

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA  
WYDZIAŁ ELEKTRONIKI

---

KIERUNEK: INFORMATYKA

SPECJALNOŚĆ: SYSTEMY INFORMATYKI W MEDYCYNIE

PRACA DYPLOMOWA  
INŻYNIERSKA

System inspekcji obszarów z wykorzystaniem  
autonomicznych dronów

Autonomous drone-based scouting system

AUTOR:

Mateusz Bączek

PROWADZĄCY PRACĘ:

Dr inż. Michał Kucharzak, Katedra Systemów i  
Sieci Komputerowych

OCENA PRACY:

# Spis treści

<b>Spis rysunków</b>	<b>4</b>
<b>Spis listingów</b>	<b>5</b>
<b>Spis tabel</b>	<b>6</b>
<b>1. Wstęp</b>	<b>8</b>
1.1. Geneza pracy	8
1.2. Cel pracy	9
1.3. Zakres pracy	9
<b>2. Wymagania funkcjonalne systemu</b>	<b>10</b>
2.1. Oprogramowanie na dronie	10
2.2. Protokoły wymiany danych	10
2.3. Oprogramowanie serwerowe	11
2.4. Oprogramowanie klienckie	11
<b>3. Architektura systemu: przegląd i wybór technologii</b>	<b>12</b>
3.1. Zarys architektury	12
3.2. Dron	13
3.3. Protokoły wymiany danych	14
3.4. Oprogramowanie serwerowe	14
3.5. Oprogramowanie klienckie	14
3.6. Struktura repozytoriów	14
3.7. Wspólne punkty stykowe - git submodules	14
3.8. Podsumowanie architektury	14
<b>4. Wdrażanie systemu</b>	<b>15</b>
4.1. Konteneryzacja	15
4.2. Automatyczne budowanie projektów	15
4.3. Automatyczne aktualizacje kontenerów	15
<b>5. Testy systemu</b>	<b>16</b>

---

5.1. Testy jednostkowe . . . . .	16
5.2. Testy integracyjne . . . . .	16
5.3. Systemy ciągłej integracji . . . . .	16
5.4. Testy w terenie . . . . .	16
<b>6. Podsumowanie . . . . .</b>	<b>17</b>
6.1. Wyniki testów . . . . .	17
6.2. Osiągnięta sprawność . . . . .	17
6.3. Pola do poprawy . . . . .	17
6.4. Wnioski . . . . .	17
<b>Literatura . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>Indeks rzeczowy . . . . .</b>	<b>19</b>

# Spis rysunków

3.1. Zarys architektury systemu . . . . .	12
---	----

# Spis listingów

# Spis tabel

3.1. Najpopularniejsze otwarte projekty oprogramowania obsługującego kontrolery lotu	13
--	----

# Skróty

**GCS** (ang. *Ground control station*)

**JSON** (ang. *JavaScript Object Notation*)

**Protobuf** (ang. *Protocol Buffers*)

# Rozdział 1

## Wstęp

### 1.1. Geneza pracy

Lotnictwo autonomiczne to prężnie rozwijający się sektor branży lotniczej. Technologie pozwalające na wykorzystanie autonomicznych dronów i samolotów w nowych projektach biznesowych są dostępne na wyciągnięcie ręki - istnieją zarówno systemy zamknięte, w pełni komercyjne, jak i projekty zupełnie otwarte, pozwalające na zapoznanie się z kodem źródłowym oprogramowania sterującego statkami powietrznymi i interakcję z aktywną społecznością pasjonatów, wspólnie rozwijającą projekt.

W świecie biznesu powstają coraz to nowe rozwiązania, wykorzystujące autonomiczne maszyny do świadczenia usług - od razu nasuwającym się rozwiązaniem jest autonomiczne dostarczanie paczek [1], ale istnieją też znacznie bardziej ambitne projekty: dostarczanie defibrylatora wprost do domu osoby, u której wystąpiło zatrzymanie akcji serca [2] lub generowanie trójwymiarowych map terenu, wykorzystując zdjęcia wykonanych z dronów [3]. Biznes jest stosunkowo młody, więc branża jest otwarta na innowatorów – firmy takie jak Boeing i Lockheed Martin sponsorują międzynarodowe konkursy przeznaczone dla młodych konstruktorów [4].

Zainteresowani autonomicznym lotnictwem inwestorzy nie ograniczają się do prywatnych firm. Rząd australijskiego stanu Queensland współorganizuje *UAV Challenge* – zawody skupione wokół rozwijania systemów wspierających służby medyczne [5].

Wykorzystanie otwartych technologii, skupionych wokół awiacji autonomicznej i połączenie ich z nowoczesnymi praktykami wdrażania oprogramowania to temat atrakcyjny zarówno z perspektywy inżynierii oprogramowania, jak i z perspektywy biznesowej. Koło naukowe Politechniki Wrocławskiej – *Akademicki Klub Lotniczy* (AKL) zajmuje się budowaniem i rozwijaniem autonomicznych dronów i samolotów [6]. Omawiany w pracy system powstał w ramach realizacji projektu z Wrocławskiego Funduszu Aktywności Studenckiej [7].



## 1.2. Cel pracy

Celem pracy jest stworzenie prototypu systemu inspekcji terenów, wykorzystującego autonomiczne drony. System ma integrować się z już istniejącym oprogramowaniem sterującym autonomicznymi maszynami, oraz wykorzystywać napisaną na potrzeby pracy infrastrukturę informatyczną, pozwalającą na planowanie tras lotów, obsługę telemetrii i rozpoznawanie obiektów na zdjęciach wykonanych w czasie lotu, za pomocą algorytmów sztucznej inteligencji. Finalnie, system ma generować raport podsumowujący każdy lot, w którym zawarta będzie trasa pokonana przez drona i zdjęcia wykonane w trakcie lotu, wraz z rozpoznanymi na nich obiektami.

Architektura systemu musi pozwalać na zautomatyzowanie procesu wdrażania systemu, oraz zautomatyzowanie wdrażania nowych funkcjonalności - każde z wdrożeń musi być poprzedzone testami integracyjnymi na poziomie całego systemu.

Prototyp ma być w pełni testowalny, zarówno na poziomie pojedynczych elementów systemu jak i na poziomie integracji całego projektu - testy muszą angażować wszystkie komponenty systemu, uruchomione wewnątrz w pełni zautomatyzowanego środowiska testowego.

## 1.3. Zakres pracy

Zakres pracy obejmuje elementy projektu związane z inżynierią i architekturą oprogramowania - proces projektowania struktury systemu, wybór technologii, zaprojektowanie punktów stykowych w systemie, automatyzacja procesu wdrażania systemu i nowych funkcjonalności.

Praca opisuje także sposób testowania systemu - od weryfikacji poprawności działania poszczególnych komponentów, po pełne automatyczne testy integracyjne, wykorzystujące wszystkie komponenty systemu wraz ze zintegrowanym symulatorem drona.

## Rozdział 2

# Wymagania funkcjonalne systemu

### 2.1. Oprogramowanie na dronie

Wielowirnikowce podłączone do systemu muszą być zdolne do autonomicznego lotu - w kontekście pracy oznacza to zdolność do automatycznego startu, lądowania, stabilizacji oraz samodzielnego lotu do koordynatów GPS. W trakcie lotu, maszyna musi zbierać i wysyłać dwa rodzaje danych:

- dane telemetryczne,
- zdjęcia wykonane w czasie lotu

Dane telemetryczne muszą zawierać informacje o pozycji drona oraz identyfikować maszynę za pomocą unikatowego identyfikatora oraz numeru lotu. Przesyłany jest też poziom naładowania baterii oraz informacja, czy w obecnym czasie prowadzone jest nagrywanie.

### 2.2. Protokoły wymiany danych

W przypadku systemu działającego autonomicznie, wymiana danych jest kluczowym elementem pozwalającym na sprawdzanie poprawności działania i diagnozowania błędów w systemie. Podczas lotów testowych często nie ma możliwości bezpośredniej obserwacji systemu lub ingerencji w jego sposób działania. Odpowiednia architektura zbierająca i archiwizująca dane z lotów pozwala znacznie szybciej wykryć potencjalne problemy i zapobiec krytycznym błędom.

#### 2.2.1. Dane telemetryczne

Protokół do wymiany danych telemetrycznych powinien wysyłać dane w postaci binarnej, gdyż jest to bardziej efektywne niż kodowanie ich w postaci tekstowej (na przykład w formacie JSON, typowym dla języków wysokopoziomowych - wykorzystywanym w technologiach webowych).

Protokół powinien być w łatwy sposób rozszerzalny, pozwalając w przyszłości zredefiniować część wysyłanych pakietów lub dodać nowe dane, bez tracenia kompatybilności wstecznej bądź konieczności przebudowania całego systemu. Poszczególne komponenty systemu będą pisane

w różnych językach programowania - biorąc to pod uwagę, pożądaną cechą protokołu jest też możliwość szybkiego przeportowania go na inny język programowania.

### 2.2.2. Zdjęcia wykonane w trakcie lotu

Efektywny przesył zdjęć oraz filmów to temat zbyt obszerny i wymagający, żeby poruszać go w treści pracy - system powinien wykorzystywać dowolny prosty w implementacji protokół wysyłania zdjęć. Architektura systemu powinna zapewnić możliwość prostej wymiany tego komponentu, dzięki czemu w przyszłości będzie możliwe zastąpienie go przez bardziej zoptymalizowane rozwiązanie.

## 2.3. Oprogramowanie serwerowe

Serwer webowy jest komponentem, który odbiera, archiwizuje i przekazuje dane nadchodzące z dronów do aplikacji klienckiej. Jest punktem centralnym systemu, wykorzystywanym bezpośrednio przez wszystkie pozostałe elementy.

### 2.3.1. Odbiór i multipleksowanie telemetry

Aby umożliwić diagnozowanie stanu systemu w czasie rzeczywistym - szczególnie stanu wykonujących lot wielowirnikowców, telemetria nadchodząca z maszyn nie może być jedynie archiwizowana na dysku serwera centralnego. Konieczną funkcjonalnością jest przesyłanie jej w czasie rzeczywistym do wielu jednocześnie podłączonych klientów.

Umożliwi to podjęcie akcji w przypadku wykrycia krytycznego błędu, który mógłby zakończyć się uszkodzeniem bądź rozbiciem drona, ułatwi też wykonywanie testów - zarówno na rzeczywistych maszynach, jak i wykorzystujących symulatory lotu.

## 2.4. Oprogramowanie klienckie

Aplikacja kliencka skupiona jest wokół trzech funkcjonalności:

1. planowanie tras i harmonogramu lotów,
2. odbiór telemetry i zdjęć z dronów w czasie rzeczywistym,
3. przegląd i analiza telemetry oraz zdjęć zarchiwizowanych z poprzednich lotów.

Kluczowym elementem aplikacji klienckiej jest obsługa mapy - wszystkie wymienione funkcjonalności wymagają wizualizacji nadchodzących danych geograficznych, rozszerzonych o dodatkowe informacje (na przykład godzina przelotu przez dany punkt lub zarejestrowane w danym miejscu zdjęcia i wykryte na nich obiekty).

## Rozdział 3

# Architektura systemu: przegląd i wybór technologii

### 3.1. Zarys architektury

Rys. 3.1: Zarys architektury systemu



## 3.2. Dron

### 3.2.1. Kontroler lotu

Wielowirnikowce podłączone do systemu, muszą być wyposażone w kontroler lotu – umożliwiający autonomiczny lot, stabilizację oraz obsługę peryferiów takich jak czujniki oraz silniki.

Spośród aktywnie rozwijanych i popularnych projektów [8] tworzących oprogramowanie do kontrolerów lotu, można wyróżnić cztery najpopularniejsze inicjatywy:

Tab. 3.1: Najpopularniejsze otwarte projekty oprogramowania obsługującego kontrolery lotu

Nazwa projektu	Rok założenia	Docelowy hardware	Licencja
ArduPilot[9]	2009	otwarte mikrokontrolery ARM	GPLv3
AutoQuad[10]	2011	mikrokontrolery STM Cortex M4	GPLv3
LibrePilot[11]	2015	zamknięte źródłowo kontrolery lotu, bazujące na architekturze ARM	GPLv3
PX4 Autopilot[12]	2012	otwarte mikrokontrolery ARM	BSD

Spośród wymienionych projektów, ArduPilot posiada najbardziej rozbudowaną bazę dokumentacji i instrukcji. Architektura projektu umożliwia skompilowanie projektu na standardowy komputer typu PC uruchomienie go w wirtualnym środowisku[13], co ułatwia proces testowania oprogramowania, które steruje dronem – model maszyny jest symulowany, jednak warstwa komunikacji jest dokładnie taka sama, jak w przypadku pracy z prawdziwym dronem. Dodatkowo, projekt realizowany był w kole studenckim, w którym ArduPilot jest od lat wykorzystywany do sterowania dronami i samolotami, co przesądziło o zastosowaniu go jako oprogramowanie do kontrolera lotu.

### 3.2.2. Komputer pokładowy

Poza kontrolerem lotu, który zawiera jedynie oprogramowanie niezbędne do sterowania dronem i udostępniania strumienia telemetrii, na maszynie musi znaleźć się też komputer pokładowy, do zastosowań bardziej ogólnych. Będzie on wykorzystywany do obsługi wysokopoziomowych peryferiów: kamery oraz modemu GSM. Do zadań komputera pokładowego będzie należała także realizacja logiki biznesowej systemu - odczytanie harmonogramu przelotów z serwera webowego i załadowanie do kontrolera lotu konkretnej trasy przelotu.

#### Wymagania sprzętowe

Aby wypełniać zadania wymienione powyżej, komputer pokładowy musi posiadać następujące interfejsy sprzętowe:

- UART – do komunikacji z kontrolerem lotu,
- USB – do komunikacji z modemem,
- CSI – do komunikacji z kamerą.

Większość dostępnych na rynku komputerów klasy SBC (*Single-board Computer*) posiada powyższe interfejsy, więc wymagania sprzętowe nie są tutaj ograniczeniem. W projekcie został wykorzystany najpopularniejszy do zastosowań amatorskich komputer *Raspberry Pi*.

### **Oprogramowanie**

Na komputerze pokładowym zainstalowany jest system Linux – gwarantuje to bezproblemową obsługę peryferiów oraz dostępność stosu sieciowego, koniecznego do przesyłania danych telemetrycznych i zdjęć. Dodatkowo, wymagane jest oprogramowanie dekodujące i enkodujące wiadomości protokołu *MavLink*, który jest wykorzystywany przez ArduPilota do komunikacji z zewnętrznymi systemami [14].

Infrastruktura projektu ArduPilot dostarcza gotowe biblioteki, służące do parsowania i tworzenia wiadomości w protokole *MavLink*. Wykorzystujemy bibliotekę *Dronekit-Python*, która rozszerza biblioteki dostarczane przez projekt *ArduPilot* i udostępnia interfejs obiektowy do komunikacji z kontrolerem lotu.

## **3.3. Protokoły wymiany danych**

## **3.4. Oprogramowanie serwerowe**

## **3.5. Oprogramowanie klienckie**

## **3.6. Struktura repozytoriów**

## **3.7. Wspólne punkty stykowe - git submodules**

## **3.8. Podsumowanie architektury**

## **Rozdział 4**

# **Wdrażanie systemu**

**4.1. Konteneryzacja**

**4.2. Automatyczne budowanie projektów**

**4.3. Automatyczne aktualizacje kontenerów**

# **Rozdział 5**

## **Testy systemu**

### **5.1. Testy jednostkowe**

### **5.2. Testy integracyjne**

#### **5.2.1. Symulacja i symulatory**

### **5.3. Systemy ciągłej integracji**

### **5.4. Testy w terenie**



## **Rozdział 6**

# **Podsumowanie**

**6.1. Wyniki testów**

**6.2. Osiągnięta sprawność**

**6.3. Pola do poprawy**

**6.4. Wnioski**

# Literatura

- [1] Amazon Inc, "Amazon prime air," 2013. <https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?ie=UTF8&node=8037720011>.
- [2] A. Claesson, A. Bäckman, M. Ringh, L. Svensson, P. Nordberg, T. Djärv, and J. Hollenberg, "Time to Delivery of an Automated External Defibrillator Using a Drone for Simulated Out-of-Hospital Cardiac Arrests vs Emergency Medical Services," *JAMA*, vol. 317, pp. 2332–2334, 06 2017.
- [3] F. Remondino, L. Barazzetti, F. Nex, M. Scaioni, and D. Sarazzi, "Uav photogrammetry for mapping and 3d modeling-current status and future perspectives," vol. XXXVIII-1/C22, 01 2011.
- [4] R. Pogrzebny and K. Florencka, "Sukces polskich studentów na zawodach sae aero design w usa," 2018. <https://naukawpolsce.pap.pl/aktualnosci/news%2C29012%2Csukces-polskich-studentow-na-zawodach-sae-aero-design-w-usa.html>.
- [5] UAV Challenge , "Sponsors and supporters 2019 & 2020," 2019. <https://uavchallenge.org/about/sponsors-and-supporters/>.
- [6] "Akademicki klub lotniczy - strona internetowa," 2020. <https://akl.pwr.edu.pl/>.
- [7] "Wrocławski fundusz aktywności studenckich - strona internetowa," 2020. <https://wca.wroc.pl/fast-fundusz-aktywnosci-studenckiej>.
- [8] E. S. M. Ebeid, M. Skriver, and J. Jin, "A survey on open-source flight control platforms of unmanned aerial vehicle," 08 2017.
- [9] "Ardupilot - strona domowa projektu," 2020. <https://ardupilot.org/>.
- [10] "Autoquad - historia projektu," 2020. <http://autoquad.org/home/autoquad-project-timeline/>.
- [11] "Librepilot - strona domowa projektu," 2020. <https://www.librepilot.org/site/index.html>.
- [12] "Px4 autopilot - strona domowa projektu," 2020. <https://px4.io/>.
- [13] "Ardupilot - dokumentacja funkcjonalności symulatora autopilota," 2020. <https://ardupilot.org/dev/docs/sitl-simulator-software-in-the-loop.html>.

- [14] “Ardupilot - dział dokumentacji poświęcony protokołowi mavlink,” 2020. <https://ardupilot.org/dev/docs/mavlink-commands.html>.