

BDM - Building Mapping Drone

Paweł Okuński - Lider zespołu

Michał Kaczmarek - Zastępca lidera

Szymon Kryzel

Gabriela Konciewicz

Mateusz Kołoszko

Radosław Dębiński

Tomash Mikulevich

8 stycznia 2024

Wstęp

Projekt był realizowany w ramach przedmiotu Zintegrowane Systemy Decyzyjne II w czasie semestru zimowego 2023 roku na wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej.

Zadanie polegało na zaprojektowaniu i przygotowaniu programu, który na podstawie wiele zdjęć wykonanych przy pomocy drona umożliwiłby tworzenie obiektów 3D wraz chmurą punktów budynku oraz jego otoczeniem bez tekstur. Dodatkowo na potrzeby zadania założono stworzone GUI pozwalającego użytkownikowi na zarządzanie procesem generacji w przyszły sposób. Głównym kryterium decydującym o udanej realizacji, była działająca funkcjonalność tworzenia obiektu 3D ze zdjęć.

W projekcie korzystano głównie z języka Python w wersji 3.10. Biblioteki i narzędzia, które zostały wykorzystane to:

- Open3D w wersji 0.17.0
- Numpy w wersji 1.26.0
- PySide2 w wersji 5.15.0
- OpenMVS
- OpenMVG

Do zebrania zdjęć użyto drona DJI Mini 2.

Szczegółowe wymagania końcowe postawione przed zespołem to:

- użycie w procesie tylko zdjęć, które nie wymagają wstępnej obróbki;
- stworzenie programu, który umożliwia utworzenie modelu bez dodatkowej znajomości problemu;
- stworzenie GUI, które jest przyjazne użytkownikowi;
- zdjęcia, które zostaną wykorzystane muszą być ręcznie zebrane przez użytkownika, zgodnie z instrukcją.

OpenMVG to biblioteka służąca do rekonstrukcji trójwymiarowej sceny na podstawie obrazów uzyskanych z różnych perspektyw. Zaawansowane algorytmy detekcji cech oraz dopasowywania pozwalają na wyznaczenie położen kamery oraz struktury mapowanej przestrzeni. OpenMVG obsługuje także algorytm SfM, co umożliwia odtworzenie trójwymiarowych informacji z sekwencji dwuwymiarowych obrazów. Dzięki modularnej strukturze, użytkownicy mają możliwość dostosowania biblioteki do własnych potrzeb.

OpenMVS to narzędzie, które współpracuje z OpenMVG i zajmuje się konwersją rzadkich chmur punktów do gęstych modeli trójwymiarowych. Na bazie danych wejściowych dostarczonych przez OpenMVG, stosuje zaawansowane techniki rekonstrukcji stereo z wielu punktów widzenia, generując szczegółową chmurę punktów 3D. W efekcie uzyskujemy pełniejsze i bardziej realistyczne modele trójwymiarowe sceny

1 Wprowadzenie w tematykę

Tworzenie obiektów 3D na podstawie zdjęć jest skomplikowanym procesem, który wymaga wykonania operacji złożonych obliczeniowo i nierzadko wygenerowania dużej ilości danych pomocniczych. Ponadto, w przypadku naszego projektu dodatkowym zadaniem było samodzielne zebranie danych wejściowych - zdjęć z drona, zachowując zasady bezpieczeństwa oraz nie naruszając przepisów regulujących loty bezzałogowymi statkami powietrznymi.

1.1 Przegląd podobnych rozwiązań

Mapowanie budynków i terenów za pomocą dronów stało się dość powszechnie i popularne ze względu na niski koszt i powszechną dostępność. Rozwiązywanie takie wykorzystuje się w architekturze, urbanistyce czy też pomiarach terenu. Dzięki nowoczesnym technologiom, które są coraz to bardziej zaawansowane jesteśmy w stanie uzyskać dane wysokiej jakości w całym szybki i efektywny sposób. Obecnie na rynku istnieje wiele podobnych rozwiązań, zarówno darmowych jak i płatnych. Jednakże proponowane podejście powinno charakteryzować się większym stopniem zautomatyzowania i nie wymagać od użytkownika wiedzy specjalistycznej.

1.1.1 OpenDroneMap

OpenDroneMap (ODM) to kompleksowe narzędzie fotogrametryczne zaprojektowane specjalnie do przetwarzania danych pochodzących z dronów. Jego głównym celem jest generowanie trójwymiarowych modeli terenu i struktur, co obejmuje tworzenie map wysokościowych, modeli powierzchni, a także chmur punktów. Dzięki zastosowaniu zaawansowanych algorytmów fotogrametrycznych, ODM potrafi dokładnie odwzorować topografię terenu na podstawie sekwencji zdjęć lotniczych.

Oprogramowanie to jest wysoce konfigurowalne, umożliwiając użytkownikom dostosowywanie parametrów przetwarzania zgodnie z indywidualnymi potrzebami. Ponadto, ze względu na swoją otwartość, ODM staje się często wybieranym narzędziem w społeczności naukowej i inżynierijnej, gdzie istnieje potrzeba dostępu do kodu źródłowego oraz możliwości rozwijania i dostosowywania algorytmów do konkretnych zastosowań.

Wśród praktycznych zastosowań OpenDroneMap znajdują się: monitorowanie zmian terenowych, planowanie urbanistyczne, inwentaryzacja zasobów naturalnych, a także pomoc humanitarna w obszarach dotkniętych klęskami żywiołowymi. ODM stanowi zatem wszechstronne narzędzie, które wspiera różnorodne dziedziny, wykorzystując potencjał dronów do zdalnego zbierania danych.

1.1.2 DroneDeploy

DroneDeploy to zaawansowana platforma służąca do kompleksowego zarządzania danymi pochodzącymi z dronów. Działa na zasadzie usługi chmurowej, co oznacza, że umożliwia użytkownikom planowanie, monitorowanie i analizę misji lotów dronów w jednym miejscu. Platforma oferuje intuicyjny interfejs, dzięki któremu użytkownicy mogą łatwo projektować trasy lotów, definiować obszary do zbadania, a następnie zdalnie sterować dronami.

DroneDeploy umożliwia zbieranie różnorodnych danych z lotów dronów, w tym obrazów, chmur punktów i danych termowizyjnych. Po zebraniu danych, platforma przetwarza je automatycznie w chmurze, generując mapy wysokościowe, modele 3D oraz raporty analityczne. To pozwala użytkownikom na szybkie i efektywne uzyskiwanie informacji geoprzestrzennych oraz analizę terenową.

Jedną z istotnych cech DroneDeploy jest również możliwość integracji z różnymi narzędziami i systemami, co sprawia, że stanowi ono elastyczne rozwiązanie dostosowywane do potrzeb konkretnych branż. W związku z tym, platforma ta znalazła zastosowanie w rolnictwie do monitorowania upraw, w budownictwie do tworzenia modeli budynków, czy też w inspekcjach infrastrukturalnych.

1.2 OpenSfM

OpenSfM (Open Source Structure from Motion) jest systemem fotogrametrycznym, który opiera się na zasadzie analizy sekwencji zdjęć w celu odtworzenia trójwymiarowej geometrii obiektów i przestrzeni. Algorytmy SfM wykorzystywane w OpenSfM działają na kilku kluczowych etapach:

Algorytmy detekcji punktów charakterystycznych, takie jak SIFT lub SURF, identyfikują unikalne cechy na poszczególnych klatkach obrazu. Te punkty są później wykorzystywane do określania ruchu kamery.

Algorytmy śledzenia ruchu punktów monitorują przemieszczanie się cech między kolejnymi klatkami, co pozwala na zrozumienie dynamiki sceny.

Triangulacja jest procesem, w którym algorytmy wyznaczają trójwymiarowe współrzędne punktów na podstawie informacji o ich pozycji na dwóch lub więcej obrazach.

Algorytmy optymalizacyjne, takie jak Levenberg-Marquardt, dostosowują parametry kamery, pozycje punktów 3D oraz relacje między nimi, minimalizując różnice między obliczonymi a rzeczywistymi danymi.

Struktura z ruchu (SfM) obejmuje cały proces analizy sekwencji obrazów, detekcji punktów, triangulacji i optymalizacji. Jest to podejście umożliwiające uzyskanie trójwymiarowej rekonstrukcji sceny na podstawie ruchu kamery i punktów charakterystycznych.

OpenSfM obsługuje zróżnicowane formaty danych obrazowych, co czyni go elastycznym w kontekście różnych źródeł danych i zastosowań.

2 Charakterystyka drona DJI Mini 2

DJI Mini 2 to dron produkowany przez chińskiego producenta DJI, który wyróżnia się przede wszystkim kompaktową konstrukcją i niską masą, wynoszącą jedynie 246 gramów. Jego niewielki rozmiar sprawia, że nie podlega wielu restrykcjom związanych z przepisami dotyczącymi rejestracji i uprawnień pilota drona w niektórych jurysdykcjach.

Dron ten wyposażony jest w kamerę o rozdzielczości 4K, co umożliwia nagrywanie wysokiej jakości materiałów wideo. Dodatkowo, może również fotografować obrazy o rozdzielczości 12 megapikseli. DJI Mini 2 posiada zaawansowane funkcje lotu, takie jak tryb Return to Home, który umożliwia dronowi automatyczne powrót do punktu startowego, oraz różne tryby lotu, dostosowujące się do preferencji użytkownika.

Dron jest sterowany za pomocą dedykowanego kontrolera, który zapewnia stabilne połączenie radiowe. Ponadto, DJI Mini 2 posiada systemy bezpieczeństwa, takie jak czujniki przeszkód, które wspomagają unikanie kolizji podczas lotu. To narzędzie jest popularne zarówno wśród entuzjastów lotów dronem, jak i profesjonalistów, dzięki swojej przenośnej formie, łatwości obsługi i zdolności do nagrywania wysokiej jakości materiałów wideo w trakcie lotów.

Jednorazowo dron pozwala na około 30 minutową sesję zdjęciową, co w praktyce umożliwiało wykonanie zdjęć całego budynku bez konieczności wymiany baterii.

2.1 Specyfikacja drona

Tabela 2.1: Specyfikacja drona DJI Mini 2

Rozdzielczość filmów	4K, Full HD
Przewidywany czas lotu	31 min
Zasięg	6000m
Masa	246g

Tabela 2.2: Specyfikacja kamery

Matryca	1/2.3" CMOS Efektywne piksele: 12 MP
Obiektyw	FOV: 83° Odpowiednik formatu 35mm: 24 mm Przysłona: f/2.8
Maksymalny rozmiar zdjęć	4:3: 4000×3000 16:9: 4000×2250

3 Wykonywanie zdjęć

3.1 Obiekty, których zdjęcia wykonano

Do wykonania zdjęć na potrzeby projektu należało wybrać budynki, nad którymi przede wszystkim można poruszać się dronem oraz takie, wokół których nie ma nadmiernej ilości obiektów postronnych. Po próbach robienia zdjęć kilku różnych budynków należących do Politechniki Gdańskiej i nie tylko ostatecznie zdecydowano się na dwa poniżej opisane.

3.1.1 Pawilon obok Wydziału Mechanicznego



Rysunek 3.1: Pawilon obok Wydziału Mechanicznego



Rysunek 3.2: Pawilon obok Wydziału Mechanicznego

3.1.2 Budynek na ulicy Świętokrzyskiej

Budynek na ulicy Świętokrzyskiej został wybrany ze względu na ogólną łatwość wykonywania zdjęć i dostępność. Podczas latania dronem ważne było, aby na jego drodze nie było żadnych obiektów, które mogłyby wejść z nim w kolizję, czy też przysłonić fotografowany budynek.



Rysunek 3.3: Budynek na ulicy Świętokrzyskiej



Rysunek 3.4: Budynek na ulicy Świętokrzyskiej

Dla każdego budynku wykonano ponad 200 zdjęć zrobionych w rozdzielczości $3 \times 4 \text{ kpx}$.

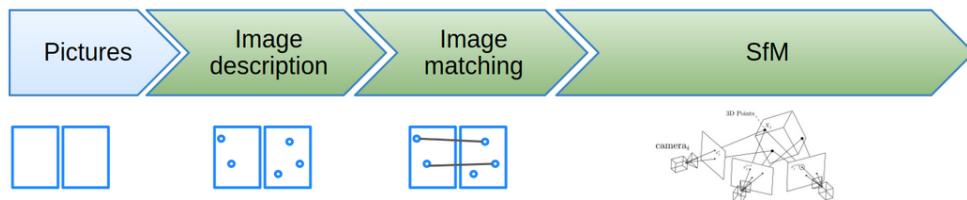
4 Działanie programu

4.1 Tworzenie chmury punktów i mesha

Głavnym celem programu jest to, aby użytkownik był w stanie wygenerować obiekt 3D w postaci chmury punktów oraz siatki trójkątów. Operacja jest wykonywana na podstawie wielu zdjęć budynku, wykonanych za pomocą drona lotniczego.

Oprogramowanie umożliwia tworzenie obiektów 3D budynku z otoczeniem bez tekstury z wielu jego zdjęć lotniczych (na różnych wysokościach). Program pozwala użytkownikowi na wygenerowanie modelu bez znajomości algorytmu. Obrazy, które zostaną wykorzystane w operacji, nie powinny wymagać wstępnej obróbki. Ponadto, udostępniono użytkownikowi instrukcję zawierającą wskazówki dotyczące robienia poprawnych zdjęć. Zaimplementowany graficzny interfejs użytkownika umożliwia ładowanie obrazów, otwieranie pliku z obiektem 3D. Zawarto również przykładowe zdjęcia i wizualizacje budynku.

Proces powstawania obiektu 3D przy pomocy OpenMVG można przedstawić za pomocą następującego pipeline.



Rysunek 4.1: Pipeline

4.1.1 Tworzenie chmury punktów

Tworzenie chmury punktów odbywa się w następujący sposób:

1. Użytkownik wskazuje ścieżkę do danych wejściowych i wyjściowych oraz inne parametry konfiguracyjne, takie jak wymienione poniżej:
 - (a) Maksymalna rozdzielcość;
 - (b) Ustawienie obszaru działania;
 - (c) Ustawienie stopnia szczegółowości informacji;
 - (d) Usunięcie mapy głębi po połączeniu;
 - (e) Ustawienie współczynnika redukcji siatki;
 - (f) Liczba iteracji do wygładzenia powierzchni;
 - (g) Minimalny odstęp pomiędzy dwoma punktami 3D;
 - (h) Format eksportu danych;
2. Parsowanie argumentów;
3. Sprawdzenie czy ścieżki wejściowe i wyjściowe są poprawne;
4. Wybór formatu obj albo ply;
5. Sprawdzanie i usuwanie poprzednich wyników przetwarzania;
6. Jeśli nie ma, utworzenie folderu wyjściowego;
7. Operacje OpenMVG, wygenerowanie danych na podstawie zdjęć;
8. Konwersja danych z OpenMVG do formatu używanego w OpenMVS;
9. Zwiększenie zagęszczenia punktów w chmurze punktów;
10. Rekonstrukcja siatki na podstawie chmury punktów;

11. Zapisanie siatki do pliku we wskazanym formacie;

Ważne jest to, że zdjęcia biorące udział w operacji nie powinny wymagać wstępnej obróbki, tak aby użytkownik nie musiał ich specjalnie zmieniać.

4.1.2 Tworzenie mapy głębi i siatki

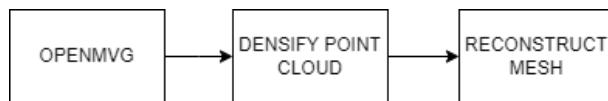
OpenMVS używa techniki Multi-View Stereo (MVS) do generowania map głębi i siatki trójwymiarowej. Algorytmy biblioteki analizują zbiór zdjęć z różnych perspektyw, wykorzystując je do estymacji głębokości poszczególnych punktów na scenie. Proces ten obejmuje również ocenę jakości map głębi, ich ewentualną optymalizację oraz filtrowanie w celu eliminacji punktów o niepewnej głębokości.

Następnie, na podstawie uzyskanych map głębi, OpenMVS przystępuje do generowania trójwymiarowej siatki. Punkty w przestrzeni są triangulowane, a trójkąty tworzą strukturę trójwymiarowego modelu. Proces ten może również obejmować optymalizację siatki w celu poprawy jej jakości oraz dodatkowe filtrowanie, eliminujące niepożądane detale.

Finalny rezultat to trójwymiarowa reprezentacja sceny w postaci siatki, gotowa do zapisu w formie pliku, który może być używany do wizualizacji, analizy lub dalszej obróbki. Warto podkreślić, że konkretna implementacja i algorytmy używane przez OpenMVS mogą być dostosowywane w zależności od wersji biblioteki oraz potrzeb użytkownika.

4.2 Program

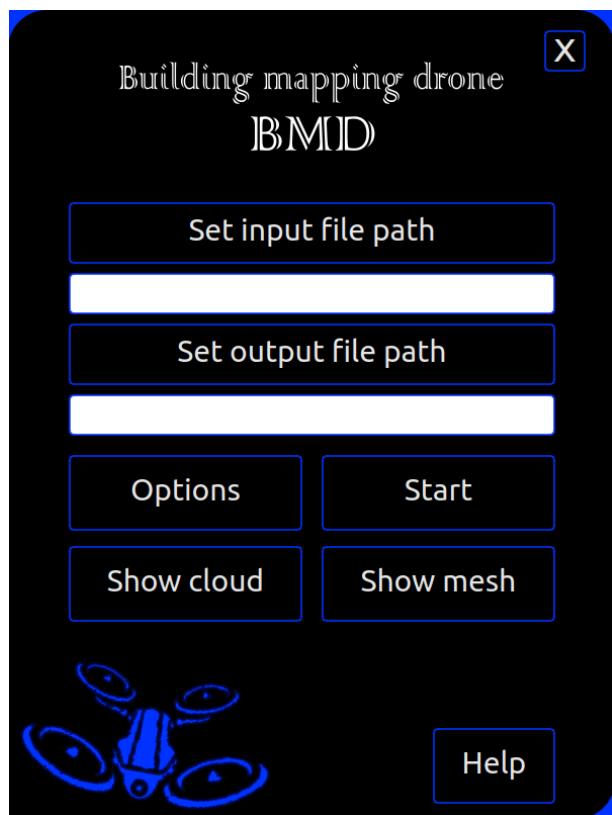
Zasada programu została przedstawiona na rysunku poniżej.



Rysunek 4.2: Schemat blokowy działania programu

Najpierw SFM ma za zadanie utworzenia punktów 3D na podstawie zdjęć. Na tym etapie używa się punkty 3D oraz informacje o trajektorii lotu i położeniu drona. Potem następuje zwiększenie gęstości chmury punktów. Skutkuje to zwiększeniem szczegółowości i dokładności. Na sam koniec utworzenie modelu obiektu 3D na podstawie gęstej chmury punktów uzyskanych w poprzednim kroku. Dzięki temu uzyskuje się model gotowy do wizualizacji.

Po uruchomieniu programu, użytkownik otrzymuje GUI, które zostało pokazane na rysunku poniżej. Istnieje możliwość wyboru jednej z czterech opcji: **Options**, **Start**, **Show Cloud**, **Show mesh**. Po wybraniu jednej z opcji istnieje możliwość powrotu do głównego menu.



Rysunek 4.3: Działające GUI.

Options - umożliwia modyfikację programu według preferencji użytkownika.

Start - rozpoczyna proces.

Show cloud - po wcisnięciu przycisku użytkownikowi wyświetla się chmura punktów.

Show mesh - po wcisnięciu przycisku użytkownikowi wyświetla się mesh.

Użytkownik ma możliwość wybrania ścieżki do pliku wejściowego i pliku wyjściowego.

Ponadto w zakładce options istnieje możliwość wybrania kilku opcji, takich jak:

- Chmura punktów
 - maksymalna rozdzielczość
 - szacowanie obszaru zainteresowania
 - szczegółowość
 - usunięcie mapy głębi
- Mesh
 - poddawanie operacji punktów tylko wewnątrz wyznaczonego obszaru
 - współczynnik decymacji
 - poziom wygładzenia
 - minimalna odległość punktów
 - wybór rozszerzenia eksportu

5 Podsumowanie

Wszystkie założenia projektowe zostały spełnione w zadowalającym stopniu. Ważną częścią projektu było zebranie odpowiedniej ilości zdjęć, na której byliśmy w stanie wykonywać operacje w późniejszym etapie. Każdy budynek został sfotografowany przez zespół i składa się z ponad 200 zdjęć.

Proces gromadzenia danych rozpoczynał się od wykonania fotografii przy użyciu drona DJI Mini 2. Posiadając odpowiednią liczbę zdjęć, korzystano z biblioteki OpenMVG do generowania chmury punktów. Biblioteka ta umożliwiała odtworzenie trójwymiarowej struktury obiektów na podstawie zdjęć, co stanowiło kluczowy etap procesu.

Następnie, przy wykorzystaniu biblioteki OpenMVS, generowane były mapy głębi. Dzięki tym mapom możliwe było zagęszczenie chmury punktów, co przyczyniało się do stworzenia bardziej szczegółowej reprezentacji trójwymiarowej sceny. Ostatecznie, na podstawie tych danych, generowany był trójwymiarowy model (mesh).

Dodatkowo, dla ułatwienia korzystania z programu, stworzony został interfejs użytkownika. Użytkownik mógł uzyskać trójwymiarowy obiekt bez konieczności wcześniejszej obróbki zdjęć. To narzędzie interaktywne stanowiło dodatkową wartość projektu, ułatwiając użytkownikowi korzystanie z rezultatów procesu rekonstrukcji trójwymiarowej sceny.

6 Dalsze możliwości

W kontekście dalszego rozwoju projektu istnieje kilka głównych kierunków, z których jeden z naciskiem może być położony na przyspieszenie działania programu. Jednym z potencjalnych podejść do tego celu jest wykorzystanie mocy obliczeniowej karty graficznej (GPU). Przeniesienie obliczeń na GPU może znaczco zwiększyć wydajność algorytmów związanych z przetwarzaniem obrazów i analizą trójwymiarową.

Inną opcją wartą rozważenia jest próba implementacji własnych algorytmów dla kluczowych etapów programu. Zamiast polegania na standardowych bibliotekach, takich jak OpenMVG i OpenMVS, można rozważyć opracowanie dedykowanych rozwiązań dostosowanych do konkretnych wymagań projektu. Implementacja własnych algorytmów może umożliwić optymalizację pod kątem specyfiki zbioru danych, co może prowadzić do bardziej efektywnego procesu generowania chmury punktów, mapy głębi i siatki trójwymiarowej.

Oczywiście, każde z tych podejść wiąże się z pewnymi wyzwaniami. Przeniesienie obliczeń na GPU wymagałoby dostosowania kodu do technologii CUDA lub OpenCL. Implementacja własnych algorytmów wymagałaby zaawansowanej wiedzy z dziedziny przetwarzania obrazów i grafiki komputerowej, ale jednocześnie pozwalałaby na większą kontrolę nad procesem i dostosowanie do konkretnych potrzeb projektu.

Warto również rozważyć stosowanie technik optymalizacyjnych, takich jak profilowanie kodu, identyfikacja bottlenecków oraz implementacja równoległych i asynchronicznych operacji w celu efektywnego wykorzystania zasobów sprzętowych.

Bibliografia

- [1] OpenDroneMap, *OpenDroneMap*, OpenDroneMap Community, <https://github.com/OpenDroneMap/OpenDroneMap>, Dostępne online; 11_12_2023.
- [2] DroneDeploy, *DroneDeploy*, DroneDeploy Inc., Dostępne online; 10_12_2023, <https://www.dronedeploy.com/>.
- [3] OpenSfM, *OpenSfM*, OpenSfM Contributors, Dostępne online; 10_10_2023, <https://github.com/mapillary/OpenSfM>.
- [4] DJI Mini 2, *DJI Mini 2*, DJI Technology Co. Ltd., <https://www.dji.com/pl/mini-2>.
- [5] Pierre Moulon, Pascal Monasse, Romuald Perrot, Renaud Marlet, *OpenMVG: Open multiple view geometry*, International Workshop on Reproducible Research in Pattern Recognition, pp. 60–74, 2016, Springer <https://openmvg.readthedocs.io/en/latest/>
- [6] Dan Cernea, *OpenMVS: Multi-View Stereo Reconstruction Library*, 2020, <https://cdccseacave.github.io/openMVS>
- [7] R. Adhikary and K. Parikh, "Drone Mapping versus Terrestrial Laser Scanning for Building Mapping and Assessment," *J. Remote Sens. GIS*, vol. 10, pp. 1-4, 2021.
- [8] Zakiyyatuddin, Azka, Maria Evita, Wahyu Srigutomo, Irwan Meilano, Mitra Djamar. "Geospatial Survey Analysis for 3D Field and Building Mapping using DJI Drone and Intelligent Flight Battery." *Journal of Physics: Conference Series* 1772.1 (2021): 012015. IOP Publishing.
- [9] Daftry, Shreyansh, Christof Hoppe, Horst Bischof. "Building with drones: Accurate 3D facade reconstruction using MAVs." *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2015): 3487–3494. IEEE.
- [10] C. Chen, Y.-H. Kuo, T. Lee, C.-H. Lee, and W. Hsu, *Drone-view building identification by cross-view visual learning and relative spatial estimation*, in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pp. 1477–1485, 2018.