy systemu iDiaGaSys (Timofiejczuk et al., 2023)

Figure 4. Block diagram of the iDiaGaSys system (Timofiejczuk et al., 2023)

Agregacja modułów obliczeniowych

Wszystkie moduły przetwarzania danych pomiarowych uruchamiane są z poziomu GUI (ang. *graphical user interface*). Jako pierwszy uruchamiany jest *Moduł kopiowania danych*, który odpowiedzialny jest za import danych pomiarowych z nośnika zainstalowanego w kamerze hiperspektralnej. Przygotowuje on właściwą strukturę katalogów wraz z nadaniem im podstawowych własności (nazw, dat itp.) oraz indeksuje dane, które następnie są dostępne do dalszego przetwarzania.

Ponadto moduł ten wydobywa niezbędne do przetwarzania informacje z plików własnościowych systemu pomiarowego, takie jak: dane z zakresu światła widzialnego, dane nawigacyjne itd., oraz oblicza parametry toru optycznego dla późniejszej optymalizacji w procesie tworzenia ortofotomapy. Poprawność struktury danych jest weryfikowana w *Module parsowania*.

Moduł generowania ortofotomap jest odpowiedzialny za obróbkę zdjęć z kamery światła widzialnego wraz z danymi dotyczącymi stempla czasowego i parametrów ich pozyskania. W tym module pozyskane parametry techniczne zdjęć są analizowane pod kątem ich poprawności formalnej. Następuje optymalizacja parametrów toru optycznego, przygotowanie chmury punktów oraz budowa numerycznego modelu terenu. Celem jest przetworzenie zdjęcia do postaci ortofotomapy w przyjętym układzie odniesienia. Kolejnymi modułami uruchamianymi z poziomu GUI są moduły realizujące analizę obrazu i analizę hiperspektralną, które zostały opisane w dalszej części artykułu.

System informatyczny przetwarzania danych zintegrowany został na platformie chmurowej Microsoft Azure, przeznaczonej m.in. do tworzenia wirtualnej infrastruktury informatycznej, w tym serwerów obliczeniowych i plikowych. Dostęp zabezpieczony jest protokołem VPN (ang. *virtual private network* – wirtualna sieć prywatna) oraz systemem autoryzacji w aplikacji na poziomie GUI. Wyzwalanie przetwarzania danych w systemie odbywa się za pomocą zaimplementowanego protokołu REST API. Jest to elastyczna forma komunikacji i dostępu do zasobów, punktów końcowych (ang. *endpoints*) w modułach przetwarzania danych. Pozwala to na migrację modułów między maszynami obliczeniowymi z zachowaniem w pełni możliwości przekazywania informacji oraz sterowania procesem przetwarzania danych.

Moduły przetwarzania danych działają w tzw. kontenerach Docker, które służą do wirtualizacji zasobów na poziomie systemu operacyjnego. Umożliwia to rozdzielenie pracy modułu od reszty systemu informatycznego, zapewniając stabilność pracy serwera, oraz pozwala na łatwe zarządzanie modułem i ewentualną migrację do innego serwera fizycznego. Wszystkie niezbędne biblioteki programowe wykorzystywane w danym module są umieszczone razem z nim w kontenerze, co pozwala na ich działanie niezależne od systemu operacyjnego oraz innych kontenerów i oprogramowania. Technologia Docker umożliwia również łatwe skalowanie zasobów systemu przetwarzania danych.

W każdym module obliczeniowym został również zaimplementowany algorytm raportowania o stanie przetwarzania danych i błędach, np. w procesie komunikacji. Dzięki temu możliwa jest kontrola jego działania i weryfikacja zwracanych wyników.

Moduł analizy danych hiperspektralnych

Moduł analizy danych hiperspektralnych pozwala na analizę danych po kątem wykrywania emisji metanu, na wizualizację wykrytej chmury metanu oraz jej kwantyfikację.

Opracowana metoda wykrywania i kwantyfikacji emisji metanu została oparta na analizie danych hiperspektralnych i algorytmach wykrywania gazu, bazujących na metodach statystycznych. Metoda przeprowadza analizę danych w następujących krokach:

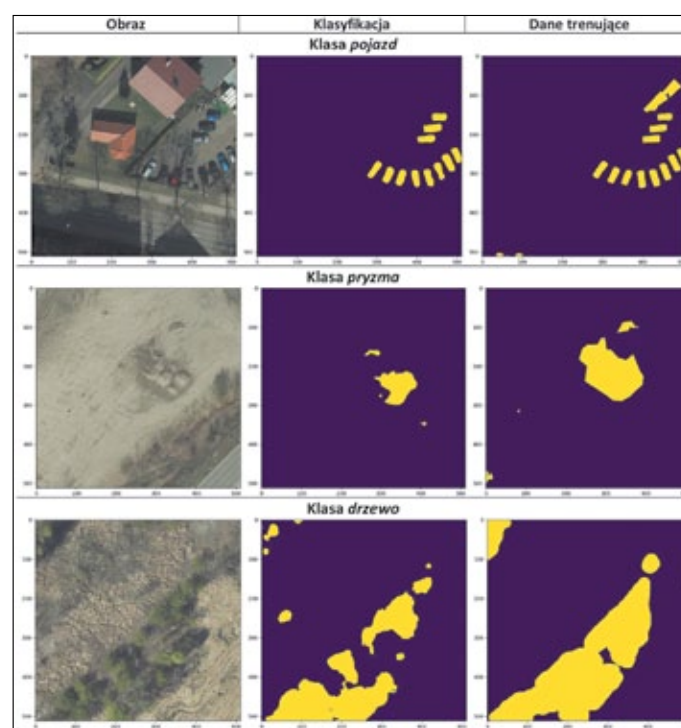
- Przetwarzanie wstępne. Przetwarzanie wstępne obejmuje usuwanie szumów, korekty atmosferyczne, normalizację danych i kalibrację danych. Korekty atmosferyczne są bardzo ważne dla procesu wykrywania metanu, ponieważ obecność metanu może wpływać na transmisję atmosferyczną (inaczej osłabienie fal elektromagnetycznych przez atmosferę) w obszarze dalekiej podczerwieni. W metodzie zastosowano jedną z metod korekcji atmosferycznej, bazującą na modelu atmosferycznym transferu promieniowania (ART).
- Wykrywanie emisji metanu. Algorytm detekcji gazu służy do identyfikacji obecności metanu w danych hiperspektralnych. Algorytm wykorzystuje sygnatury spektralne metanu do identyfikacji pasm absorpcji metanu w oparciu o adaptacyjny filtr dopasowany (AMF), który identyfikuje cechę absorpcji metanu. W metodzie zastosowano kombinację filtrów typu CMF (ang. *common-mode filter*) i SAM (ang. *segment anything model*), z odpowiednim progowaniem i filtrowaniem przestrzennym (Coleman i Li, 1993; Farley et al., 2007; Kastek, 2011; Gålfalk et al., 2015). Jako biblioteka referencyjna dla charakterystyki spektralnej metanu używana jest baza danych zarejestrowanych w paśmie podczerwieni udostępnianych przez Pacific Northwest National Laboratory.
- Szacowanie emisji metanu. Algorytm kwantyfikacji metanu wykonuje analizę widma spektralnego zapisanego w danych, które dały pozytywny rezultat na etapie detekcji. Stężenie metanu szacowane jest za pomocą metody stosującej prawo Beera–Lamberta, według którego jest ono funkcją temperatury termodynamicznej powierzchni, podczas gdy transmitancja jest funkcją stężenia gazu (wyrażonego w ppm), długości ścieżki l (wyrażonej w metrach) i absorpcyjności molowej gazu κ (z jednostkami $\text{m}^{-1} \text{ppm}^{-1}$) (Farley et al., 2007; Moritz et al., 2015).

Moduł analizy obrazu

Moduł analizy obrazu w paśmie światła widzialnego umożliwia wykrywanie i klasyfikację obiektów kolidujących z infrastrukturą gazowniczą. Przez obiekty kolidujące należy rozumieć obiekty fizyczne znajdujące się w obszarze rurociągu lub innej infrastruktury przesyłowej gazu ziemnego i stanowiące zagrożenie dla jego poprawnej eksploatacji.

Danymi wejściowymi do tego modułu są ortofotomapy. Badania wykazały, że najlepsze wyniki w zakresie klasyfikacji obiektów niedozwolonych uzyskano, stosując metody sztucznej inteligencji bazujące na głębokich sieciach neuronalnych (Goodfellow et al., 2018; Trask, 2019). W ramach projektu wyróżniono kilka klas anomalii, takich jak: budynki, samochody, parkingi, drzewa, wykopy itp. Dla każdej klasy rozpoznawanego obiektu wytrenowano jedną sieć neuronalną. Takie postępowanie pozwoliło uzyskać najlepsze rezultaty klasyfikacji, sięgające co najmniej 85% rozpoznawalności. Na rysunku 5, w środkowej kolumnie, pokazano przykładowe rezultaty klasyfikacji. Algorytm klasyfikujący wskazał rozpoznane obiekty dla danej klasy. Dla porównania w prawej kolumnie zamieszczono maskę z zaznaczonymi przez człowieka obiektami, tworząc tym samym zbiory danych trenujących i testujących, niezbędne w procesie budowania klasyfikatora.

Jak można zauważyć, sztuczna sieć neuronowa z dużą skutecznością rozpoznaje zdefiniowane klasy obiektów niedozwolonych.



Rysunek 5. Przykład wyniku testowania klasyfikatora obiektów typu pojazd, pryzma i drzewo

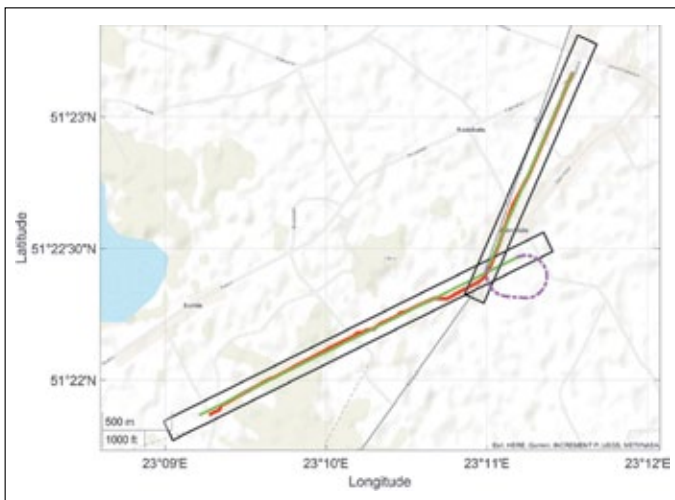
Figure 5. An example of the result of testing a classifier of objects such as a vehicle, a heap and a tree

Wyniki klasyfikacji są zapisywane w specjalnie utworzonej na potrzeby projektu strukturze, zawierającej m.in. informacje o klasie obiektu, jego położeniu (współrzędne geograficzne) i rozmiarze powierzchniowym. Informacje o wykrytych klasach anomalii są zapisane odrębnie dla każdej z nich.

W kolejnym etapie przetwarzania następuje łączenie tych informacji przez specjalnie opracowany w tym celu moduł agregacji danych.

Weryfikacja gotowości technicznej systemu pomiarowego

Przeprowadzone analizy możliwości technicznych, w tym optycznych, kamery hiperspektralnej wykazały, że optymalna wysokość lotu powinna wynosić 285 m nad poziomem gruntu, co pozwoli uzyskać szerokość rejestrowanego pasa w świetle widzialnym wynoszącą około 160 m i w zakresie hiperspektralnym – około 60 m. Dane te są podstawowymi ograniczeniami podczas wyznaczania optymalnych tras przelotu nad gazociągami. Na rysunku 6 pokazano przykład wyznaczonych obszarów zainteresowań (czarne prostokąty) oraz trasy optymalnego lotu (zielone odcinki linii prostych) nad gazociągiem (linia czerwona). Linia fioletową oznaczono sugerowaną trasę lotu pomiędzy obszarami zainteresowań (inaczej nazywanymi segmentami).



Rysunek 6. Przykład tras optymalnego lotu wzdłuż przebiegu hipotetycznego gazociągu

Figure 6. Example of optimal flight routes along a hypothetical gas pipeline

W kolejnym kroku konfiguracji systemu pomiarowego wyznaczone dane geograficzne zostały zdefiniowane jako segmenty misji pomiarowej. Dodanie pozostałych parametrów, takich jak prędkość lotu oraz nastawy algorytmu detekcji metanu, pozwoliły utworzyć kompletną misję pomiarową. W tym celu użyto dostarczonego przez firmę Telops programu narzędziowego Reveal Airborne Planner.

Weryfikacja poprawności działania systemu w zakresie wykrywania i pomiarów wielkości emisji metanu prowadzona była na specjalnie do tego celu skonstruowanym stanowisku

do symulowania i pomiarów wielkości emisji metanu (rysunek 7), zlokalizowanym w Łukanowicach (gmina Wojnicz). Przygotowane stanowisko działa w zakresie ciśnień od 1,6 MPa do 6,3 MPa i umożliwia generowanie różnej wielkości emisji metanu w zakresie od 0,25 l/min do 200 l/min. Konfiguracja stanowiska pozwala na symulację wypływu gazu z elementów podziemnych sieci przesyłowej (gazociągów), a także z elementów infrastruktury naziemnej (stacji gazowych, ZZU). Stanowisko wyposażone jest w układ pomiarowy umożliwiający dokładny, bezpośredni pomiar generowanych wielkości emisji metanu. Dodatkowo na wyposażeniu stanowiska badawczego znajduje się stacja meteorologiczna, która rejestruje temperaturę, wilgotność oraz prędkość i kierunek wiatru podczas prowadzonych testów. Przykładowe wyniki uzyskane podczas jednej serii pomiarowej wykonywanej na potrzeby weryfikacji metody przedstawiono w tabeli 1.

Dla emisji podziemnej, generowanej na poziomie około 40 l/min, zarejestrowana przez system pomiarowy średnia wielkość emisji wynosiła 44,9 l/min. Błąd względny wartości średniej na poziomie 12,2% stanowi zadowalający wynik dla przesiewowej metody polowej. Należy przy tym zaznaczyć, że jest to wynik uśredniony z 30 pomiarów jednostkowych zarejestrowanych podczas 5 przelotów nad punktem emisji. Zarejestrowane wyniki pomiarów jednostkowych mieściły się w przedziale od 3,1 l/min do 83,1 l/min, co przekłada się na wysokie względne odchylenie standardowe pomiarów, sięgające niemal 90%.

Skonfigurowane misje badawcze wraz z zamontowanym na śmigłowcu systemem pomiarowym pozwoliły przeprowadzić próby w locie nad opisanym stanowiskiem badawczym. Loty wykonywano z następującymi parametrami:

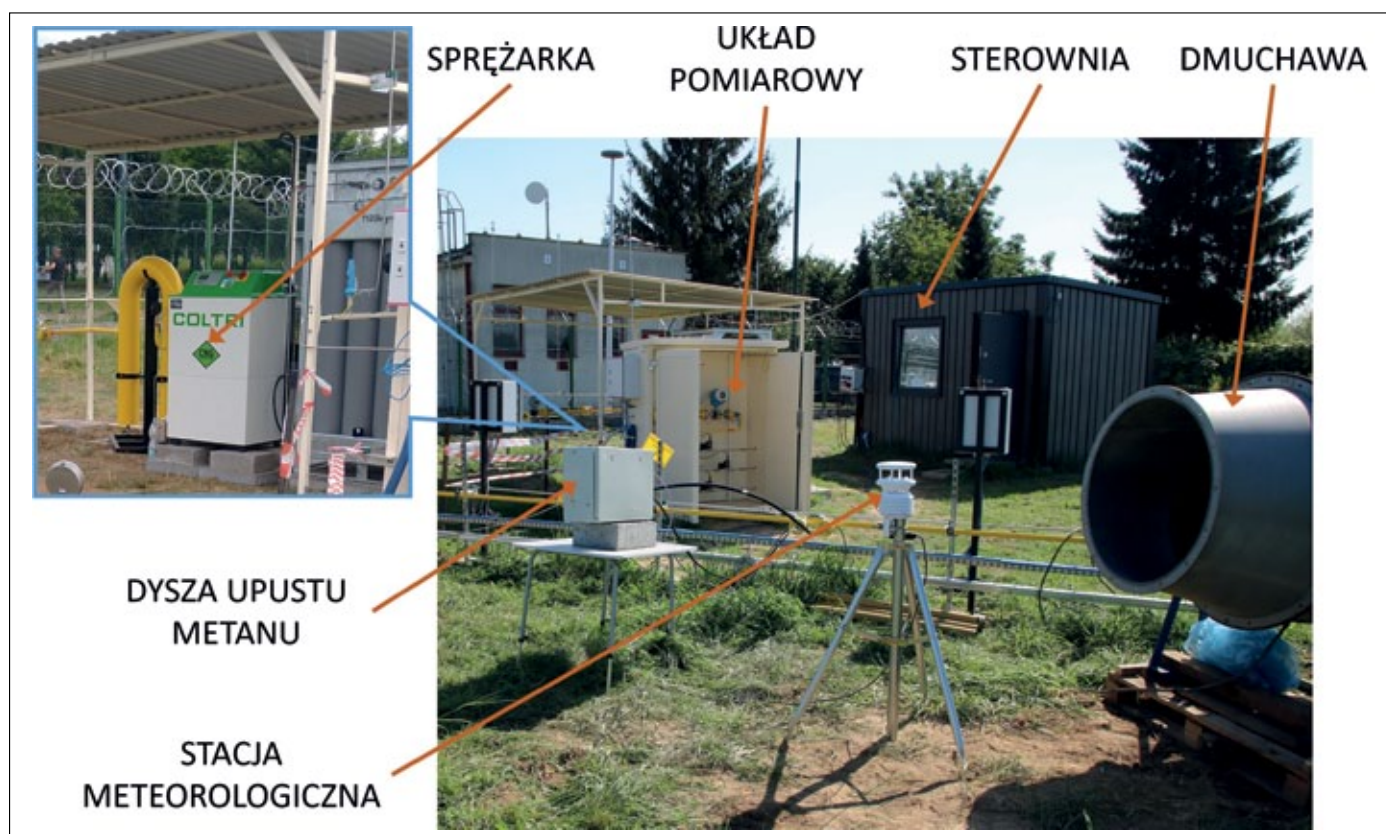
- wysokość lotu: 300 m ±20 m;
- prędkość: 25 m/s ±5 m/s;
- opady atmosferyczne: brak;
- zachmurzenie: brak lub umiarkowane.

Dane rejestrowano w dwóch dostępnych trybach:

- *mapping* – mapowanie pasa terenu wzdłuż trasy przelotu;
- *targeting* – mapowanie pojedynczego, wskazanego punktu geograficznego.

Drugi tryb pozwolił wykonać szereg precyzyjnych pomiarów miejsca symulowanej emisji metanu. Przewiduje się jednak, że z punktu widzenia celu realizowanego projektu najczęściej stosowany będzie tryb mapowania wzdłuż trasy przelotu, a tym samym wzdłuż gazociągu. Podczas realizowanych badań terenowych wykonano ponad 60 lotów nad miejscem symulowanej emisji metanu oraz wzdłuż gazociągu na odcinku około 5 km. Zarejestrowane dane zostały skopiowane na serwer obliczeniowy i poddane obliczeniom.

W celu weryfikacji dokładności pomiaru położenia geograficznego widocznych na zdjęciach obiektów terenowych – na



Rysunek 7. Stanowisko badawcze do symulacji i pomiarów wielkości emisji metanu

Figure 7. Test stands for simulation and measurement of methane emissions

Tabela 1. Wyniki pomiarów wielkości emisji metanu z zastosowaniem opracowywanego systemu

Table 1. Results of methane emission measurements using the developed system

Generowana wielkość emisji	Prędkość wiatru	Temperatura powietrza	Wilgotność względna	Zarejestrowana średnia wielkość emisji	Względne odchylenie standardowe zarejestrowanej wielkości emisji
[l/min]	[m/s]	[°C]	[%]	[l/min]	[%]
39,75–40,00	1,2–1,3	23,9–24,3	46,3–55,4	44,9	89,6

obszarze badawczym naniesiono 20 naziemnych punktów kontrolnych. Były to zarówno tymczasowe znaczniki na ziemi wykonane farbą, jak i punkty charakterystyczne w postaci np. betonowych słupków w pobliżu przebiegu gazociągu lub krawężników.

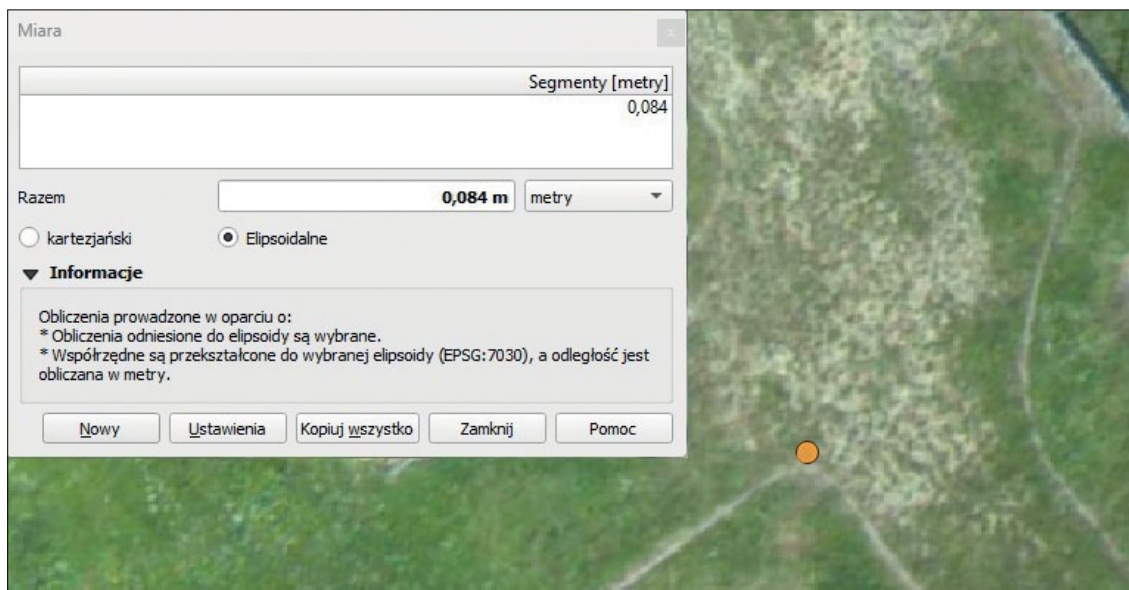
Pomiary zostały wykonane z wykorzystaniem technologii GNSS RTK (ang. *global navigation satellite system real-time kinematic*), przeznaczonej do precyzyjnych pomiarów przy użyciu nawigacji satelitarnej.

Widoczne na opracowanych ortofotomapach punkty naziemne zostały poddane analizie dokładności georeferencji w oprogramowaniu klasy GIS (ang. *geographic information system*). Średnie błędy wyniosły od 17 cm do 41 cm. W przypadku punktów zlokalizowanych w środkowej części ortofotomap uzyskiwana dokładność geolokalizacji dochodziła nawet do 9 cm (rysunek 8).

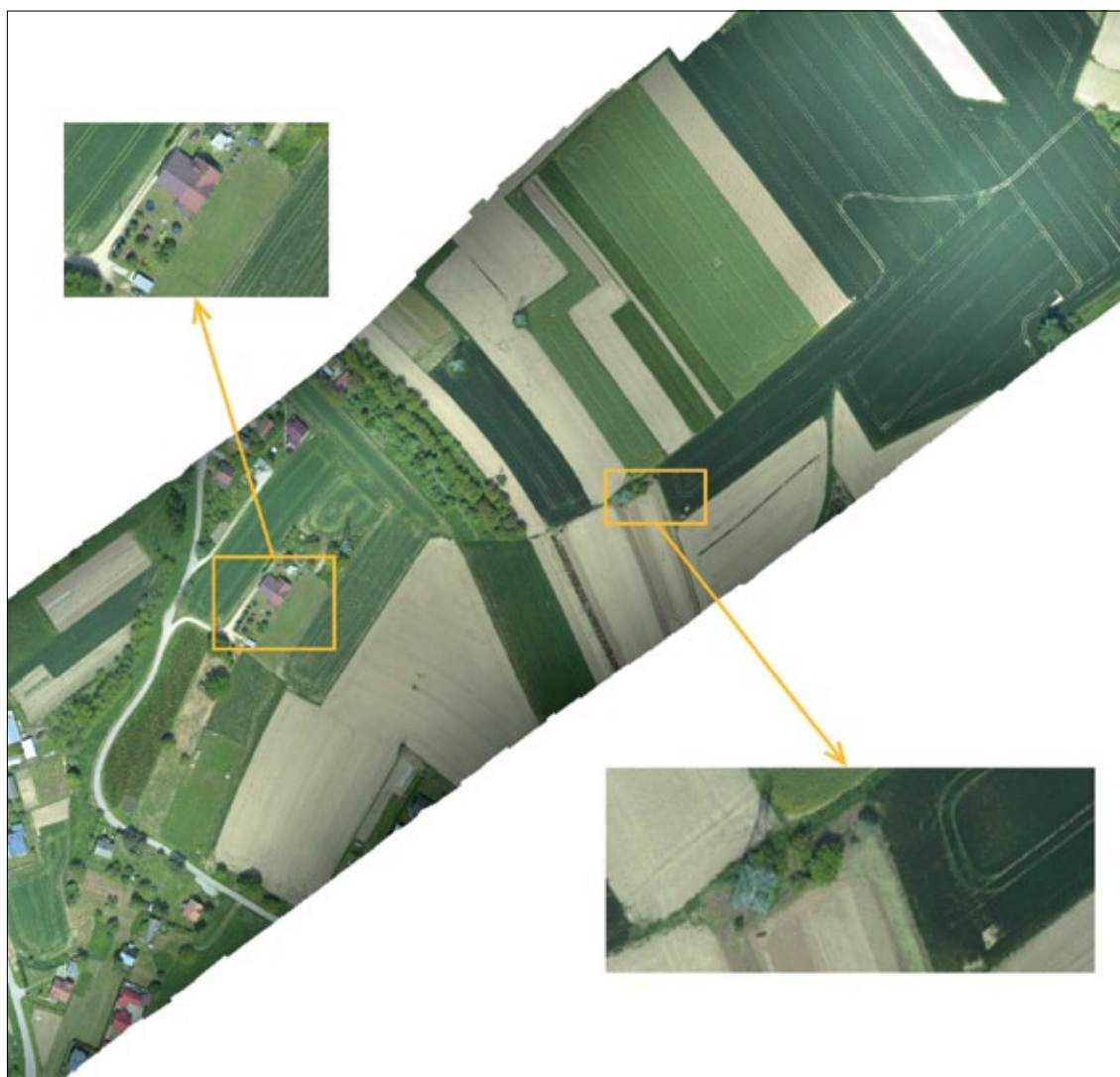
Na rysunku 9 przedstawiono przykład ortofotomapy w paśmie widzialnym, a na rysunku 10 – przykład mozaiki w paśmie podczerwieni, uzyskane na podstawie danych zarejestrowanych w locie w okolicach stanowiska badawczego.

Podczas zrealizowanych badań, w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, wykonane zostały pomiary emisji metanu w trybie targeting dla różnych warunków atmosferycznych. Emisja metanu była symulowana z użyciem stanowiska pomiarowego. Na rysunku 11 przedstawiono przykładowe wyniki dla emisji naziemnej w zakresie 21,0–27,0 l/min. Uzyskane wyniki pokazują, że oszacowane stężenie metanu dość dobrze pokrywa się z zadanymi wartościami emisji.

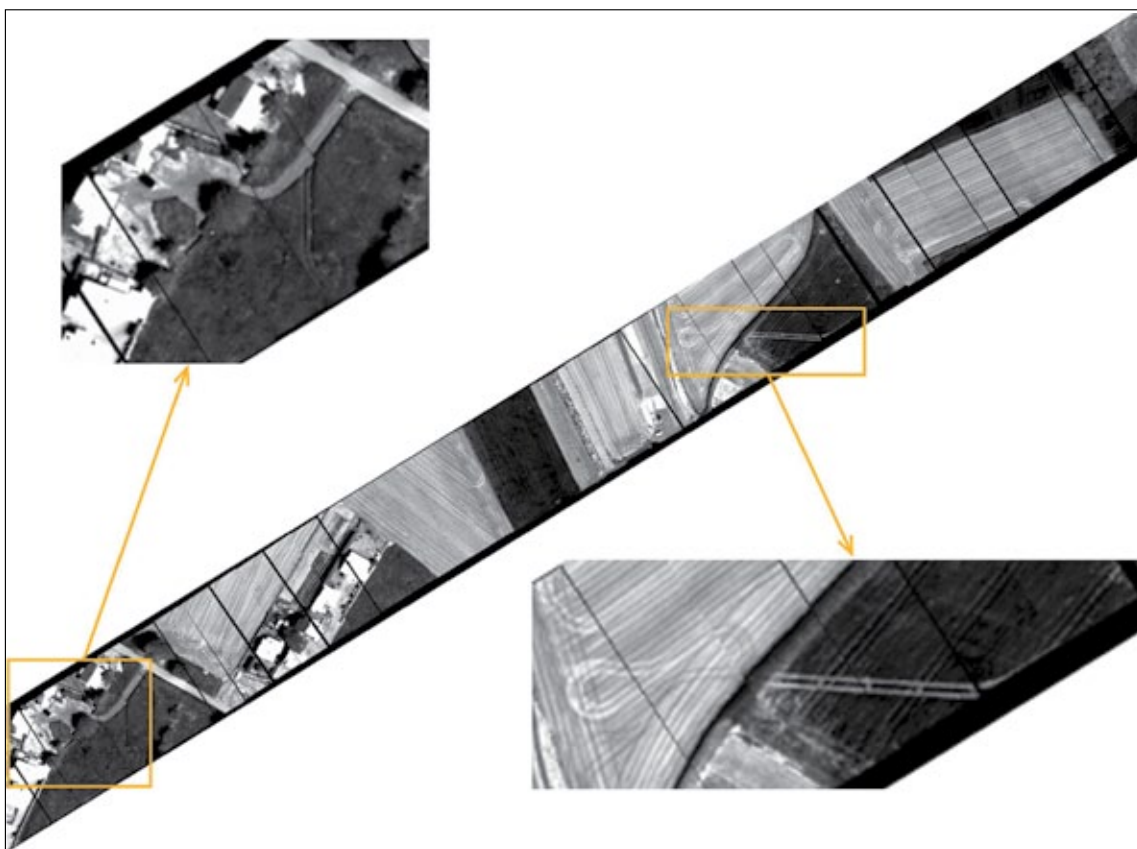
Wykonane analizy ortofotomap zarejestrowanych podczas przelotów nad tym samym obszarem zapisywane są w bazie danych, co pozwala na utworzenie warstw mapy i tym samym przeglądanie danych historycznych w intuicyjny sposób



Rysunek 8. Wynik pomiaru rzeczywistego położenia obiektu (słupek gazowy) względem naziemnego punktu kontrolnego
Figure 8. The result of measuring the actual position of the object (gas pole) relative to the ground control point

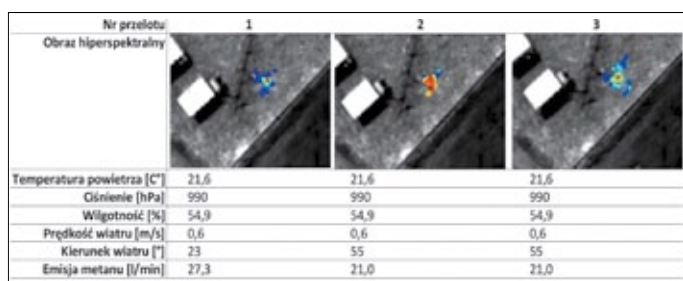


Rysunek 9. Ortofotomapa wygenerowana ze zdjęć z przelotu nad Łukanowicami
Figure 9. Orthophotomapa generated from photos from a flight over Łukanowice



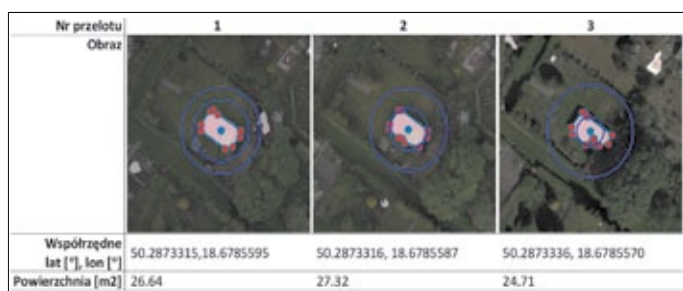
Rysunek 10. Mozaika w paśmie podczerwieni wygenerowana ze zdjęć z przelotu nad Łukanowicami

Figure 10. Infrared mosaic generated from photos taken during the flight over Łukanowice



Rysunek 11. Przykład wyniku detekcji i kwantyfikacji dla symulowanej emisji metanu 25 l/min

Figure 11. Example of detection and quantification result for simulated methane emissions of 25 l/min



Rysunek 12. Przykład oznaczenia obiektu typu budynek podczas przelotów nad tym samym obszarem

Figure 12. Example of marking a building-type object while flying over the same area

(rysunek 12). Podobnie jak w testach dokładności pomiaru położenia geograficznego obiektów terenowych – dokładność pozycjonowania widocznego budynku była mniejsza niż 50 cm, a dokładność pomiaru powierzchni – większa niż 89%. Danymi referencyjnymi były zdjęcia lotnicze wykonane na potrzeby opracowania modułu analizy obrazu w paśmie światła widzialnego.

Podsumowanie

W artykule opisano implementację projektu systemu iDiaGaSys, przede wszystkim w zakresie integracji systemu pomiarowego ze śmigłowcem i modułów obliczeniowych. Opracowane oprogramowanie pozwoliło na wstępne przetestowanie detekcji i kwantyfikacji emisji metanu oraz klasyfikacji obiektów niedozwolonych w otoczeniu gazociągu. Zbudowany system pomiarowy umożliwia swoją integrację nie tylko ze śmigłowcami, ale również z samolotami, co zostało potwierdzone lotem testowym podczas odbioru końcowego kamery hiperspektralnej w siedzibie producenta – firmy Telops w Kanadzie. Otrzymane z przeprowadzonych badań wyniki pozwalają na stwierdzenie, że przyjęty sposób postępowania jest poprawny, co pozwala zastanowić się nad automatyzacją

całego procesu przetwarzania danych, szczególnie w świetle przygotowywanej usługi wspierającej działania eksploatacyjne związane z monitorowaniem infrastruktury gazowej prowadzone przez operatora gazociągów przesyłowych.

Z przeprowadzonych analiz wynika, że system iDiaGaSys spełnia przyjęte założenia i parametry jakościowe przedstawione w artykule (Timofiejczuk et al., 2023), tj.:

- rozmiar piksela na ziemi (kamera na światło widzialne): <5 cm;
 - szerokość pasa obserwacji (kamera na światło widzialne): 160–170 m;
 - rozdzielczość jednego piksela spektrometru obrazowego: około 20 cm × 20 cm;
- przy czym konieczne są dalsze prace nad weryfikacją skuteczności automatycznie wykonywanych analiz poprzez sukcesywne wykonywanie misji pomiarowych w różnych warunkach i nad różnymi obszarami infrastruktury gazowniczej, nie tylko nad stanowiskiem badawczym.

Nota informacyjna

Autorzy informują, że prezentowana koncepcja została dofinansowana przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Inteligentny Rozwój oraz Operatora Gazociągów Przesyłowych GAZ-SYSTEM Spółka Akcyjna. Projekt realizowany w ramach konkursu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju: 4/4.1.1/2019 w ramach wspólnego przedsięwzięcia INGA.

Zamieszczone w artykule zdjęcia nie są związane z eksplloatowaną przez GAZ-SYSTEM infrastrukturą.

Literatura

- Coleman T.F., Li Y., 1993. An Interior Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds. *Cornell University, Ithaca*, TR93-1342. DOI: 10.1137/0806023.
- Farley V., Chamberland M., Lagueux P., Vallières A., Villemare A., Giroux J., 2007. Chemical agent detection and identification with a hyperspectral imaging infrared sensor. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 7486. DOI: 10.1117/12.736864.
- Gålfalk M., Olofsson G., Crill P., Bastviken D., 2015. Making methane visible. *Nature Climate Change*, 2877: 1–5. DOI: 10.1038/nclimate2877.
- Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. (ed.), 2018. *Deep Learning*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa. DOI: 10.1007/s10710-017-9314-z.
- Kastek M., Piątkowski T., Trzaskawka P., 2011. Infrared imaging Fourier transform spectrometer as the stand-off gas detection system. *Metrology and Measurement Systems*, 18(4): 607–620. DOI: 10.2478/v10178-011-0058-4.
- Moritz A., Hélie J.-F., Pinti D.L., Larocque M., Barnette D., Retailleau S., Lefebvre R., Gélinas Y., 2015. Methane Baseline Concentrations and Sources in Shallow Aquifers from the Shale Gas-Prone Region of the St. Lawrence Lowlands (Quebec, Canada). *Environ Sci. Technol.*, 44(9): 4765–4771. DOI: 10.1021/acs.est.5b00443.

Telops: Hyperspectral Cameras. <<https://www.telops.com/products/hyperspectral-cameras/>> (dostęp: 7.07.2023).

- Timofiejczuk A., Rzydzik S., Holewa-Rataj J., Kukulska-Zajac E., Kastek M., Brawata S., Gawelda B., Pawelski D., 2023. Koncepcja systemu monitorowania stanu gazociągów przesyłowych i ich otoczenia. *Nafta-Gaz*, 79(1): 52–60. DOI 10.18668/NG.2023.01.06.
- Trask A.W., 2019. Zrozumieć głębokie uczenie (baza danych online). *Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa*.

Dr hab. inż. Anna TIMOFIEJCZUK, prof. PŚ
Dziekan
Politechnika Śląska
ul. Akademicka 2A, 44-100 Gliwice
E-mail: anna.timofiejczuk@polsl.pl

Dr inż. Sebastian RZYDZIK
Adiunkt
Politechnika Śląska
ul. Akademicka 2A, 44-100 Gliwice
E-mail: sebastian.rzydzik@polsl.pl

Mgr Jadwiga HOLEWA-RATAJ
Starszy specjalista badawczo-techniczny; Kierownik Zakładu Ochrony Środowiska
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A, 31-503 Kraków
E-mail: jadwiga.holewa@inig.pl

Mgr inż. Mateusz RATAJ
Asystent w Zakładzie Użytkowania Paliw
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A, 31-503 Kraków
E-mail: mateusz.rataj@inig.pl

Dr inż. Mariusz KASTEK
Starszy specjalista ds. analizy danych
Technovis Sp. z o.o.
ul. Towarowa 20B, 10-416 Olsztyn
E-mail: mkastek@technovis.pl

Inż. Daniel PAWELSKI
Starszy specjalista informatyk
Technovis Sp. z o.o.
ul. Towarowa 20B, 10-416 Olsztyn
E-mail: dpawelski@technovis.pl

Sebastian BRAWATA
Prezes Zarządu
Vortex Sp. z o.o.
ul. Straszynska 10, 80-180 Gdańsk
E-mail: brawata@vortex.mil.pl

Mgr inż. Bartosz GAWELDA
Specjalista informatyk
Vortex sp. z o.o.
ul. Straszynska 10, 80-180 Gdańsk
E-mail: gawelda@vortex.mil.pl