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:

WROCŁAW, 2020

Spis treści

Spis rysunków

Spis listingów

Spis tabel

Skróty

JSON (ang. *JavaScript Object Notation*) - format serializacji danych, natywny dla języka *JavaScript*, wykorzystywany głównie w technologiach webowych.

CI/CD (ang. *Continuous Integration/Continuous deployment*) - zestaw praktyk i narzędzi, wykorzystywanych w celu automatyzacji procesu testowania i wdrażania oprogramowania.

Obraz dockera (ang. *Docker image*) - bazowy obraz systemu plików, na którym zainstalowana jest dana aplikacja (lub wiele aplikacji).

Kontener dockera (ang. *Docker container*) - obraz dockera, który został **uruchomiony** na komputerze. Posiada własny stan – uruchomione procesy oraz zmiany w systemie plików.

Rozdział 1

Wstęp

1.1. Geneza pracy

Jako członek Akademickiego Klubu Lotniczego - koła naukowego Politechniki Wrocławskiej, zajmuję się oprogramowywaniem autonomicznych dronów i samolotów. W ramach realizacji projektu z Wrocławskiego Funduszu Aktywności Studenckiej powstał, przedstawiony w tej pracy, prototyp systemu inspekcji obszarów.

Sektor gospodarki związany z inżynierią bezzałogowych maszyn lotniczych znajduje się w stanie dynamicznego rozwoju i generuje coraz większe przychody. Tym samym przyciąga inwestorów skłonnych zainwestować w innowacyjne pomysły zarówno dużych przedsiębiorstw, jak i młodych konstruktorów. Międzynarodowe zawody sponsorowane przez podmioty prywatne i organizacje rządowe umożliwiają pasjonatom wdrożenie w życie ich wizji. Przykład stanowi *UAV Challenge* - zawody skoncentrowane na autonomicznych systemach wsparcia służb medycznych, współorganizowane przez rząd australijskiego stanu Queensland, które przyciągają corocznie najlepsze zespoły z całego świata[1]. Potencjał inwestycyjny i naukowy, którym dysponuje ta branża, sprzyja powstawaniu różnorodnych rozwiązań. W konsekwencji bezpośrednio niezwiązane z lotnictwem sektory korzystają z dorobku autonomicznej awiacji. Tytułem przykładu: generowanie trójwymiarowych map terenu, przy użyciu zdjęć wykonanych z dronów znajduje zastostowanie w dziedzinach takich jak górnictwo, geodezja czy militaria [2]; dostarczanie towarów indywidualnym klientom z pomocą dronów jest w stanie zrewolucjonizować działalność transportową.

Przeprowadzenie autonomicznej misji bezzałogową maszyną możliwe jest dzięki osiągnięciom inżynierii oprogramowania. Entuzjaści programowania regularnie udoskonalają i rozbudowują projekty opensource. Powszechna dostępność i możliwość korzystania ze sprawdzonych i stabilnych rozwiązań zdecydowanie usprawnia proces realizowania kreatywnych i innowacyjnych projektów.

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 telemetrii

Aby umożliwić diagnozowanie stanu systemu w czaie 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 telemetrii i zdjęć z dronów w czasie rzeczywistym,
3. przegląd i analiza telemetrii oraz zdjęć zarchiwizowanych z poprzednich lotów.

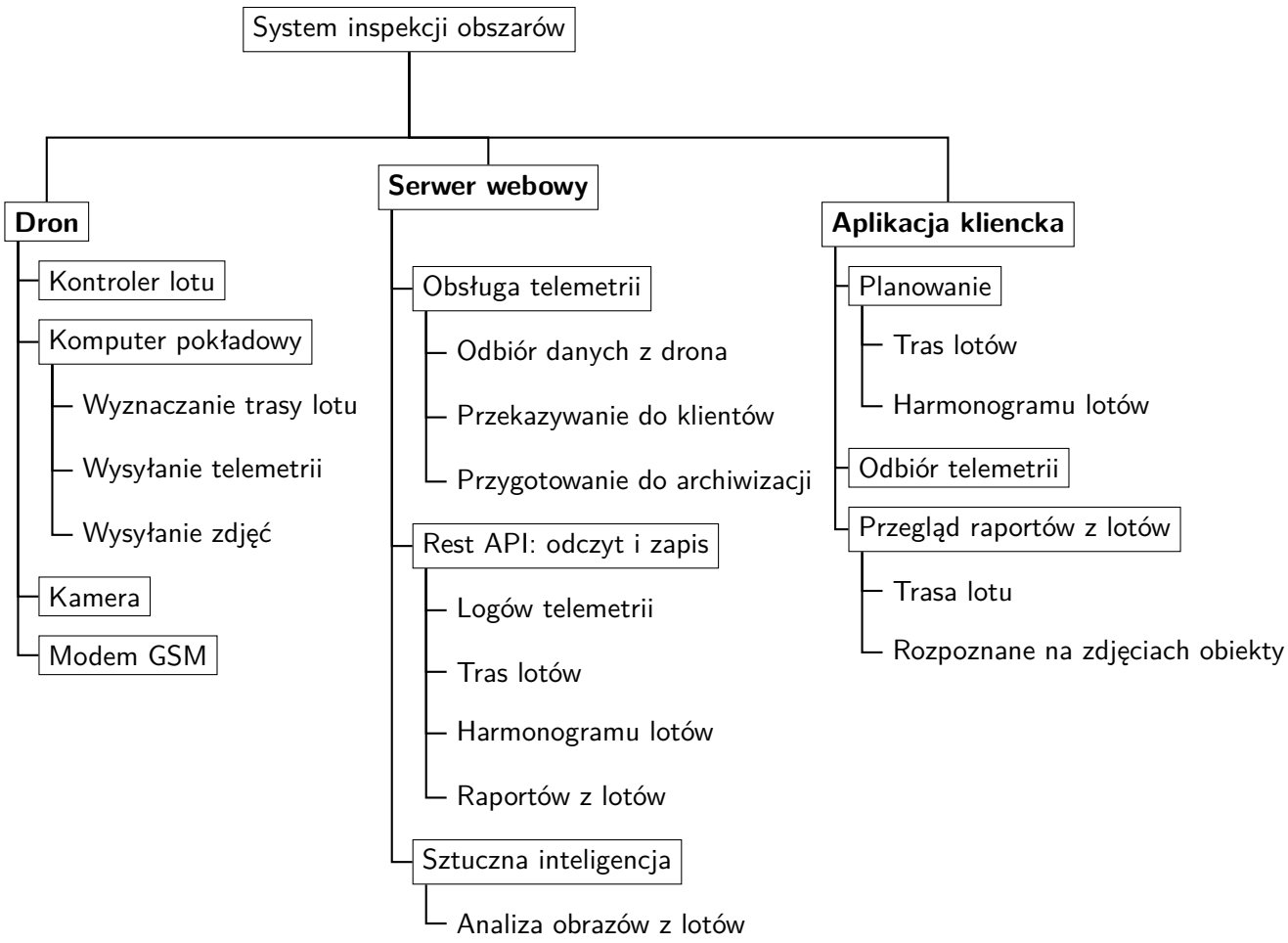
Kluczowym elementem aplikacji klienckiej jest obsługa mapy - wszystkie wymienione funkcjonalności wymagają wizualizacji nadchodzących danych geograficznych, rozszerzonych o dodatkowe informacje (na przykład godzina przelotu przez dany punkt lub zarejestrowane w danym miejscu zdjęcia i wykryte na nich 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 [3] 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[4]	2009	otwarte mikrokontrolery ARM	GPLv3
AutoQuad[5]	2011	mikrokontrolery STM Cortex M4	GPLv3
LibrePilot[6]	2015	zamknięte źródłowo kontrolery lotu, bazujące na architekturze ARM	GPLv3
PX4 Autopilot[7]	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[8], 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 niezbędnie do sterowania dronem i udostępniania strumienia telemetriii, 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 [9].

Infrastruktura projektu ArduPilot dostarcza gotowe narzędziae do parsowania i tworzenia wiadomości w protokole *MavLink*. Jedną z nich jest `pymavlink` - implementacja protokołu *MavLink* w języku Python. `pymavlink` zawiera podstawowe funkcje i obiekty konieczne do komunikacji z kontrolerem lotu. Biblioteka jest niskopoziomowa i nie w całości napisana w sposób obiektowy – finalnie wykorzystujemy więc bibliotekę `dronekit-python`[10], która rozbudowuje `pymavlink` o w pełni obiektowy, wysokopoziomowy interfejs do komunikacji z kontrolerem lotu. Skrypty odpowiedzialne za logikę biznesową napisane są w Pythonie.

3.3. Protokoły wymiany danych

3.3.1. Dane telemetryczne - biblioteka `protobuf`

W trakcie lotu, drony regularnie wysyłają dane telemetryczne. Każdy pakiet danych telemetrycznych w systemie zawiera następujące informacje:

- unikatowy identyfikator maszyny,
- identyfikator lotu (unikatowy dla każdej maszyny),
- pozycję odczytaną z odbiornika GPS,
- poziom naładowania baterii,
- informacja czy w obecnej chwili wykonywane są zdjęcia z lotu,
- timestamp w standardowym 32-bitowym formacie unixowym.

Nie jest wykluczone, że w przyszłości może pojawić się potrzeba dołączenia do danych telemetrycznych nowych informacji, na przykład w przypadku, gdy do maszyny zostanie dodane nowe oprzyrządowanie, lub gdy system byłby adaptowany do obsługi innego rodzaju misji. Dodatkowo, skala projektu wymusza utrzymywanie implementacji tego samego protokołu w wielu różnych językach programowania – oprogramowanie wysyłające telemetrię z drona napisane jest w Pythonie, interfejs webowy wyświetlający telemetrię będzie musiał być jednak napisany w języku JavaScript (ponieważ tylko ten język jest wspierany przez przeglądarki internetowe). W przyszłości może pojawić się konieczność dodania wsparcia dla innego języka programowania – na przykład gdyby do systemu miałby być dodany kolejny komponent. Jest to potencjalne źródło problemów związanych z integracją między komponentami systemu, ponieważ

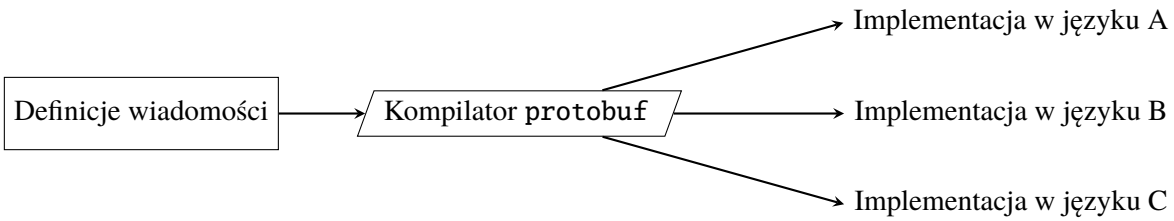
wraz z dodawaniem kolejnych danych telemetrycznych i zwiększaniem liczby wspieranych języków, rośnie szansa na popełnienie błędu w implementacji protokołu. Nawet w przypadku dwóch równolegle wspieranych języków, utrzymywanie spójnej implementacji protokołu nie jest zadaniem trywialnym – szczególnie jeśli protokół wysyła dane w formie binarnej, co jest konieczne, gdy jednym z wymagań jest wydajne zapakowanie danych.

Jednym z możliwych rozwiązań tego problemu jest wykorzystanie narzędzi do generowania kodu. Narzędzia tego typu pozwalają na zdefiniowanie standardu danych telemetrycznych we własnym (specyficznym dla narzędzia) języku, opisującym strukturę danych przesyłanych przez protokół. Następnie, narzędzia takie generują implementację protokołu w wybranych językach programowania. Dzięki automatycznemu generowaniu implementacji protokołu, programiści nie muszą dbać o spójność implementacji pomiędzy wieloma językami.

Wykorzystywanym w projekcie narzędziem do generowania implementacji protokołu jest `protobuf` (*Protocol Buffers*)[11] – biblioteka napisana w firmie Google, stworzona z myślą o zapewnianiu wydajnej komunikacji w czasie rzeczywistym pomiędzy wieloma systemami informatycznymi. W obecnej wersji (`v3.14.0`), biblioteka pozwala na generowanie kodu w językach:

- Python
- C++
- Java
- C#
- JavaScript
- Go

Rys. 3.2: Diagram przedstawiający system generowania implementacji protokołu, na podstawie narzędzia `protobuf`



Poza automatycznym generowaniem kodu protokołu, `protobuf` zapewnia także:

- wydajne wykorzystanie miejsca – biblioteka upakowuje dane w formie binarnej,
- kompatybilność wsteczną – w przypadku dodania nowego typu pakietu telemetrii, implementacja zachowuje spójność z poprzednimi wersjami. Dzięki temu możliwe jest stopniowe wprowadzanie zmian w wielokomponentowym systemie,
- automatycznie generowane mechanizmy, pozwalające na sprawdzanie, czy dane umieszczone w pakiecie telemetrii są poprawne (sprawdzanie typów, sprawdzanie czy zostały wypełnione wszystkie pola pakietu),
- interfejs programistyczny, umożliwiający samodzielne dopisanie wsparcia nowych języków do kompilatora `protobuf`.

Listing 3.1: Przykład definicji pakietu `protobuf`

```
syntax = "proto3";

package Telemetry;

/**
  Wiadomość zawierająca pozycję
  maszyny w trakcie lotu
*/
message Position {
  float lat = 1;
  float lng = 2;
  float alt = 3;
  float heading = 4;
}

message TelemFrameHeader {
  /* Flight metadata */
  int32 timestamp = 1;
  int32 machine_id = 2;
  int32 flight_id = 3;

  /**
  Kompozycja wcześniej
  zdefiniowanej wiadomości
  */
  Position position = 4;
}
```

Listing 3.2: Przykład wykorzystania wygenerowanej implementacji pakietów w języku Python

```
# Wygenerowany moduł, zawierający definicje
# pakietów, domyślnie nosi nazwę definitions_pb2
import definitions_pb2
import time

header = definitions_pb2.TelemFrameHeader()

header.timestamp = int(time.time())
header.machine_id = 1
header.flight_id = 5

header.position.lat = 5
header.position.lng = 10
header.position.alt = 15
header.position.heading = 20

# Postać binarna, gotowa do zapisania do pliku
# lub wysłania przez protokół UDP/WebSocket
```

```
19 serialised_header = header.SerializeToString()
20 print("Serialised header:")
21 print(serialised_header)
```

3.3.2. Zdjęcia wysyłane w trakcie lotu - biblioteka `imagezmq`

Wykonane przez drony zdjęcia wysyłane są na serwer webowyza pomocą biblioteki `imagezmq`. Jak zaznaczono we wstępie, wysyłanie strumienia wideo to temat zbyt skomplikowany, aby poruszać go w pracy – rozwiązanie wykorzystywane do przesyłu zdjęć zostało wybrane ze względu na prostotę instalacji i implementacji.

Biblioteka `imagezmq` pozwala wysyłać obrazy za pomocą protokołu `zmq`. Przed wysłaniem, obrazy są kompresowane, jednak jest to kompresja ograniczająca się do pojedynczego kadru – nie zaś strumienia obrazów, jak by to miało miejsce w przypadku strumieniowania filmu z lotu.

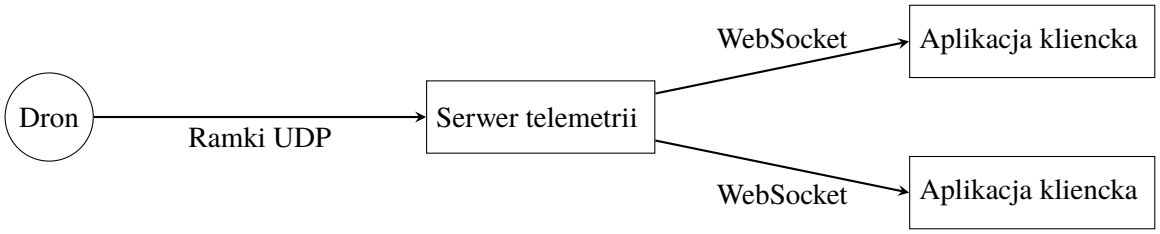
3.4. Oprogramowanie serwerowe

Serwer webowy jest punktem stykowym wszystkich elementów w systemie. Na serwerze przechowywane są wszystkie dane konieczne do działania systemu, takie jak trasy i harmonogramy lotów. Nadchodząca z dronów telemetria jest na serwerze multipleksowana i archiwizowana, pozwalając zarówno na odbieranie jej w czasie rzeczywistym z poziomu aplikacji klienckiej, jak i na analizę już zakończonych lotów.

3.4.1. Obsługa telemetrii

System obsługujący dane telemetryczne odbiera nadchodzące z maszyn pakiety `protobuf`, następnie w czasie rzeczywistym przekazuje je do aplikacji klienckich – w ten sposób możliwy jest jednoczesny odbiór telemetrii na dowolnie wielu urządzeniach. Poszczególne loty rozróżnialne są za pomocą unikatowej krotki `(id_maszyny, id_lotu)`. Gdy system zauważy, że pakiety telemetryczne z danego lotu przestały napływać (przez ponad 10 sekund nie pojawił się żaden nowy pakiet o danym `(id_maszyny, id_lotu)`), archiwizuje wszystkie otrzymane w ramach tego lotu pakiety, aby możliwe było przeanalizowanie ich po locie.

Rys. 3.3: Architektura systemu obsługującego telemetrię



Pakiety pomiędzy dronem a serwerem telemetrii przesyłane są za pośrednictwem protokołu UDP. Został wybrany, ponieważ jest protokołem bezpołączeniowym – będzie odporny na potencjalne straty zasięgu, które mogą wystąpić w przypadku przelotu maszyny przez miejsce o

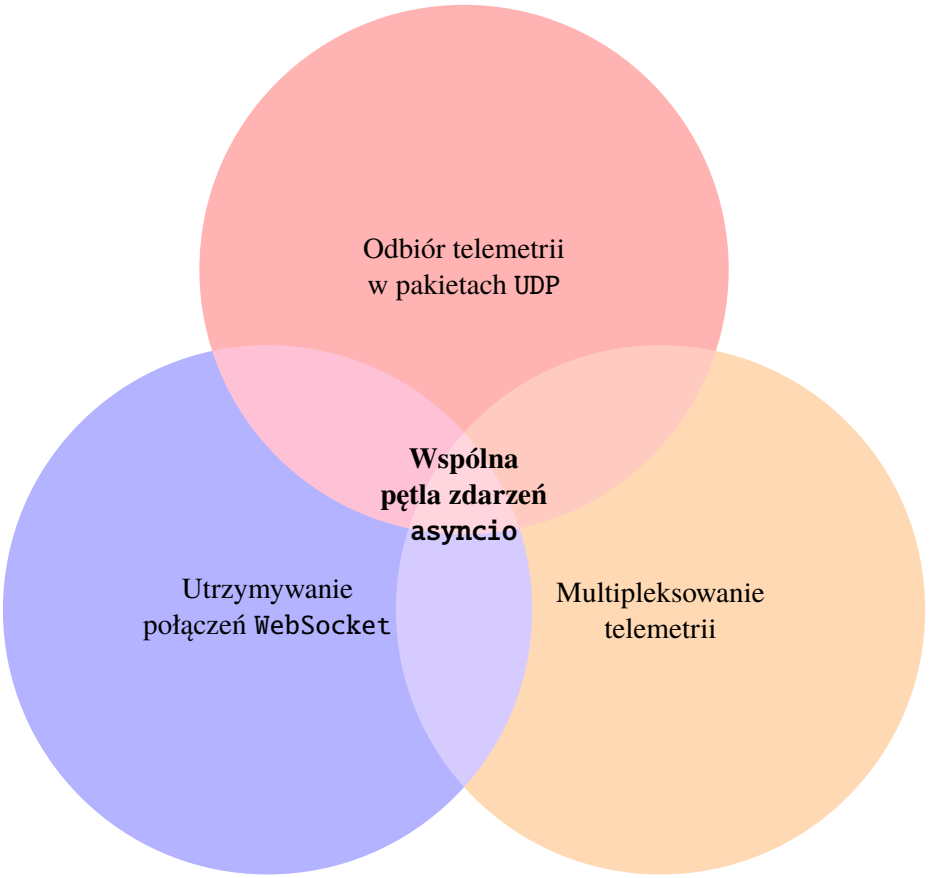
słabym pokryciu siecią GSM. Wykorzystanie protokołu UDP zapewnia też mniejszy narzut dodatkowych danych, niż w przypadku wykorzystania TCP.

Po odebraniu ramek UDP na serwerze telemetrii, dane telemetryczne rozsyłane są do wszystkich podłączonych obecnie aplikacji klienckich. Aplikacja kliencka może być uruchomiona na dowolnej przeglądarce internetowej, w związku z czym wykorzystanie niskopoziomowych protokołów nie jest tutaj możliwe - przeglądarki internetowe nie obsługują ich ze względów bezpieczeństwa. Nadal wymagana jest jednak komunikacja w czasie rzeczywistym. Aby spełnić te wymagania, wykorzystany został protokół `WebSocket`[12], obsługiwany przez wszystkie powszechnie używane przeglądarki internetowe.

System obsługujący telemetrię będzie musiał równolegle obsługiwać nadchodzące ramki protokołu `UDP` oraz aplikacje klienckie, połączone za pośrednictwem protokołu `WebSocket`, uniemożliwia wykorzystanie wysokopoziomowego frameworka, napisanego z myślą o typowych projektach w obrębie technologii webowych – tego typu narzędzia nie zapewniają wsparcia dla niskopoziomowych protokołów, takich jak UDP.

W projekcie wykorzystana została biblioteka `asyncio` – służąca między innymi do pisania kodu odpowiedzialnego za komunikację sieciową[13]. `Asyncio` pozwala na łatwe zinterfejsowanie ze sobą asynchronicznie działających korutyn, jednocześnie wykonujących różne operacje sieciowe.

Rys. 3.4: Zadania wykonywane równolegle wewnątrz systemu obsługi telemetrii. Wspólny interfejs obsługi korutyn oraz wymianę danych pomiędzy zadaniami zapewnia biblioteka `asyncio`.



3.4.2. Rest API

System zaopatrzony jest w standardowy serwer `Rest API`[14], pozwalający na zapis i odczyt:

- Tras lotów
- Harmonogramów lotów
- Danych telemetrycznych, odebranych w trakcie lotu
- Obrazów otrzymanych w trakcie lotu

Wszystkie obecnie używane popularne języki programowania, posiadają przynajmniej jeden aktywnie rozwijany framework służący do pisania interfejsów `Rest API`. W projekcie wykorzystano język Python i framework `Django`, jednak równie dobrze sprawdzi się tutaj dowolna inna technologia (`Spring`, `.NET`, `Ruby on Rails`).

3.4.3. Sztuczna inteligencja - analiza obrazów z lotów

Ostatnim komponentem tworzącym oprogramowanie serwerowe jest moduł sztucznej inteligencji, rozpoznający obiekty na zdjęciach wykonanych w trakcie lotu. Zakres pracy nie obejmuje tematów związanych ze szczegółami działania sztucznej inteligencji – implementacja ogranicza się do wykorzystania gotowego rozwiązania i zintegrowania go z pozostałymi komponentami systemu (w szczególności z systemem odbierającym zdjęcia z lotu).

Do rozpoznawania obrazów wykorzystany został otwartoźródłowy system YOLO - *You Only Look Once* [15]. W ramach integracji, system został skompilowany do formy biblioteki współdzielonej i podłączony do skryptu w języku *Python*. Skrypt monitoruje określony folder w systemie plików i rozpoznaje zdjęcia, które się w nim pojawią.

Rys. 3.5: Zdjęcie wykonane w czasie lotów testowych. System rozpoznał na nim 2 osoby.

3.5. Oprogramowanie klienckie

Aplikacja kliencka pozwala na wykonanie następujących działań:

- zaplanowanie przelotu:
  - zaplanowanie trasy,
  - wybór prędkości, z jaką mają być pokonywane konkretne segmenty trasy,
  - wybór segmentów trasy, podczas których mają być wykonywane zdjęcia,
  - zaplanowanie godziny wylotu.
- podgląd telemetrii w czasie lotu,
- przegląd danych teletrycznych zapisanych z poprzednich lotów:
  - podlgąd trasy pokonanej przez maszynę,
  - podgląd wykonanych przez maszynę zdjęć, wraz z informacjami o rozpoznanych obiektach,

Najbardziej wymagającym z wymagań jest obsługa mapy, która będzie obecna we wszystkich widokach aplikacji. W systemie została wykorzystana biblioteka `Leaflet`, służąca do wizualizowania danych na mapach. Biblioteka napisana jest z myślą o technologiach webowych, aplikacja kliencka została więc zrealizowana jako aplikacja webowa. Wykorzystanym w aplikacji frameworkiem `JavaScript` jest `VueJS`.

Rys. 3.6: Widok aplikacji klienckiej, odpowiedzialny za planowanie tras.

3.6. Struktura repozytoriów

3.6.1. Konfiguracja *CI/CD*

Jak zaznaczono w zakresie pracy (1.3), system zaopatrzony jest w mechanizmy automatyzujące testowanie i wdrażanie nowych funkcjonalności. Popularne narzędzia do ciągłej integracji, takie jak *Jenkins*, *Gitlab CI* czy *Travis CI*, wykorzystują specjalny plik konfiguracyjny umieszczony w repozytorium. Konfiguracja zawiera zestaw kroków, dzięki którym kod obecny w repozytorium zostanie automatycznie zbudowany, przetestowany i wdrożony. Wykorzystywanym w projekcie narzędziem *CI/CD* jest *Gitlab CI*, ktory oczekuje, że w głównym folderze repozytorium będzie znajdował się specjalny plik konfiguracyjny, o nazwie `gitlab-ci.yml`. Jest on obecny we wszystkich repozytoriach projektowych.

3.6.2. Wspólne punkty stykowe - `git submodules`

Komunikacja pomiędzy komponentami systemu realizowana jest za pośrednictwem pakietów `Protobuf`, opisanych w rozdziale 3.3.1. Każde z repozytoriów musi więc posiadać pliki, zawierające definicje pakietów, wygenerowane za pomocą kompilatora `Protobuf`.

Możliwe jest utrzymywanie kopii definicji pakietów w każdym projektowym repozytorium, jednak takie rozwiązanie szybko doprowadzi do konieczności wykonywania dużej ilości ręcznych poprawek w kodzie, za każdym razem gdy zmieni się standard pakietów. Nawet przy niewielkiej liczbie repozytoriów, łatwo tu o błąd programisty.

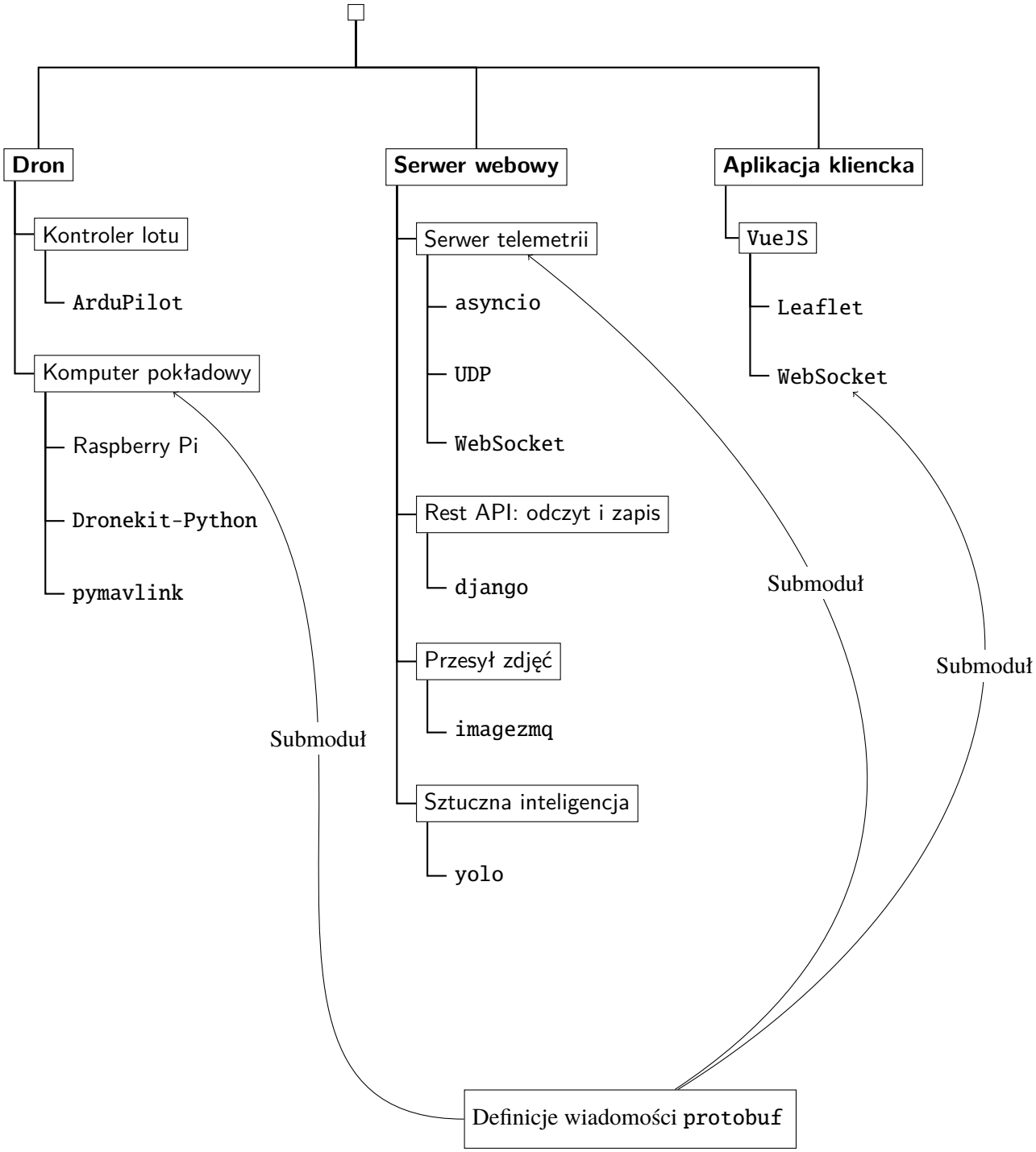
Napisanie biblioteki z definicjami pakietów nie jest tutaj odpowiednim rozwiązaniem, ponieważ biblioteki pisane są zazwyczaj pod konkretny język programowania. Komponenty systemu, które przetwarzają telemetrię są napisane w językach *Python* i *TypeScript* – nie jest więc możliwe napisanie dla nich wspólnej biblioteki.

System kontroli wersji `git` zawiera funkcjonalność `git submodules`[16], która została wykorzystana w projekcie do rozwiązania problemu wspólnych definicji pakietów.

Definicje pakietów, wraz z wygenerowanymi implementacjami w wielu językach, utrzymywane są w osobnym repozytorium, które pobierane jest jako submoduł dla pozostałych projektów. Dzięki temu, możliwa jest aktualizacja repozytorium z definicjami pakietów, a następnie pobranie nowych definicji do wszystkich innych repozytoriów, które wykorzystują submoduł z definicjami.

3.7. Architektura systemu - podsumowanie

Rys. 3.7: Architektura systemu - wykorzystane technologie



Rozdział 4

Wdrażanie systemu

Jak zaznaczono w zakresie pracy (1.3), architektura systemu ma pozwalać na automatyzację wdrożeń. W poniższym rozdziale opisane są technologie i praktyki, które zostały zastosowane, aby zautomatyzować wdrażanie systemu oraz proces dodawania do systemu nowych funkcjonalności.

4.1. Konteneryzacja

Wszystkie elementy systemu docelowo są uruchamiane w kontenerach. Wykorzystanym systemem konteneryzacji jest `docker`[17]. Konteneryzacja ułatwia proces przenoszenia oprogramowania z maszyny na maszynę. Pozwala też na pełne zautomatyzowanie procesu budowania oprogramowania i instalacji koniecznych składników środowiska uruchomieniowego. Konteneryzacja aplikacji wymusza na programiście napisanie skryptu, w wyniku którego w kontenerze zostanie zainstalowane wszystkie konieczne oprogramowanie.

4.1.1. Zachowywanie stanu systemu plików w kontenerze

Ważną różnicą, jaka odróżnia kontenery od aplikacji zainstalowanych w sposób konwencjonalny, jest **bezstanowość**. Jeśli komputer, na którym działają kontenery zostanie zresetowany, bądź kontener zostanie usunięty i utworzony na nowo (na przykład w celu aktualizacji), system plików w kontenerze zostanie zresetowany do stanu, w jakim znajdował się w momencie uruchomienia (takim, jaki jest zapisany w *obrazie kontenera*).

`Docker` pozwala rozwiązać ten problem za pomocą mechanizmu zwanego woluminami (*docker volumes*)[18]. Za pomocą woluminów, dowolny fragment systemu plików kontenera może zostać zmapowany do nieulotnej pamięci komputera, na którym działa kontener. W ten sposób zapewnia się persystencję plików baz danych, czy innych plików, które mają być przetrzymywane przez aplikację.

Uwaga: nie wszystkie kontenery potrzebują zachowywać pliki - kontener odpowiedzialny za hostowanie statycznej strony internetowej nie potrzebuje zapamiętywać zmian w plikach strony.

4.2. Automatyczne budowanie komponentów systemu

Jak wspomniano w rozdziale 3.6, poświęconym strukturze repozytoriów, wszystkie repozytoria zawierają plik `.gitlab-ci.yml`. Plik ten definiuje skrypty, jakie wykona system CI/CD, gdy do repozytorium zostanie dodany nowy kod.

Ponieważ konteneryzacja pozwala na zupełne zautomatyzowanie procesu budowania, skrypty w systemie CI/CD są w stanie samodzielnie zbudować kontener, zawierający konkretny komponent systemu. Następnie, kontener wysyłany jest do *rejestru kontenerów* – specjalnego repozytorium, w którym można przechowywać i wersjonować kontenery. Skrypt systemu CI/CD automatycznie oznacza kontener za pomocą nazwy brancha, na której został zbudowany. Kontenery pochodzące z brancha *master*, uruchamiane są na serwerze produkcyjnym.

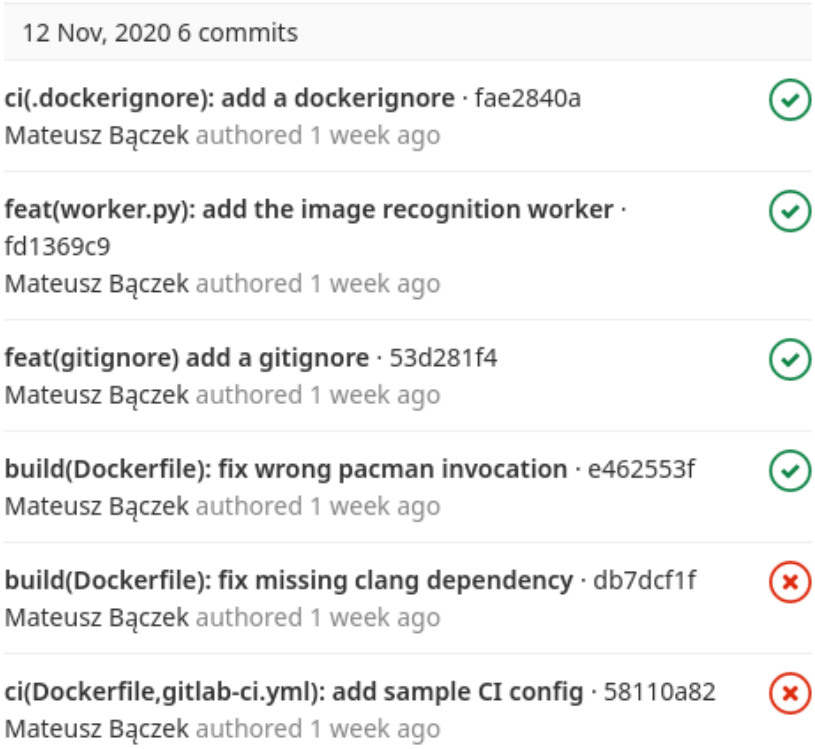
Listing 4.1: Plik konfiguracyjny *Gitlab CI*, budujący aplikację kliencką

```
# Definicje zmiennych, wpływających na proces budowania
variables:
  # Wywołuje automatyczne pobranie submodułów,
  # przed przystąpieniem do budowania
  GIT_SUBMODULE_STRATEGY: recursive

  # Zapewnia dostęp do dockera z poziomu systemu CI/CD
  DOCKER_HOST: tcp://docker:2375
  DOCKER_TLS_CERTDIR: ""

  # Specyfikuje nazwę kontenera, który zostanie zbudowany
  IMAGE_NAME: "registry.gitlab.com/academic-aviation-club/gavron/frontend"

# Przed wykonaniem danego skryptu budującego, wykonywane jest logowanie
# do rejestru dockera - umożliwi to w zapisanie w nim
# zbudowanego obrazu aplikacji. Zmienna $GITLAB_DEPLOY_TOKEN
# przypisywana jest w ustawieniach repozytorium
before_script:
  - docker login -u baczek-vps -p $GITLAB_DEPLOY_TOKEN registry.gitlab.com

# Zawsze budowany jest obraz testowy, który zostanie
# później wykorzystany do testów integracyjnych
build_testing_image:
  stage: build
  # Zapewnia dostęp do dockera w ramach zadania ‘build_testing_image‘
  services:
    - docker:19.03.12-dind
  image: docker:19.03.12

  # Skrypt wpierw buduje obraz dockera, zawierający aplikację.
  # Następnie uruchamia na obrazie testy jednostkowe. Jeśli testy
  # nie zwrócą błędu, obraz jest wysyłany do rejestru.
  # Na obrazach w rejestrze wykonywane są testy integracyjne.
  script:
```

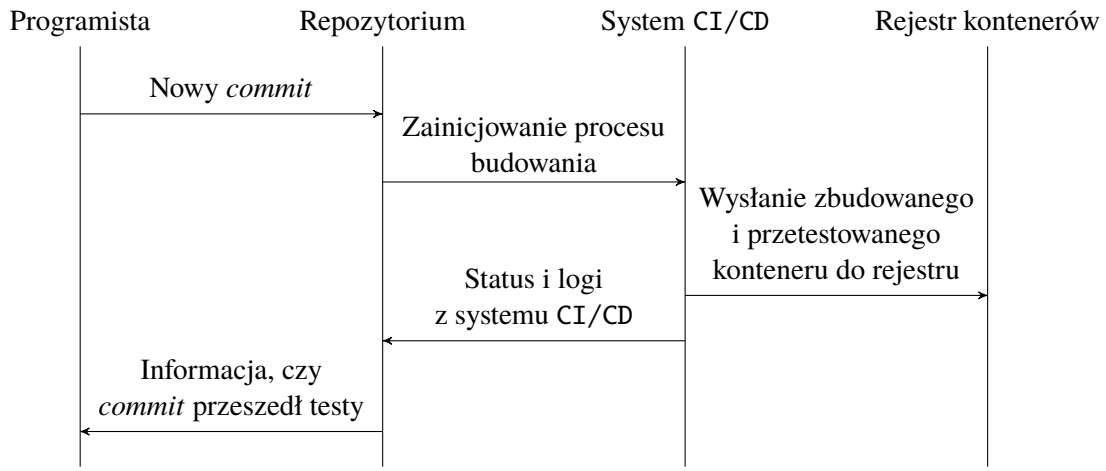
```
35   - docker build -f docker/test.dockerfile -t $IMAGE_NAME:
       ↪ test_$CI_COMMIT_REF_NAME .
36   - docker run $IMAGE_NAME:$CI_COMMIT_REF_NAME "npm␣run␣test"
37   - docker push $IMAGE_NAME:test_$CI_COMMIT_REF_NAME
38
39 # Tylko dla brancha ‘master‘, budowany jest obraz
40 # produkcyjny, który zostanie uruchomiony na serwerze
41 build_prod_image:
42   stage: build
43   services:
44   - docker:19.03.12-dind
45   # ‘only‘ pozwala na wybranie brancha, na którym działa dany skrypt
46   only:
47     - master
48   image: docker:19.03.12
49
50   script:
51   - docker build -f docker/Dockerfile -t $IMAGE_NAME:$CI_COMMIT_REF_NAME .
52   - docker run $IMAGE_NAME:$CI_COMMIT_REF_NAME "npm␣run␣test"
53   - docker push $IMAGE_NAME:$CI_COMMIT_REF_NAME
```

Wszystkie logi, jakie system CI/CD zbierze w trakcie budowania obrazu z aplikacją są dostępne dla programisty - pozwala to odnaleźć błędy, które pojawiły się w procesie budowania. Systemy obsługi repozytorium (taki jak *GitHub*, *BitBucket* czy *GitLab*), wyświetlają informacje o tym, czy dany commit przeszedł testy w systemie CI/CD:

Rys. 4.1: Historia zmian w kodzie w serwisie *GitLab*. Ikony po prawej stronie informują, czy dany commit przeszedł testy w systemie CI/CD



Rys. 4.2: Diagram sekwencji, opisujący proces automatycznej budowy kontenerów



4.3. Automatyczne aktualizacje kontenerów

Pobranie i uruchomienie kontenera, zawierającego dany komponent systemu nie wymaga przechodzenia przez proces instalacji czy konfiguracji - wystarczy pobrać obraz kontenera z rejestru i uruchomić go:

Listing 4.2: Pobranie i uruchomienie obrazu dockera, zawierającego aplikację

```
# Zapisane jako zmienna, aby poprawić czytelność przykładu
IMAGE=registry.gitlab.com/academic-aviation-club/gavron/frontend:master

docker pull $IMAGE
docker run \
    -d \ # detach: kontener działa w tle, nie wysyła logów do terminala
    -p 5000:5000 \ # mapuje port 5000 z kontenera do portu na komputerze
    --name frontend \ # Nadaje nazwę uruchomionemu kontenerowi
    $IMAGE # Nazwa obrazu do uruchomienia
```

W przypadku, gdy na serwerze działa już kontener z aplikacją, należy pobrać nowy obraz kontenera, usunąc obecnie działający kontener i uruchomić nowy obraz:

Listing 4.3: Aktualizacja kontenerów

```
IMAGE=registry.gitlab.com/academic-aviation-club/gavron/frontend:master

docker pull $IMAGE # Pobranie najnowszej wersji kontenera

# Nazwa kontenera nadana w poprzednim przykładzie, za pomocą --name
docker stop frontend

# Usunięcie kontenera w starej wersji (jego stanu, zmian w systemie plików)
docker rm frontend

# Tak samo jak w przykładzie powyżej
docker run \
```

```
13      -d \ # detach: kontener działa w tle, nie wysyła logów do terminala
14      -p 5000:5000 \ # mapuje port 5000 z kontenera do portu na komputerze
15      --name frontend \ # Nadaje nazwę uruchomionemu kontenerowi
16      $CONTAINER # Nazwa kontenera do uruchomienia
```

W przypadku wielu równolegle działających kontenerów, ręczna aktualizacja każdej działającej aplikacji jest zadaniem niepotrzebnie czasochłonnym. Wprowadza też dodatkowy punkt, w którym może zajść pomyłka – na przykład pominięcie jednego z kontenerów przy aktualizacji.

Projekt wykorzystuje narzędzie `Ouroboros` do automatycznej aktualizacji uruchomionych na serwerze kontenerów. `Ouroboros` w regularnych odstępach czasu sprawdza, czy uruchomione na serwerze kontenery nie wymagają aktualizacji. Jeśli w rejestrze dostępna jest nowa wersja obrazu kontenera, pobiera ją i zastępuje nią obecnie działający kontener.

4.4. Orkiestracja systemu złożonego z wielu kontenerów - `docker-compose`

Finalnie, infrastruktura internetowa systemu składa się z sześciu jednocześnie działających kontenerów dockerowych:

1. Kontener serwujący stronę internetową z aplikacją kliencką,
2. Kontener z serwerem API,
3. Kontener z serwerem `imagezmq`,
4. Kontener z systemem telemetrii,
5. Kontener z programem `ouroboros`,
6. Kontener z systemem do rozpoznawania obrazów.

Każdy kontener musi zostać odpowiednio skonfigurowany w momencie uruchamiania, konfiguracja obejmuje:

- Przypisanie limitów zasobów (n.p. maksymalny procent wykorzystania procesora)
- Udostępnienie portów serwera, które może wykorzystywać dany kontener,
- Przypisanie woluminów systemu plików serwera, w celu zapewnienia persystencji danych, zapisywanych przez kontener (opisane w rozdziale 4.1.1),
- Zdefiniowanie reguł automatycznego restartu kontenera (na przykład gdyby proces działający w kontenerze uległ awarii),
- Określenie zmiennych środowiskowych, które mogą wpływać na zachowanie się procesów wewnątrz kontenera (przykładowo, kontener `ouroboros` pozwala za pomocą zmiennych środowiskowych określić, jak często mają być sprawdzane aktualizacje kontenerów).

Narzędzie `docker-compose` pozwala zebrać całą konfigurację kontenerów do jednego pliku konfiguracyjnego [19]. W ten sposób, po uzyskaniu dostępu do rejestru z kontenerami, zawierającymi komponenty systemu, możliwe jest natychmiastowe pobranie i uruchomienie systemu z właściwą konfiguracją 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] UAV Challenge , "Sponsors and supporters 2019 & 2020," 2019. https://uavchallenge.org/about/sponsors-and-supporters/.

[2] 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.

[3] E. S. M. Ebeid, M. Skriver, and J. Jin, "A survey on open-source flight control platforms of unmanned aerial vehicle," 08 2017.

[4] "Ardupilot - strona domowa projektu," Dostęp z 2020. https://ardupilot.org/.

[5] "Autoquad - historia projektu," Dostęp z 2020. http://autoquad.org/home/autoquad-project-timeline/.

[6] "Librepilot - strona domowa projektu," Dostęp z 2020. https://www.librepilot.org/site/index.html.

[7] "Px4 autopilot - strona domowa projektu," Dostęp z 2020. https://px4.io/.

[8] "Ardupilot - dokumentacja funkcjonalności symulatora autopilota," Dostęp z 2020. https://ardupilot.org/dev/docs/sitl-simulator-software-in-the-loop.html.

[9] "Ardupilot - dział dokumentacji poświęcony protokołowi mavlink," Dostęp z 2020. https://ardupilot.org/dev/docs/mavlink-commands.html.

[10] "Dronekit - strona domowa projektu," Dostęp z 2020. https://dronekit.io/.

[11] "Protocol buffers - strona domowa projektu," Dostęp z2020. https://developers.google.com/protocol-buffers.

[12] "Protokół websocket - specyfikacja," Dostęp z 2020. tools.ietf.org/html/rfc6455.

[13] "Biblioteka asyncio - dokumentacja," Dostęp z 2020. https://docs.python.org/3/library/asyncio.html.

[14] R. T. Fielding and R. N. Taylor, "Principled design of the modern web architecture," *ACM Trans. Internet Technol.*, vol. 2, p. 115–150, May 2002.

[15] A. F. Joseph Redmon, "Yolov3: An incremental improvement,"

[16] "Dokumentacja systemu kontroli `git` - rozdział poświęcony submodułom," Dostęp z 2020. `https://git-scm.com/book/en/v2/Git-Tools-Submodules`.

[17] "Dokumentacja platformy `Docker`," Dostęp z 2020. `https://docs.docker.com/`.

[18] "Dokumentacja platformy `Docker` - dział poświęcony woluminom `docker volumes`," Dostęp z 2020. `https://docs.docker.com/storage/volumes/`.

[19] "Dokumentacja platformy `Docker` - dział poświęcony narzędziu `docker compose`," Dostęp z 2020. `https://docs.docker.com/compose/`.