

POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ AUTOMATYKI, ROBOTYKI
I ELEKTROTECHNIKI



Rozprawa doktorska

Rozwój metod śledzenia markerów pasywnych dedykowanych dla lekkich jednostek latających z wykorzystaniem optycznych systemów przechwytywania ruchu

mgr inż. Marek Retinger

Promotor: dr hab. inż. Paweł Drapikowski, prof. PP

Poznań 2024

Chciałbym serdecznie podziękować Promotorowi, **Panu dr. hab. inż. Pawłowi Drapikowskiemu prof. PP**, za motywację oraz wsparcie w przygotowaniu niniejszej rozprawy.

Dziękuję również Kolegom z Instytutu, **Jackowi Michalskiemu** i **Piotrowi Koziarskiemu**, za wspólną pracę.

Pracę dedykuję **moim Rodzicom** oraz mojej przyszłej żonie, **Oldze**.

Streszczenie

Rosnące zainteresowanie lekkimi jednostkami latającymi stawia przed badaczami kolejne, nieznane dotychczas wyzwania i otwiera nowe kierunki badań. Wraz z postępującym procesem miniaturyzacji dronów, pojawiło się pytanie, w jaki sposób skutecznie zbierać dane o pozycjonowaniu tego typu jednostek w warunkach laboratoryjnych, aby pomiar przy użyciu systemu referencyjnego był dokładny i pozwolił na rzetelną analizę zachowań tych jednostek, a dalej na ich rozwój. W dobie robotów jeżdżących, kroczących, dużych jednostek latających, czy manipulatorów, narzut masy zastosowanych znaczników, niezbędnych dla systemu przechwytywania ruchu, był praktycznie niedostrzegalny. Sytuacja zmieniła się, gdy na rynku pojawiły się konstrukcje o masie kilkudziesięciu gramów, których nośność ograniczona była do zaledwie kilkunastu gramów. Te kilka dodatkowych gramów w postaci znaczników, ich asymetryczny układ oraz ich kształt zmieniający bryłę i aerodynamikę obiektu, mogą wpływać na jego zachowanie.

Tematyka niniejszej rozprawy dotyczy optycznych systemów przechwytywania ruchu i ich dostosowania do kontroli lotu lekkich jednostek latających. Istotą pracy jest poznanie czynników warunkujących widoczność markerów pasywnych w systemach działających w paśmie podczerwonym światła oraz zaproponowanie rozwiązań, które mogą wspomóc badaczy, zarówno w ujęciu technik materiałowych jak i doboru ustawień kamer. Praca w sposób kompleksowy przedstawia problematykę systemów przechwytywania ruchu, tak aby czytelnik bez szczegółowej analizy zaproponowanych rozwiązań, mógł skorzystać z uzyskanych wyników w swoich pracach badawczych. Rozprawa zawiera charakterystykę najpopularniejszych typów systemów przechwytywania ruchu dostępnych na rynku oraz szczegółowo omawia zagadnienia związane z optycznymi systemami przechwytywania ruchu. Przybliży elementy składowe systemu, takie jak kamera, stacja robocza oraz markery, a także prezentuje uproszczony model jego działania. W kontekście lepszego zrozumienia budowy markerów pasywnych, praca obejmuje zagadnienia związane z materiałami retrorefleksyjnymi, które to materiały stanowią podstawę do budowy znaczników. Wprowadza także czytelnika do obszaru badawczego, w którym porusza się autor, poprzez przegląd aktualnego stanu wiedzy oraz klasyfikację kierunków rozwoju optycznych systemów przechwytywania ruchu. Uwypuklone zostały te, wymagające dodatkowej eksploracji.

Praca badawcza obejmowała zarówno uzupełnianie braków w literaturze, jak i rozszerzanie aktualnego stanu wiedzy. Zaproponowane zostały wskaźniki jakości, które to pozwalają na ocenę widoczności obiektu i markerów tworzących obiekt oraz prosty mechanizm wykrywania fałszywych znaczników. Przeanalizowano wpływ czynników środowiskowych na proces śledzenia oraz przeprowadzono prace mające na celu określenie wpływu temperatury kamer na widoczność markerów oraz dokładność ich pozycjonowania. Zbadano zależność widoczności znaczników od ustawień czasu ekspozycji

Rozwój metod śledzenia markerów pasywnych dedykowanych dla lekkich jednostek latających z wykorzystaniem optycznych systemów przechwytywania ruchu

oraz progu detekcji, dla różnych częstotliwości rejestracji obrazu. W oparciu o zebrane wyniki, zaproponowano algorytmy pozwalające na automatyzację tego procesu. Rozszerzono również aktualny stan wiedzy w zakresie materiałów retro refleksyjnych w ujęciu ich użycia w systemach optycznego przechwytywania ruchu. Przetestowano dziesiątki materiałów, sprawdzając generowaną przez nie poświatę, ich widoczność kątową oraz możliwość ich wykorzystania do budowy znaczników płaskich i sferycznych. Każdy aspekt badań został zweryfikowany empirycznie w oparciu o dostępne systemy przechwytywania ruchu (łącznie trzy zestawy), trzy lekkie jednostki latające oraz jeden manipulator. Wśród jednostek latających pojawiła się także jedna jednostka inspirowana naturą (skrzydlata) o odmiennym charakterystyce lotu, co pozwoliło wykazać, że i w przypadku tego typu konstrukcji masa znaczników ma znaczący wpływ na lot.

Przedstawione w pracy wyniki jednoznacznie wskazują na możliwość dostosowania optycznych systemów przechwytywania ruchu pod kątem śledzenia lekkich jednostek latających, bez specjalistycznej wiedzy, przy niewielkim nakładzie czasu oraz niewielkim lub zerowym koszcie. Wykazano, że możliwe jest użycie markerów płaskich jako lekkiej alternatywy dla znaczników sferycznych, znacznie cięższych i wystających poza obrys jednostki latającej. W większości testowanych scenariuszy nie mają one negatywnego wpływu na widoczność jednostki, a ich dobra widoczność kątowa nie pogarsza dokładności pozycjonowania obiektu. Stwarza to nowe możliwości w ujęciu efektywnego pozycjonowania także jednostek o większej nośności, których aerodynamika może zostać zaburzona przez elementy wystające poza bryłę robota. Takimi jednostkami są na przykład lekkie sterowce.

Słowa kluczowe: *optyczne systemy przechwytywania ruchu, lekkie jednostki latające, markery pasywne, materiały retro refleksyjne, dobór ustawień kamer*

Abstract

Growing popularity of lightweight flying units is a challenge for researchers. This field gives an opportunity to explore new areas of research. With improving miniaturization process of the drones, the question has arisen – how to effectively gather the data related to this type of units in indoor environment, in a way that the measurements of the referencing system will be accurate and will allow to reliably analyze the behavior of the units. In the era of wheeled robots, walking robots, large flying robots or manipulators, the overhead of motion capture systems in the case of the marker mass was insignificant. The situation has changed with the arrival of small constructions on the market with masses in tens of grams. In their case, the additional several grams related to the markers, their asymmetrical placement and their shape, could have an impact on the behavior of the units. What is more, the shape could also affect the units aerodynamic.

The topic of the dissertation is related to the optical motion capture systems and their adjustability in the case of lightweight flying units. The important part of the work is to find and identify the factors that affect the visibility of the passive markers in the systems working in the infrared light spectrum. The work proposes a solution that can support the researcher both in material techniques and adjusting camera settings. The work is a comprehensive compendium of knowledge, that allows the research context, area and results to be understood by ordinary readers. The document contains characteristics of the most common types of motion capture systems and discusses in detail how the optical system exactly works. The essential elements of the system such as camera, workstation and markers are described. For a better understanding of how the passive markers are built, the topic related to the retro reflective materials is addressed. The reader is also introduced to the current state of the art. The description of the state is based on a summary of some important articles and by introducing a classification of research directions in optical motion capture systems. The most important directions are highlighted.

The research work fills the gaps in the literature and extends the current state of the art. The author has proposed quality indexes. The indexes allow to evaluate the visibility of the object and the markers used to construct the object, as well as simple false marker detection mechanism. The environmental factors that could affect the tracking quality have been analyzed. The effect of the camera temperature on the visibility of the markers and their positioning accuracy has been studied. The research includes an analysis of the dependency of marker visibility in the case of camera exposure time and threshold for different frame rates. On the basis of results obtained, the algorithms that allow automatic adjustment of the settings have been proposed. The current the state of the art has also been extended by the research in the field of retro reflective materials in the case of their usability in the optical

motion capture system. The tests included tens of materials and were related to the overflow produced by the materials and their angular visibility. They also include possibility of making flat and spherical markers. Each aspect of the research was empirically verified on three different sets of motion capture systems, three flying units and a one manipulator. Among the units, one of them was a bioinspired flying unit (winged) with different flight capabilities, which allowed to identify the impact of passive marker's mass on the construction such as that.

The results presented in the dissertation confirm that it is possible to adjust the optical motion capture systems in the case of lightweight flying units. The process not require specialist knowledge and can be done in a short time at little or no cost. It has been shown that it is possible to use flat markers as a lightweight alternative to spherical markers, which are much heavier and can protrude beyond the outline of the units. In most testing scenarios, they have no negative effect on object visibility. Furthermore, their good angular visibility does not negatively affect positioning accuracy. This allows them to be used on larger flying units where the aerodynamic may be disturbed by spherical markers. These units are lightweight aerostats.

Keywords: *optical motion capture systems, lightweight flying units, passive markers, retroreflective materials, camera adjustment*

Title: *Development of passive marker tracking methods dedicated to lightweight flying units in optical motion capture systems*

Spis treści

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Wstęp | 11 |
| 1.1 | Problematyka badawcza. Geneza prac i znaczenie problematyki . . . | 12 |
| 1.2 | Hipoteza i cel pracy | 14 |
| 1.3 | Definicje podstawowych pojęć i zestawienie akronimów użytych w pracy | 14 |
| 1.4 | Przegląd zawartości rozprawy | 17 |
| 2 | Charakterystyka systemów przechwytywania ruchu i aktualny stan wiedzy | 19 |
| 2.1 | Klasyfikacja podstawowych systemów pozycjonowania obiektów . . . | 20 |
| 2.2 | Optyczne systemy przechwytywania ruchu | 24 |
| 2.2.1 | Budowa | 25 |
| 2.2.2 | Zasada działania | 27 |
| 2.3 | Materiały retrorefleksyjne | 30 |
| 2.4 | Aktualny stan wiedzy | 32 |
| 2.5 | Podsumowanie | 37 |
| 3 | Charakterystyka prac badawczych | 41 |
| 3.1 | Wskaźniki jakości | 41 |
| 3.2 | Mechanizm wykrywania fałszywych znaczników | 42 |
| 3.3 | Składowe środowiskowe, temperatura kamer | 44 |
| 3.3.1 | Widoczność markerów a temperatura kamer | 45 |
| 3.3.2 | Pozycjonowanie bryły sztywnej | 48 |
| 3.4 | Konfiguracja kamer | 51 |
| 3.4.1 | Algorytm wyznaczania wartości ekspozycji bliskiej minimum . | 52 |
| 3.4.2 | Algorytm wyznaczania wartości progu detekcji bliskiej minimum | 54 |
| 3.4.3 | Ekspozycja i proces śledzenia | 56 |
| 3.4.4 | Uwagi ogólne | 58 |
| 3.5 | Techniki materiałowe | 58 |
| 3.5.1 | Zestawienie wybranych materiałów | 59 |
| 3.5.2 | Analiza użyteczności materiałów | 62 |
| 3.6 | Podsumowanie | 66 |
| 4 | Wyniki eksperymentów | 69 |
| 4.1 | Platformy walidacyjne | 69 |
| 4.1.1 | Bitcraze Crazyflie 2.1 | 70 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.1.2 | DJI Tello EDU | 71 |
| 4.1.3 | Flapper Nimble+ EDU | 72 |
| 4.1.4 | Kuka KR200/2 | 73 |
| 4.2 | Warunki i scenariusze eksperymentów | 75 |
| 4.2.1 | Warunki eksperymentów | 75 |
| 4.2.2 | Scenariusze eksperymentów | 79 |
| 4.3 | Walidacja i analiza zebranych danych | 83 |
| 4.3.1 | Widoczność markerów | 83 |
| 4.3.2 | Czas trwania lotu | 93 |
| 4.3.3 | Odtwarzalność trajektorii | 94 |
| 4.4 | Podsumowanie | 96 |
| 5 | Podsumowanie | 99 |
| 5.1 | Ocena stopnia realizacji przyjętych celów | 101 |
| 5.2 | Oryginalność prac oraz wkład w rozwój nauki i oprogramowania . . . | 102 |
| 5.3 | Możliwe kierunki rozwoju | 103 |
| A | Model komunikacyjny | 105 |
| B | Rozszerzona tabela wyników | 107 |
| C | Wykaz dorobku naukowego | 109 |
| | Spis tabel | 110 |
| | Spis rysunków | 113 |
| | Bibliografia | 117 |

ROZDZIAŁ 1

Wstęp

Optyczne systemy przechwytywania ruchu — Optical MoCap (ang. *motion capture*) — stanowią obecnie kluczowy i niezbędny element wyposażenia nowoczesnego laboratorium robotycznego [44]. Są one wykorzystywane przede wszystkim do dokładnego pozycjonowania obiektów, występując w roli zewnętrznego obserwatora, zapewniając tym samym pewność pomiaru (ang. *ground truth*). Aby system mógł spełnić swoją rolę musi składać się z co najmniej dwóch kamer, stacji bazowej, na której odbywa się rekonstrukcja sceny oraz trzech specjalnych znaczników (markerów), zwykle pasywnych [37, 85]. Na widoczność obiektu oraz dokładność śledzenia wpływ ma szereg czynników takich jak: usytuowanie kamer, kalibracja systemu, zadane parametry kamer, sposób definicji bryły oraz użyte znaczniki. Istotnymi czynnikami pracy systemu są widoczność oraz kolistość¹ markerów i to od tych czynników głównie zależy dokładność śledzenia obiektów. Oba te czynniki w znacznym stopniu odnoszą się do rozmiaru znacznika, użytego materiału oraz techniki jego wykonania [13, 37, 58]. Część zespołów badawczych korzysta z optycznych systemów przechwytywania ruchu jak ze swojego rodzaju czarnej skrzynki [4, 24, 93]. System jest montowany w przestrzeni laboratoryjnej, jest kalibrowany i wykorzystywany wraz z dostarczonym zestawem standardowych znaczników. Rzadziej domyślne parametry systemu są zmieniane i dostosowywane pod kątem danego, indywidualnego eksperymentu oraz konkretnego obiektu w nim uczestniczącego. Gdy badania są prowadzone na obiektach o dużej nośności lub na które siła bezwładności ma niewielki wpływ, takie podejście wydaje się być wystarczające [20, 59, 76].

Od kilku lat obserwuje się wzrost zainteresowania bezzałogowymi pojazdami latającymi — UAV (ang. *Unmanned Aerial Vehicle*) — w szczególności w kontekście ich miniaturyzacji oraz jednostek inspirowanych naturą (ang. *bioinspired*) [7, 28, 83]. Ten trend skutkuje nowymi wyzwaniami związanymi z możliwością prowadzenia badań z użyciem systemów MoCap i walidacji wyników w warunkach laboratoryjnych. Mniejsze i zarazem lżejsze jednostki latające, charakteryzują się ograniczoną nośnością i zwykle ograniczonym czasem lotu [43, 79]. W niektórych przypadkach ich nośność jest limitowana do kilkunastu lub kilkudziesięciu gramów. Istotnym problemem

¹Zwykle stosuje się pasywne markery sferyczne, które po rzutowaniu na płaszczyznę dwuwymiarową stają się kołami.

naukowym jest sterowanie takimi obiektami i odtwarzanie zadanej trajektorii [56, 66]. Dokładne pozycjonowanie obiektu i uzyskanie wiarygodnych wyników pomiarowych może okazać się utrudnione, gdyż zastosowanie standardowych, dobrze widocznych znaczników może negatywnie wpłynąć na zachowanie jednostki poprzez zmianę jej wyważenia, a nawet dynamiki lotu, mając tym samym wpływ na moment jej bezwładności. Nie bez znaczenia jest też skrócenie czasu trwania lotu. Problem pojawia się także w przypadku śledzenia ruchu elementów elastycznych (jak na przykład skrzydła), gdzie użycie klasycznych sferycznych markerów jest bardzo skomplikowane [72, 96].

Kwestia dostosowania systemów przechwytywania ruchu do lekkich jednostek latających, w szczególności bez fizycznej ingerencji w sprzęt pomiarowy, pozostaje w dużej mierze otwartym problemem badawczo-technicznym. Dotychczas nie zostało publicznie przedstawione żadne opracowanie, prezentujące kompleksowe podejście do tego zagadnienia.

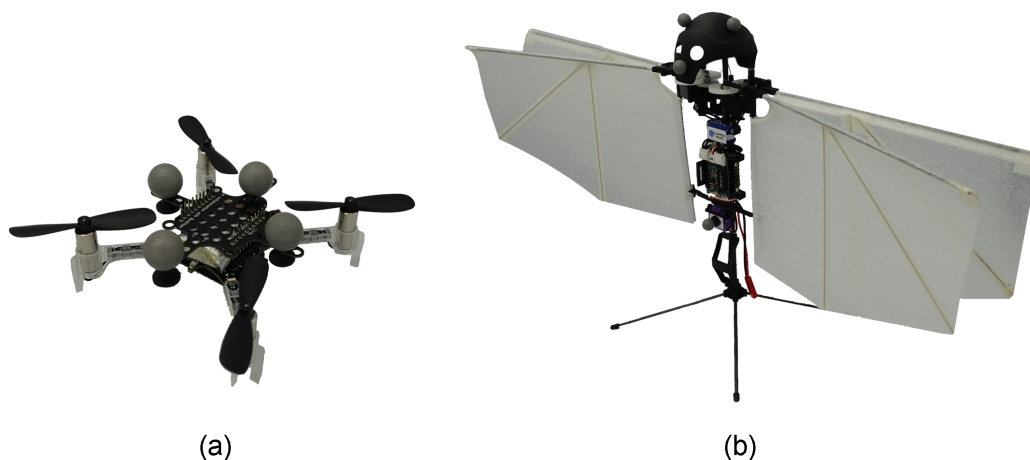
1.1 Problematyka badawcza. Geneza prac i znaczenie problematyki

Dynamiczny rozwój lekkich jednostek latających stawia nowe problemy badawcze. Są to przede wszystkim ograniczenia odnoszące się do ich nośności, wpływu znaczników na rozkład mas oraz czasu trwania lotu. Problemy te można opisać jako zasadnicze i potencjalnie wykluczające się aspekty:

- Ograniczenia nośności i rozmiarów jednostek klasy MAV (ang. *Micro Aerial Vehicle*) i niższych, wymuszają użycie mniejszych i lżejszych elementów peryferyjnych.
- Montaż elementów peryferyjnych negatywnie wpływa na jednostkę, skutkując skróceniem czasu trwania lotu oraz wpływając na dynamikę i stabilność jednostki.
- Systemy radiowego oraz wizualnego przechwytywania ruchu wymuszają użycie elementów peryferyjnych, celem zapewnienia wysokiej jakości śledzenia.

Wstępne prace badawcze, obejmujące zagadnienia związane z robotami latającymi, bardzo często skupiały się na walidacji algorytmów, pozwalających na sterowanie jednostką latającą oraz na weryfikacji poprawności odczytów z sensoryki pokładowej. Wraz ze stopniowym przechodzeniem na coraz to mniejsze konstrukcje [22, 23, 45] oraz konstrukcje inspirowane naturą (rys. 1.1), problem odpowiedniego doboru ustawień kamer oraz znaczników pasywnych zaczął być widoczny.

Lot dronem Bitcraze Crazyflie 2.1 [5] wraz z dodatkowymi peryferiami (tak zwanymi *deckami*) oraz zestawem markerów pasywnych zapewniających dobrą widoczność, bardzo często skutkowało problemami ze stabilizacją jednostki w powietrzu zaraz po jej starcie. Co więcej, niewielki rozmiar drona i konieczność asymetrycznego rozłożenia znaczników, powodowały niekiedy zjawisko dryfu w jednej z osi. Podobną



Rysunek 1.1: Wybrane jednostki latające, na których prowadzono dotychczasowe badania: (a) Bitcraze Crazyflie 2.1, (b) Flapper Nimble+. Skala jednostek nie została zachowana.

sytuację można było zaobserwować w przypadku innej jednostki — Flapper Nimble+ [15]. Tutaj, z uwagi na budowę odmienną od klasycznych dronów wirnikowych, lot robota był obciążony znaczącą zmiennością w ujęciu wysokości i trudnością przy próbie ustabilizowania jednostki w powietrzu w zadanym punkcie.

Szczegółowa analiza powyższych przypadków poskutkowała rozpoczęciem działań w ramach obszaru badawczego, którym są optyczne systemy przechwytywania ruchu. Za cel postawiono sobie minimalizację wpływu znaczników, jako niezbędnych elementów systemu przechwytywania ruchu, na jednostkę latającą możliwie jak najniższym kosztem, bez konieczności fizycznej ingerencji w system pomiarowy [67, 68, 69]. W przypadku lekkich jednostek latających, masa znaczników pasywnych stanowi znaczny procent nośności takiej jednostki, co może skutkować rozbieżnością między modelem matematycznym, a zachowaniem fizycznego robota i tym samym ograniczyć możliwości odwzorowania wyników symulacyjnych w warunkach rzeczywistych.

Przeprowadzone dotychczas studia literaturowe, badania i analizy wskazują na istotność niniejszej problematyki i konieczność przeprowadzenia szczegółowych badań. Dynamiczny postęp w dziedzinie miniaturyzacji oraz powszechny trend w dążeniu do niej [46, 83], wymusza zmiany w systemach peryferyjnych. Niezbędne jest zastosowanie systemu przechwytywania ruchu w pętli sterowania, który dla zapewnienia odpowiedniej szybkości estymacji położenia obiektu, wymaga znaczników. Oprócz kryterium czasu trwania lotu, istotny jest wpływ na jednostkę latającą w odniesieniu do stabilności jej lotu oraz charakterystyki samego lotu. Kluczowym jest dążenie do stworzenia takich warunków testowych, aby zarówno w przypadku użycia optycznego systemu przechwytywania ruchu jak i jego pominięcia, zachowanie jednostki latającej było niemalże identyczne. Jest to niezwykle istotne, jako że opracowanie algorytmów sterowania i ich walidacja z udziałem systemu MoCap na lekkich jednostkach latają-

cych, może dać inne charakterystyki lotu w przypadku demontażu markerów, niż wynikałoby to z uprzednio przeprowadzonych testów.

1.2 Hipoteza i cel pracy

Mając na uwadze nakreśloną problematykę użycia optycznych systemów przechwytywania ruchu z lekkimi robotami latającymi, sformułowane zostały następujące hipotezy:

- Rozwój metod automatycznego doboru ustawień kamer systemów motion capture pozwoli na zastosowanie mniejszych i lżejszych znaczników przy zachowaniu wysokiej jakości śledzenia.
- Zmiana technik materiałowych pozwoli na budowę znaczników o zredukowanej masie, minimalizując ich wpływ na jednostki latające klasy MAV i niższych.
- Ograniczenie wpływu znaczników na jednostkę latającą skutkuje wydłużeniem czasu trwania lotu oraz poprawi jego charakterystykę i otworzy nowe perspektywy badawcze.

Jednocześnie, dla niniejszej pracy nakreślone zostały następujące cele, których realizacja pozwoli na weryfikację postawionych hipotez i realny wkład w rozwój obszaru badawczego, o którym mowa:

- Zdefiniowanie wskaźników jakości pozwalających na ocenę jakości śledzenia obiektu oraz na porównanie charakterystyk widoczności różnych materiałów retro refleksyjnych.
- Zbadanie możliwości użycia materiałów retro refleksyjnych w kontekście budowy znaczników 2D oraz 3D przy zachowaniu masy nie wyższej niż w przypadku fabrycznych znaczników 3D, zapewniając czas śledzenia obiektu bliski 100%.
- Analiza porównawcza wpływu znaczników o zredukowanym rozmiarze i masie na odtwarzanie trajektorii oraz czas trwania lotu jednostek klasy MAV i niższych.
- Opracowanie algorytmu automatycznego doboru podstawowych, konfigurowalnych parametrów kamer, pod kątem polepszenia widoczności znaczników.

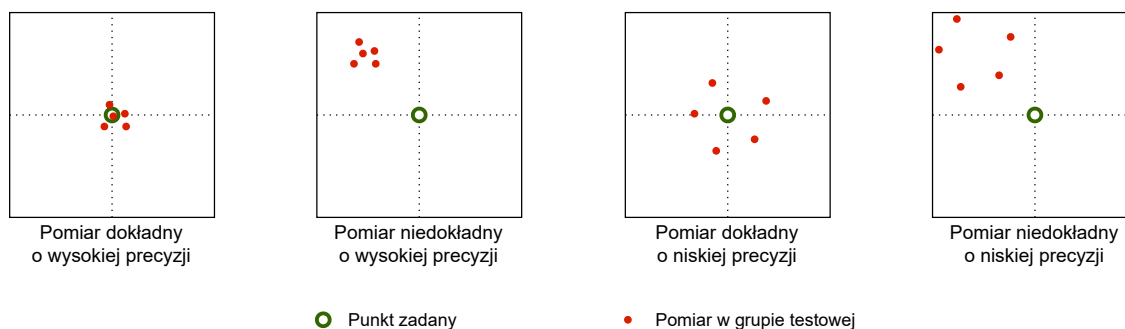
1.3 Definicje podstawowych pojęć i zestawienie akronimów użytych w pracy

Jednoznaczne zrozumienie problematyki badawczej oraz proponowanych rozwiązań, wymusza doprecyzowanie terminów używanych w ramach niniejszej rozprawy. Poniżej zawarte zostały definicje podstawowych pojęć, które mogą być rozumiane różnie, zależnie od obszaru badawczego, w którym porusza się czytelnik. Definicje

terminów zostały opracowane w oparciu o [17, 35, 37] oraz normy ISO 3534-2:2006 [33] i ISO 5725-1:2023 [34].

- Dokładność (ang. *accuracy*) – bliskość (zgodność) między wynikiem testu lub pomiaru, a wartością poprawną. W ujęciu systemów przechwytywania ruchu, dokładność jest rozumiana pod postacią pojęć „prawdziwość” oraz „precyzja”. Definicja ta jest rozbieżna z tą, stosowaną powszechnie w metrologii.
- Prawdziwość (ang. *trueness*) – bliskość (zgodność) między oczekiwanymi wynikami testu, a wartością referencyjną. Miarą prawdziwości jest odchylenie (ang. *bias*).
- Precyzja (ang. *precision*) – bliskość (zgodność) między niezależnymi wynikami testów lub pomiarów, uzyskana w określonych warunkach. Precyzja zależy od rozkładu błędu losowego i nie odnosi się do wartości poprawnej.
- Powtarzalność (ang. *repeatability*) – miara precyzji w warunkach, w których niezależne wyniki testów lub pomiarów są uzyskiwane:
 - tą samą metodą,
 - na identycznych elementach pomiarowych,
 - przy użyciu takiego samego urządzenia pomiarowego,
 - przez tego samego operatora,
 - na tym samym sprzęcie,
 - w krótkich odstępach czasu.
- Odtwarzalność (ang. *reproducibility*) – miara precyzji w warunkach, w których niezależne wyniki testów lub pomiarów są uzyskiwane:
 - tą samą metodą,
 - na identycznych elementach pomiarowych,
 - przy użyciu innego urządzenia pomiarowego,
 - przez innego operatora,
 - przy użyciu innego sprzętu.
- Znacznik, marker, marker pasywny – pojedynczy element pokryty materiałem retrorefleksyjnym. Może być trójwymiarowy (sferyczny) lub dwuwymiarowy (kolisty).
- Widoczność markera – współczynnik wykrywalności markera, determinowany przez takie parametry jak pole powierzchni znacznika oraz jego kolistość.
- Obiekt – grupa markerów tworzących pojedynczą bryłę sztywną (ang. *rigid body*).
- Lekka jednostka latająca – jednostka o nośności nieprzekraczającej 200 gramów, spełniająca kryteria klasy MAV lub niższej [8, 12, 30].

Dla lepszego zobrazowania różnic pomiędzy pojęciami dokładność i precyzja, sporządzona została grafika ilustrująca owe zależności (rys. 1.2). Zielone kółko oznacza punkt zadany (wartość poprawną), a czerwone kropki pomiary w danej grupie pomiarowej.



Rysunek 1.2: Graficzne porównanie pojęć dokładność i precyzja.

Ponadto załączono tabelę 1.1, agregującą najważniejsze akronimy użyte w ramach rozprawy.

Tabela 1.1: Zestawienie najważniejszych akronimów użytych w rozprawie.

| Akronim | Wyjaśnienie |
|---------|---------------------------------|
| ABS | Acrylonitrile Butadiene Styrene |
| AEC | Automatic Exposure Control |
| AGC | Automatic Gain Control |
| BF | Body Frame |
| CF | Camera Frame |
| DG | Diamond Grade |
| EF | Earth Frame |
| EG | Engineer Grade |
| EXP | Exposure |
| FPGA | Field-Programmable Gate Array |
| HIP | High Intensity Prismatic |
| IR | Infra Red |
| LED | Light-Emitting Diode |
| LiPo | Lithium Polymer |
| LSM | Least Squares Method |
| MAV | Micro Aerial Vehicle |
| MoCap | Motion Capture |
| NAV | Nano Aerial Vehicle |
| PLA | PolyLactic Acid |
| TCP | Tool Center Point |
| TH | Threshold |
| UAV | Unmanned Aerial Vehicle |
| UDP | User Datagram Protocol |
| UM | Unknown Manufacturer |

1.4 Przegląd zawartości rozprawy

Rozprawa podzielona została na pięć rozdziałów, wprowadzających do tematyki optycznych systemów przechwytywania ruchu oraz prezentujących poczynione prace badawcze.

W pierwszym rozdziale przedstawiono opis problematyki badawczej oraz jej znaczenie, a także nakreślono genezę prac. Sformułowane zostały ponadto hipotezy oraz cele niniejszej pracy. Aby zachować jednoznaczność i spójność pojęć, przedstawiono definicje najważniejszych spośród nich.

W drugim rozdziale skupiono się na charakterystyce systemów przechwytywania ruchu oraz prezentacji aktualnego stanu wiedzy w zakresie omawianej tematyki badawczej. Dokonano klasyfikacji podstawowych systemów pomiarowych wraz z ich krótkim omówieniem oraz skupiono się na rozleglejszej analizie optycznych systemów przechwytywania ruchu. Ponadto, zawarto informacje dotyczące materiałów retrorefleksyjnych, stanowiących bazę do budowy markerów pasywnych.

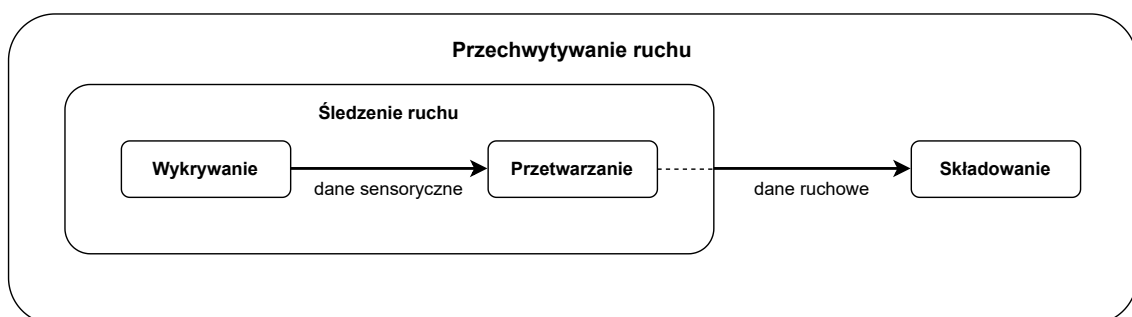
Trzeci rozdział obejmuje charakterystykę prowadzonych prac badawczych. Przedstawiono w nim autorskie wskaźniki jakości, pozwalające na ocenę śledzenia obiektu, mechanizmy wykrywania fałszywych znaczników oraz podjęto analizę wpływu składowych środowiskowych na proces śledzenia, skupiając się przede wszystkim na temperaturze kamer. Rozdział ten zawiera także szczegółowe opisy poczynionych badań w ujęciu konfiguracji kamer oraz technik materiałowych, odnoszących się do budowy markerów pasywnych.

Czwarty rozdział zawiera wyniki przeprowadzonych eksperymentów. Obejmuje on zarówno opisy platform walidacyjnych, scenariusze testów oraz warunki eksperymentów, co zapewnia ich odtwarzalność i porównywalność. Wyniki te w ogólności odnoszą się do widoczności markerów, czasu trwania lotu oraz jego charakterystyki.

W piątym rozdziale zawarte zostało podsumowanie pracy. Podjęto się oceny stopnia realizacji przyjętych celów, oceny oryginalności pracy oraz zaprezentowano możliwe kierunki rozwoju i aplikowalności proponowanych rozwiązań.

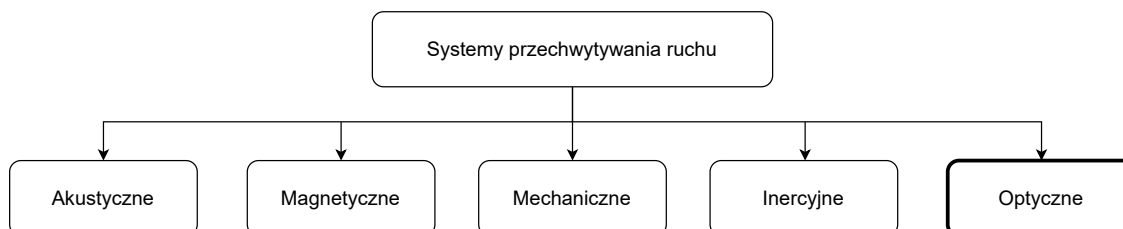
Charakterystyka systemów przechwytywania ruchu i aktualny stan wiedzy

Systemami przechwytywania ruchu nazywana jest grupa systemów pomiarowych, pozwalających na pozycjonowanie znacznika, obiektu lub obiektów, w ujęciu położenia lub położenia oraz orientacji (pozycji, ang. *pose*). Systemy te muszą zostać starannie dobrane do konkretnego zastosowania, do konkretnej aktywności, aby spełnić oczekiwania odbiorców oraz pozwolić na zebranie danych przy zachowaniu możliwie jak największej dokładności. W literaturze spotkać można rozróżnienie pomiędzy systemami śledzenia ruchu (ang. *Motion Tracking*) a przechwytywania ruchu (ang. *Motion Capture*) [54, 70]. Różnica w rozumieniu pojęć związana jest przede wszystkim ze składowaniem zebranych danych. W przypadku systemów śledzenia ruchu, wyróżnić można fazę wykrywania, podczas której to pozyskiwane są dane z otoczenia oraz fazę przetwarzania, w ramach której następuje wygenerowanie danych pozycjonujących. Systemy przechwytywania ruchu obejmują dodatkowo fazę składowania danych, co pozwala na przetwarzanie zebranych danych off-line. Graficzne ich porównanie zostało przedstawione na rysunku 2.1. Warto podkreślić, że w praktyce oba pojęcia są stosowane zamiennie [80, 88].



Rysunek 2.1: Graficzne porównanie faz składających się na śledzenie i przechwytywanie ruchu.

Na rynku dostępnych jest wiele typów systemów przechwytywania ruchu, przeznaczonych do różnych zastosowań i charakteryzujących się różnym poziomem dokładności. Systemy te można podzielić na pięć podstawowych grup (rys. 2.2). Są to systemy akustyczne, systemy magnetyczne, systemy mechaniczne, systemy inercyjne oraz systemy optyczne [3, 14, 54, 74, 87].



Rysunek 2.2: Podstawowa klasyfikacja systemów przechwytywania ruchu. Systemy optyczne zostały wyróżnione, jako najbardziej istotne z punktu widzenia niniejszej pracy.

Systemy te bardzo często używane są w różnych konfiguracjach (np. systemy akustyczne wraz z systemami inercyjnymi), aby poprawić dokładność śledzenia oraz skompensować słabości jednego systemu, drugim systemem. Najistotniejszym typem systemów z punktu widzenia niniejszej rozprawy, są optyczne systemy przechwytywania ruchu. Pozwalają one na pozycjonowanie obiektu z dokładnością submilimetrową i oferują relatywnie wysokie częstotliwości rejestracji oraz przetwarzania danych (nawet powyżej 1000 Hz). Pozwalają one na pracę w trzech trybach — z markerami pasywnymi, z markerami aktywnymi lub bez markerów. Z uwagi na ich istotność, poświęcono im osobny rozdział.

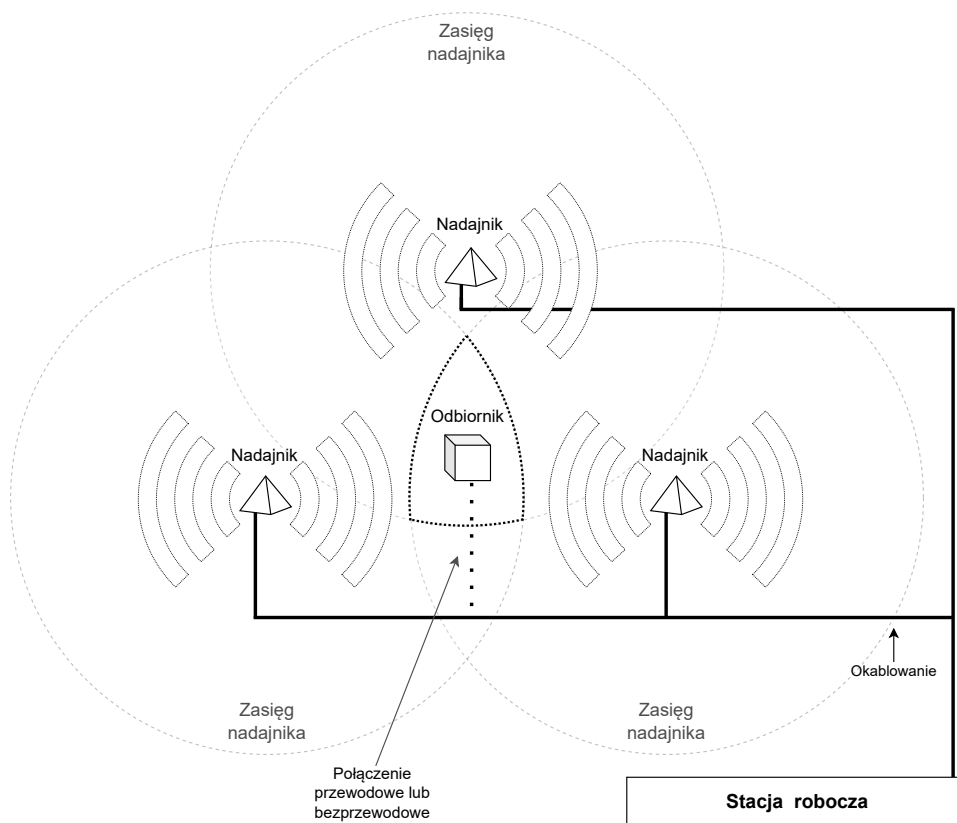
2.1 Klasyfikacja podstawowych systemów pozycjonowania obiektów

Systemy pomiarowe odgrywają istotną rolę w świecie robotyki. Pozwalają one nie tylko na pozycjonowanie obiektów w przestrzeni, ale także na sterowanie obiektami, czy na zbieranie danych służących do ich diagnostyki. Systemy te mogą zostać podzielone zgodnie z klasyfikacją przedstawioną na rysunku 2.2.

Systemy akustyczne [87, 92] działają w oparciu o czas trwania sygnału dźwiękowego oraz znaną prędkość dźwięku². W najprostrzej formie składają się z grupy nadajników, bardzo często ultradźwiękowych, oraz odbiornika. Liczba nadajników ma wpływ na możliwości pozycjonowania obiektu oraz na dokładność pomiaru — większa ich liczba zapewnia większą dokładność. Zasada działania opiera się na okresowym wysyłaniu sygnałów dźwiękowych przez nadajniki, które to w różnym czasie docierają do odbiornika. Odbiornik przekazuje te informacje dalej, do stacji roboczej, gdzie dane są przetwarzane. Różnica w czasie propagacji sygnału pozwala

²Prędkość dźwięku w powietrzu to około 343 m/s w temperaturze 20°C.

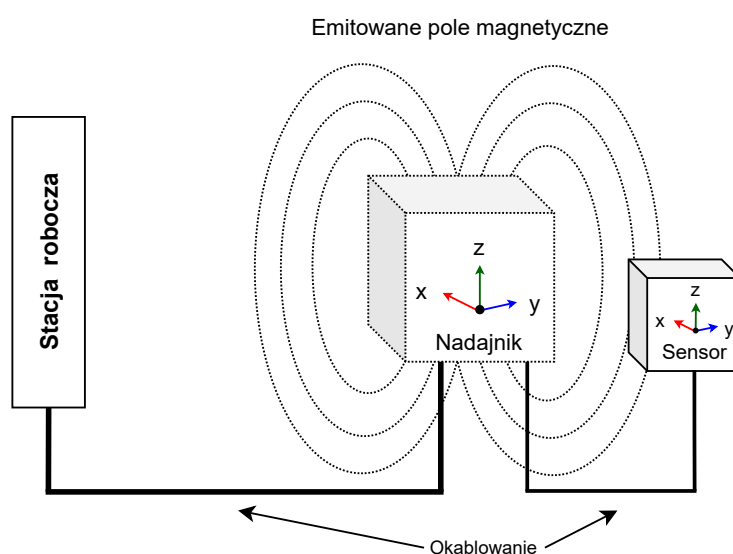
na wyznaczenie odległości pomiędzy modułami, a tym samym na określenie pozycji odbiornika w przestrzeni. Metoda pozycjonowania została przedstawiona na rysunku 2.3. Zaletami tego typu systemów są przenośność i niewielkie rozmiary, bezprzewodowość oraz brak ścisłych reguł co do rozmieszczania odbiorników. Wadami są przede wszystkim brak (globalnej) pozycji referencyjnej oraz dokładność systemu uzależniona od czynników środowiskowych, takich jak ciśnienie, wilgotność oraz temperatura powietrza.



Rysunek 2.3: Uproszczony przykład działania systemu akustycznego. Czarna wykropkowana ramka określa możliwe położenie odbiornika.

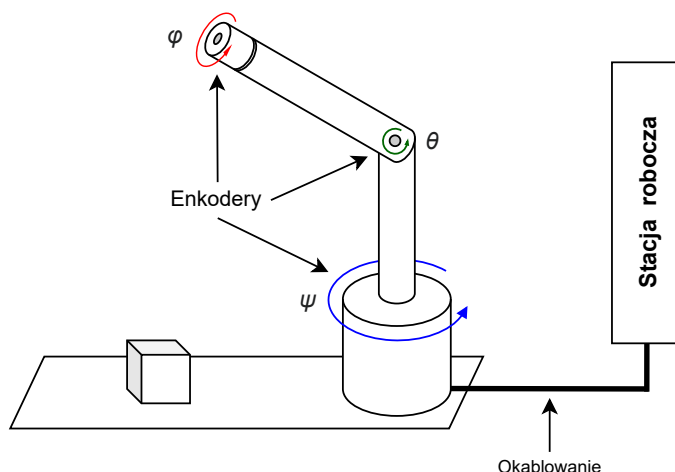
Systemy magnetyczne [14, 53] składają się z nadajnika oraz co najmniej jednego sensora (rys. 2.4). Nadajnik odpowiedzialny jest za emisję pola magnetycznego o niskiej częstotliwości, odbieranego przez sensor. Emisja następuje kolejno dla każdej z osi układu współrzędnych. Synchronizacja nadajnika i sensora ma miejsce w sposób przewodowy, co pozwala na skorelowanie odbieranego sygnału (pola magnetycznego) z danym sensorem oraz odpowiednią jego osią. Sensor składa się z cewek, w których zachodzi indukcja prądu elektrycznego, gdy znajdują się one w emitowanym polu magnetycznym. Uzyskanie informacji o położeniu oraz o orientacji, wymusza użycie trzech cewek (po jednej dla każdej z osi) ułożonych względem siebie prostopadłe parami. Jako, że na pomiar wpływ ma również pole magnetyczne Ziemi, jest ono mierzony pomiędzy odbieranymi pulsami i odejmowane od wyniku pomiaru właściwego. Przetwarzanie zebranych danych odbywa się na poziomie zewnętrznej stacji roboczej.

Systemy te z powodzeniem są używane w medycynie, w szczególności w przypadkach, gdy narzędzie nie może być śledzone w sposób optyczny [19]. Wśród zalet systemów magnetycznych, wyróżnić można relatywnie niski koszt budowy systemu oraz elastyczność w rozmieszczeniu sensorów. Podkreślić należy także jego mobilność. Istotną wadą tego typu systemów jest ich ograniczone zastosowanie w miejscach występowania promieniowania elektromagnetycznego i/lub elementów metalowych. Niepożądane zakłócenia pomiarowe mogą pochodzić zarówno od aparatury (np. stacji roboczej) jak i elementów wyposażenia pomieszczenia (w tym strukturalnych). Wymagane są odpowiednie przygotowanie środowiska testowego i częsta kalibracja systemu w celu utrzymania wysokiej dokładności pomiaru. Brak tu także możliwości uzyskania pozycji referencyjnej.



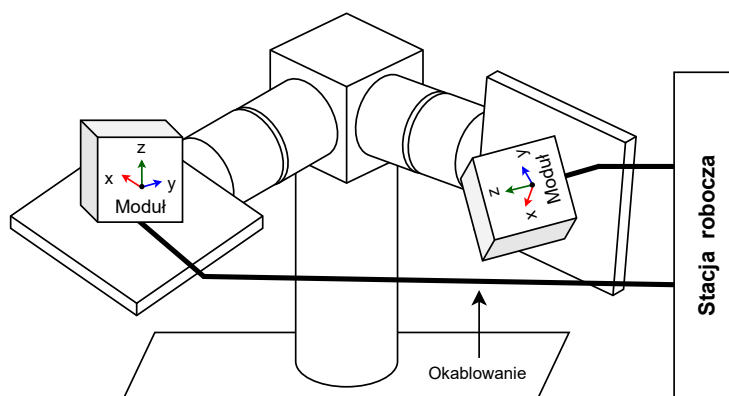
Rysunek 2.4: Uproszczony przykład działania systemu magnetycznego.

Systemy mechaniczne [26, 42, 87] pozwalają na określenie położenia oraz orientacji obiektu, używając do tego celu specjalnych enkoderów, mierzących obrót na każdym połączeniu (przegubie) lub sensorów giętkich (rys. 2.5). Pomiar jest dokładny i może zostać wykonany bardzo szybko. Zastosowanie tego systemu jako jedyne systemu pomiarowego jest niekiedy utrudnione z uwagi na konieczność budowy dedykowanej konstrukcji, na której odbędzie się pomiar właściwy. Oznacza to, że system zostaje niejako wbudowany w obiekt, którego ruch ma być rejestrowany (np. ramię pomiarowe, egzozkielet, rękawica). Co więcej, proces pozycjonowania ma odniesienie tylko do elementów ruchomych — oznacza to, że w przypadku jednostki zmieniającej wysokość w wyniku skoku, nie zostanie on zarejestrowany, a jedynie zmiany na poszczególnych połączeniach. Metoda ta jest bardzo upowszechniona w rozwiązaniach bazujących na egzozkieletach, głównie z uwagi na wysoką dokładność oraz możliwość szybkiego zebrania danych pomiarowych. Koszt systemu jest zazwyczaj relatywnie niewielki, w kontekście całej konstrukcji. Wadami tego typu systemów są zastosowania limitowane głównie do ludzi i robotów, brak pozycji referencyjnej, brak przenośności oraz możliwość zakłócenia pomiaru poprzez zewnętrzne siły działające na obiekt.



Rysunek 2.5: Uproszczony przykład działania systemu mechanicznego.

Systemy inercyjne [40, 91] wykorzystują do pozycjonowania moduły o niewielkich rozmiarach, zbudowane w oparciu o trzyosiowe akcelerometry, żyroskopy i często też magnetometry. Taki zestaw sensorów pozwala na śledzenie zarówno orientacji, prędkości kątowej jak i przyspieszenia, a w konsekwencji na wyznaczenie położenia oraz orientacji modułu. Pojedynczy moduł pozwala dokonać pomiar tylko w jednym, konkretnym punkcie. Aby uzyskać dokładne pozycjonowanie całego obiektu, konieczne jest zastosowanie grupy modułów oraz okresowa kalibracja. Jako, że sensory te charakteryzują się dryfem pomiarowym, często stosuje się algorytmy filtrujące. Najczęściej używanym jest filtr Kalmana [36] lub jego modyfikacje. Systemy tego typu doskonale nadają się do wykrywania ruchu oraz przyspieszeń im towarzyszącym. Cechuje je wysoka przenośność, szybki proces kalibracji oraz wysoka dokładność. Niestety, podobnie jak wiele innych typów systemów przechwytywania ruchu, systemy inercyjne nie pozwalają na uzyskanie globalnej pozycji obiektu. Są one ponadto podatne na zakłócenia zewnętrzne m.in. magnetyczne, co ogranicza ich obszar zastosowań.



Rysunek 2.6: Uproszczony przykład działania systemu inercyjnego.

2.2 Optyczne systemy przechwytywania ruchu

Optyczne systemy przechwytywania ruchu stanowią obecnie istotny element wyposażenia laboratorium badawczego. Wykorzystywane są one do prac o bardzo szerokim spektrum zastosowań — od analizy i rejestracji ruchu ludzkiego ciała [27, 41, 62], przez robotykę medyczną [86, 90], aż po eksperymenty walidacyjne [14, 57], w tym bardzo specyficzne, jak analiza ruchu bezkręgowców [31]. Niektóre z nowoczesnych systemów pozwalają ponadto na rejestrację ruchu pod wodą [64]. Do systemów optycznych zaliczyć można wiele różnego rodzaju rozwiązań, zbudowanych w oparciu o kamery klasyczne, kamery głębi oraz kamery podczerwieni. Kamery klasyczne to urządzenia rejestrujące spektrum elektromagnetyczne światła widzialnego. W najprostszej wariacji, mierzona jest tutaj „ilość” światła przechodzącego odpowiednio przez filtry czerwony, zielony oraz niebieski. Dane te pozwalają na odtworzenie zarejestrowanego obrazu, w tym jego kolorów. Kamery głębi działają podobnie jak kamery klasyczne, jednak dostarczają dodatkową warstwę informacji, która pozwala na określenie głębi obrazu. Stosuje się tutaj różne podejścia. Jedne z nich zostały oparte na emiterze fal podczerwonych oraz pomiarze czasu pomiędzy emisją a powrotem odbitej wiązki. Inne bazują na emisji wzorcowej fali światła podczerwonego oraz pomiarze jej zniekształceń. To drugie podejście zostało zastosowane w produkcie Microsoft Kinect. Kamery podczerwieni to kamery, które rejestrują podczerwoną część spektrum elektromagnetycznego światła. Pasma to nie jest widzialne przez ludzkie oko. Kamery takie rejestrują światło pochodzące z elementów emitujących fale o określonej długości lub oświetlają otoczenie przy użyciu dedykowanych oświetlaczy podczerwieni. To drugie podejście wymaga użycia specjalnych materiałów, które odbiją światło do jego źródła.

Przeważająca większość zadań, wymagających wysokiej dokładności, realizowana jest przez systemy składające się z grupy kamer. Spowodowane jest to przede wszystkim możliwością rejestracji większej przestrzeni roboczej oraz zapewnieniem ciągłości śledzenia, nawet w przypadku, gdy obiekt nie jest widoczny przez wszystkie z kamer. Systemy takie charakteryzują się wysoką dokładnością przechwytywania ruchu sięgającą ułamków milimetrów³. Niniejszy rozdział nie będzie obejmował systemów innych, niż rekonfigurowalne systemy optycznego przechwytywania ruchu, składające się z grupy niezależnych kamer. Oznacza to, że zawarte tu informacje nie będą miały zastosowania wprost do takich rozwiązań jak Microsoft Kinect, czy Atracsys fusionTrack. Wyjątek będą stanowiły opisy odnoszące się do systemów bezznacznikowych. Dla zachowania spójności treści, w dalszej części dokumentu pojęcie „system przechwytywania ruchu” będzie odnosiło się tylko do wielokamerowych optycznych systemów przechwytywania ruchu.

Na rynku obecnych jest wielu producentów sprzętu przeznaczonego do przechwytywania ruchu. Wyróżnić można Amerykański OptiTrack oraz Motion Analysis, Brytyjski Vicon, Chiński Nokov oraz Szwedzki Qualisys. W regionie europejskim najpowszechniejsze z nich to OptiTrack, Qualisys oraz Vicon. Systemy przechwytywania ruchu można podzielić na trzy podstawowe klasy — bezznacznikowe (ang.

³Uwaga odnosi się do systemów działających w oparciu o markery aktywne oraz pasywne.

markerless), z użyciem markerów aktywnych oraz z użyciem markerów pasywnych.

Systemy bezznacznikowe [11, 38, 73] stanowią istotne rozwiązanie, mające na celu uzyskanie wysokiej jakości śledzenia obiektu, bez konieczności stosowania jakichkolwiek markerów. Takie podejście jest niezwykle wartościowe w przypadku ruchu ludzi, na przykład podczas rejestracji oraz analizy postawy biegaczy. W takim przypadku użycie dodatkowych znaczników, czy peryferiów przytwierdzonych do ciała, może ograniczać ruch i wprowadzać błąd do danych pomiarowych. Choć rozwiązanie to jest obecne w obszarze zainteresowań wielu badań, nadal ma swoje ograniczenia. Jego zastosowanie dla grupy obiektów o podobnych lub identycznych cechach (np. robotów) jest praktycznie niemożliwe z uwagi na brak sposobności na ich jednoznaczne zidentyfikowanie. Wśród wad wyróżnić można ponadto dużą podatność na szum pomiarowy, niską odporność na zewnętrzne źródła światła, długi czas przetwarzania danych oraz wysokie wymagania sprzętowe po stronie stacji roboczej.

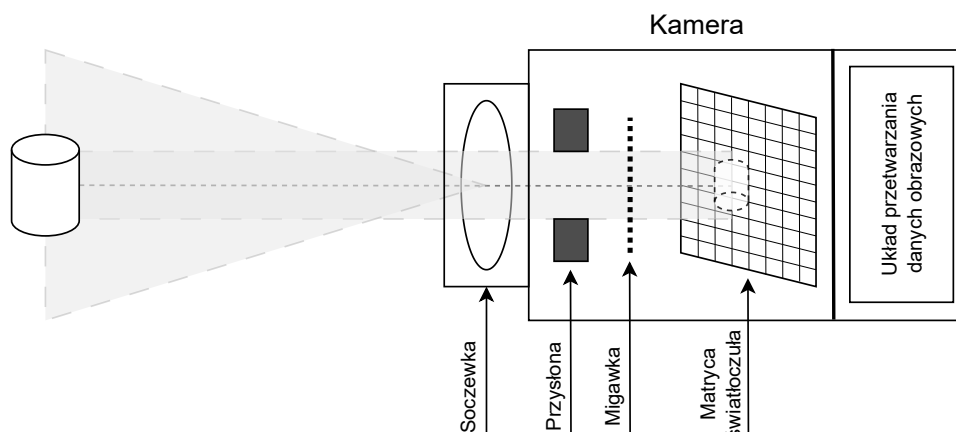
Systemy aktywne [29, 37, 81] działają na zasadzie źródeł światła podczerwonego (emiterów LED IR), umieszczonych na obiekcie. Zazwyczaj komunikują się one ze stacją bazową w sposób radiowy. Stacja bazowa steruje widocznością diod, dopasowując ją do częstotliwości pracy systemu. Pozwala to na zapalenie tylko jednego, wybranego markera w danej klatce, co rozwiązuje problem identyfikacji markerów, a co za tym idzie upraszcza algorytm przetwarzania danych po stronie stacji roboczej. Minusem tego rozwiązania jest jego masa i konieczność użycia peryferiów w postaci okablowania, dodatkowego źródła energii, modułu komunikacji bezprzewodowej oraz samych diod.

Systemy pasywne [37, 60] działają w oparciu o specjalne znaczniki, których cechą szczególną jest odbijanie światła do jego źródła. Z uwagi na wyposażenie każdej kamery w oświetlacz podczerwieni, możliwe jest zapewnienie widoczności markerów, a tym samym ich właściwe pozycjonowanie. Systemy te cechują się relatywnie niskim narzutem masy na obiekt, jednak wymagają znacznej mocy obliczeniowej do przetworzenia obrazu pod kątem rekonstrukcji bryły obiektu. Co więcej, z uwagi na oświetlenie całego obszaru roboczego, istnieje prawdopodobieństwo wykrycia „punktów” niebędących znacznikami (fałszywe markery, ang. *false markers*). Jako, że niniejsza rozprawa odnosi się do systemów działających w oparciu o markery pasywne, szczegóły tego systemu — w tym markerów — zostaną omówione w kolejnych rozdziałach.

2.2.1 Budowa

Podstawowy system przechwytywania ruchu składa się z trzech współzależnych elementów. Są to odpowiednio kamery, stacja robocza wraz z oprogramowaniem oraz znaczniki.

Kamery stanowią najbardziej złożony element całego systemu. Pozwalają one na rejestrację pewnego obszaru i wykrywanie w nim markerów. W ogólności kamera oświetla przestrzeń przy użyciu oświetlacza podczerwieni (IR, ang. *Infra Red*), co skutkuje odbiciem światła przez markery do jego źródła i powoduje, że stają się one widoczne. Długość emitowanej fali wynosi zazwyczaj ok. 850 nm, co pozwala na



Rysunek 2.7: Uproszczona budowa kamery systemu przechwytywania ruchu.

ograniczenie interferencji ze światłem słonecznym oraz czyni światło niewidzialne dla ludzkiego oka. Budowa kamery została przedstawiona na rysunku 2.7. W przypadku kamer systemów przechwytywania ruchu, możliwa jest zmiana pewnych ich parametrów zarówno w ujęciu fizycznym jak i programowym. Do tych pierwszych należą ustawienia przysłony oraz ostrości obrazu. Z uwagi na mechaniczny charakter zmian, przywrócenie ich do ustawień początkowych może być trudne. Druga grupa ustawień to odpowiednio czas ekspozycji, wskazujący jak długo migawka ma pozostać otwarta, próg detekcji, określający poziom filtracji obrazu w oparciu o jasność pikseli oraz wzmocnienie, wpływające na jasność obrazu oraz ilość szumu w rejestrowanych danych. Z uwagi na ilość danych i wysokie częstotliwości pracy kamer, konieczne jest zastosowanie układu przetwarzającego dane obrazowe już po stronie kamery. Stosuje się zazwyczaj układy FPGA (ang. *Field-Programmable Gate Array*) w celu oddzielenia tła od pierwszego planu oraz wyznaczenia współrzędnych wykrytych markerów. Celem tej operacji jest ograniczenie ilości transmitowanych danych oraz zmniejszenie obciążenia stacji roboczej.

Stacja robocza wraz z oprogramowaniem stanowi jednostkę, na której zachodzi końcowe przetwarzanie danych, przesłanych przez kamery. Pojęcie „dane” odnosi się głównie do położeń uzyskanych po stronie kamer (informacji odnoszących się do znaczników), nie natomiast do surowych obrazów zarejestrowanych przez kamery. Aby rekonstrukcja była możliwa, dedykowane oprogramowanie korzysta z danych kalibracyjnych, aby określić usytuowanie kamer w przestrzeni (położenie oraz orientację), wyznaczyć wektor śledzenia kamer oraz ich macierze dystorsji, pozwalające na skompensowanie zniekształceń soczewek. W oparciu o powyższe, możliwe jest wyznaczenie najpierw trójwymiarowego obszaru roboczego, a kolejno określenie współrzędnych znaczników i zrekonstruowanie obiektów się w nim znajdujących.

Markery pasywne (rys. 2.8) stanowią podstawowy element pozwalający na oznaczenie obiektu i jego właściwe pozycjonowanie. Wyróżnić można dwa elementarne typy markerów — płaskie oraz sferyczne. Markery płaskie zbudowane są przy użyciu materiałów retro refleksyjnych (rozdział 2.3) poprzez wycięcie kolistego kształtu

o zadanej średnicy. Markery sferyczne to znaczniki, cechujące się wysokim współczynnikiem kulistości, pokryte materiałem retro refleksyjnym. Z uwagi na konieczność uzyskania niskiej masy, ich bazę stanowi zazwyczaj plastik lub styropian. Baza często posiada otwór montażowy lub kilka otworów montażowych, pozwalających na obniżenie masy końcowej. Przewaga markerów sferycznych nad płaskimi polega przede wszystkim na kątach widzenia. Sfera rzutowana na płaszczyznę dwuwymiarową staje się kołem. W przypadku rzutowania markera płaskiego, pod pewnymi kątami może on zostać zowalizowany. To z kolei może negatywnie wpłynąć na dokładność pozycjonowania bryły z uwagi na niedokładność wyznaczenia środka znacznika lub znaczników. Niestety markery sferyczne cechują się znacznie wyższą masą, a co więcej wystają poza obrys śledzonego obiektu, co nie zawsze jest akceptowalne. Dobór odpowiedniego typu markerów zależy więc od wymagań stawianych przez dany eksperyment i zespół badaczy.



Rysunek 2.8: Zestawienie różnych markerów pasywnych, używanych w ramach badań. Różnice odnoszą się do typu użytego materiału, średnicy oraz typu znacznika (sferyczny, płaski).

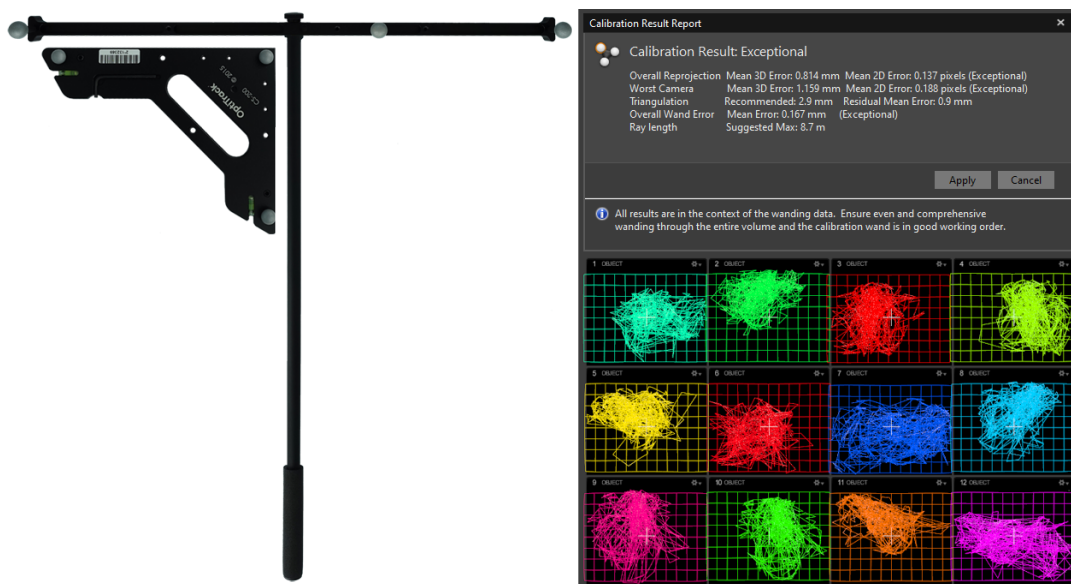
2.2.2 Zasada działania

Użycie systemu przechwytywania ruchu związane jest z koniecznością wykonania kilku kroków, począwszy od odpowiedniego usytuowania kamer, przez kalibrację systemu, po skonstruowanie bryły sztywnej oraz zebranie danych pozycjonujących. W rozważaniach tych celowo pominięte zostały struktury giętkie tzw. „szkielety” (ang. *skeleton*), jako że nie mają one zastosowania w przypadku lekkich jednostek latających.

Pierwszym etapem jest odpowiednie rozmieszczenie kamer. Ma ono wpływ na widoczność znaczników i obiektów oraz dokładność ich pozycjonowania. Układ kamer jest zazwyczaj zależny od dostępnego miejsca (dostępnej przestrzeni w pomieszczeniu) oraz danego zadania. Kamery powinny zostać rozmieszczone w sposób asymetryczny, tak aby w dowolnym miejscu przestrzeni obiekt był śledzony przez co najmniej

3 spośród nich. Co więcej, kamery nie powinny widzieć siebie nawzajem, gdyż może to skutkować powstawaniem fałszywych markerów w okolicach oświetlaczy podczerwieni. Uzyskanie optymalnego układu kamer może być bardzo trudne, nawet w przypadku zastosowania dedykowanych do tego celu narzędzi. Stąd istotne jest tutaj stosowanie się do zaleceń producenta, uzyskanie wsparcia ze strony osób posiadających wiedzę ekspercką oraz stopniowa poprawa usytuowania kamer względem konfiguracji bazowej.

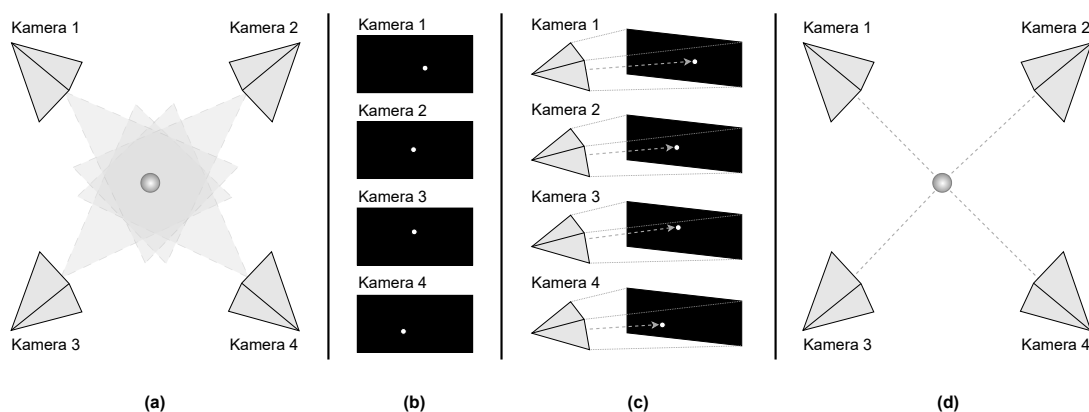
Drugi etap to proces kalibracji. Pozwala on na budowę przestrzeni z globalnym układem odniesienia, w którym to poruszać się będzie obiekt oraz w którym to znajdować będą się kamery. Proces ten dostarcza informacji o położeniu oraz orientacji każdej z kamer, o ich wektorach śledzenia, a także o zniekształceniach obrazu związanych z zastosowaną soczewką. Do celu kalibracji używane są specjalne narzędzia (rys. 2.9). Są nimi dokładnie wykonane elementy, na których znajdują się markery o znanym rozmiarze, usytuowane z dokładnością do dziesiątych części milimetra. Pierwszym z nich jest tak zwana różdżka (ang. *wand*). Osoba podejmująca się kalibracji, musi za pomocą powolnego, aczkolwiek ciągłego ruchu wykreślić w przestrzeni trajektorię, pokrywającą pole widzenia każdej z kamer. W oparciu o zebrane próbki (zmiennność położenia znaczników w przestrzeni), wyznaczane są dokładne położenia kamer względem siebie oraz ich orientacje. Aby sfinalizować ten proces, konieczne jest użycie drugiego narzędzia kalibracyjnego — trójkąta (ang. *triangle*). Pozwala on na wyznaczenie globalnego układu odniesienia oraz skorelowanie wybranej płaszczyzny (np. podłogi) z płaszczyzną, wyznaczaną przez układ kamer.



Rysunek 2.9: Narzędzia kalibracyjne dedykowane dla systemów firmy NaturalPoint OptiTrack oraz przykładowy wynik kalibracji. Kolorowe linie wskazują na pokrycie kalibracją przestrzeni roboczej przez poszczególne kamery. Użytych zostało 12 kamer.

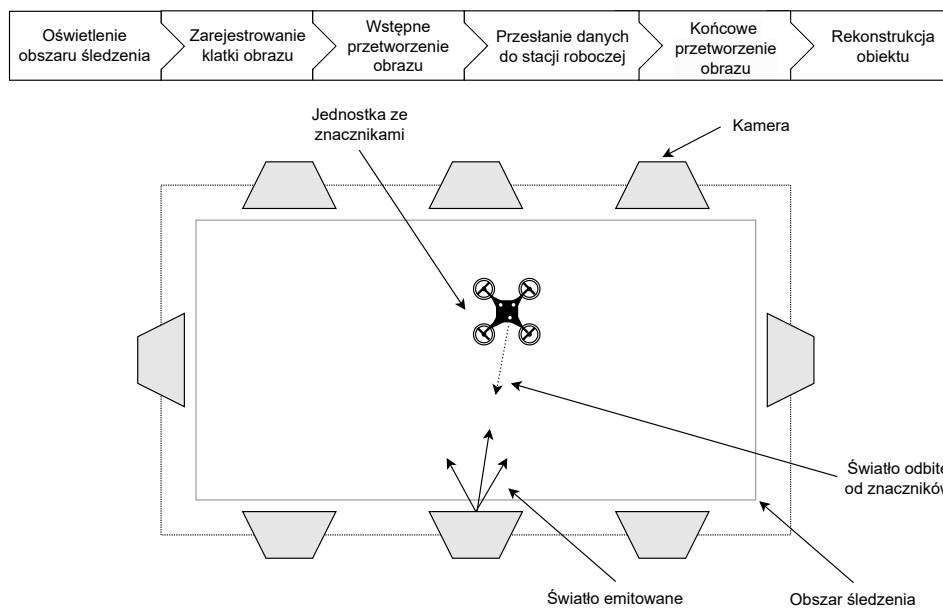
Trzeci etap to skonstruowanie bryły sztywnej oraz zebranie danych pomiarowych. Aby móc zdefiniować bryłę, potrzebne są co najmniej 3 markery usytuowane asyme-

trycznie. Więcej znaczników zapewnia lepszą widoczność bryły oraz ciągłość śledzenia. Symetryczne usytuowanie znaczników nie będzie miało wpływu na dane dotyczące położenia obiektu, natomiast może prowadzić do niejednoznaczności przy określaniu jej orientacji. To z kolei może powodować problemy przy odtwarzaniu trajektorii, czy też podczas analizy zebranych próbek. Po zdefiniowaniu bryły, możliwe jest zarejestrowanie danych odnoszących się do jej położenia oraz orientacji. Wszystkie aktywne kamery oświetlają obszar śledzenia, co powoduje, że usytuowane w nim markery odbijają światło do źródła. Każda kamera niezależnie przetwarza obraz, bazując na zadanych parametrach wejściowych (w tym progu detekcji), przekształcając go na postać obrazu monochromatycznego. Kolejno następuje detekcja markerów i przesłanie danych do stacji bazowej. W oparciu o dane odnoszące się do położenia i orientacji kamer, ich wektora śledzenia oraz macierzy dystorsji, wyznaczane są wektory przechodzące przez wykryte znaczniki. Są one następnie nakładane na siebie, gdzie miejsca przecięcia wektorów wskazują na położenie markerów w przestrzeni trójwymiarowej (rys. 2.10).



Rysunek 2.10: Uproszczona procedura wyznaczania położenia znacznika w przestrzeni trójwymiarowej: (a) marker znajduje się w polu widzenia kamer; (b) kamery odczytują położenie znacznika w przestrzeni dwuwymiarowej; (c) znając położenie oraz orientację kamer, ich wektor śledzenia oraz macierze dystorsji, możliwe jest wyznaczenie wektorów przechodzących od kamer do znacznika; (d) znacznik znajduje się na przecięciu wszystkich wyznaczonych wektorów.

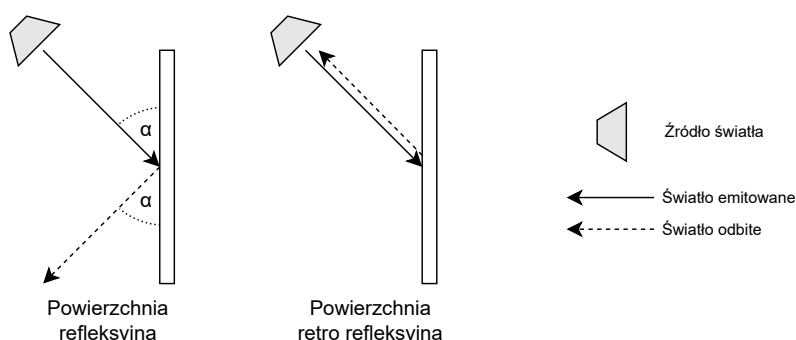
Po wykryciu markerów oraz określeniu ich usytuowania w przestrzeni trójwymiarowej, następuje próba rekonstrukcji obiektu. Dokonuje się tego znając zależności zachodzące pomiędzy znacznikami, to jest odległości pomiędzy nimi przy zachowaniu pewnej tolerancji. Po udanej rekonstrukcji wyznaczany jest punkt środka, określony w trakcie definiowania bryły. W tym momencie położenie i orientacja obiektu mogą zostać prawidłowo odczytane. Cały proces akwizycji danych został przedstawiony na rysunku 2.11.



Rysunek 2.11: Uproszczony schemat przetwarzania danych przez system przechwytywania ruchu.

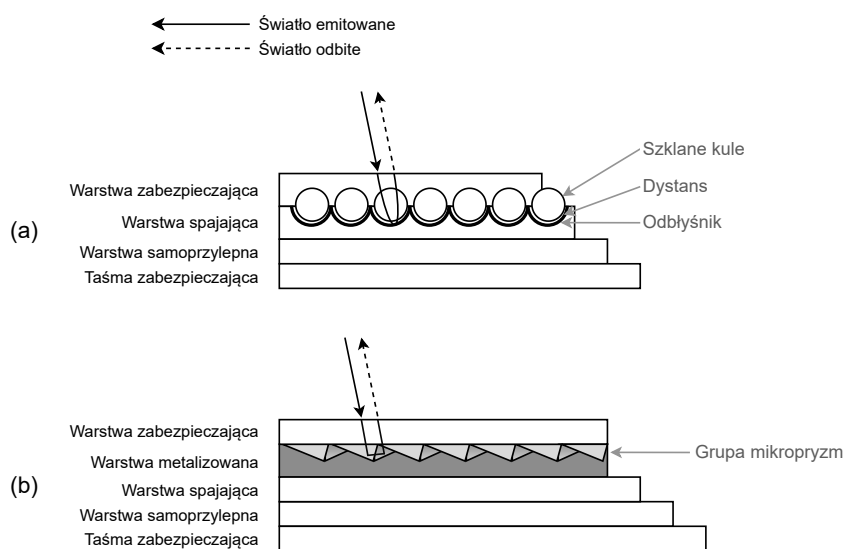
2.3 Materiały retro refleksyjne

Materiały refleksyjne i retro refleksyjne to materiały, które odbijają wiązkę światła. Podstawową różnicą pomiędzy nimi jest to, w jaki sposób działają. Materiały refleksyjne (np. lustro lub błyszcząca powierzchnia) odbijają światło zgodnie z kątem jego padania, w oparciu o zasadę „*kąt padania jest równy kątowi odbicia*”. Oznacza to, że światło zostanie odbite w kierunku źródła tylko w przypadku, gdy źródło i powierzchnia refleksyjna są do siebie równoległe. Materiały retro refleksyjne zawsze odbijają światło do jego źródła. Zaznaczyć należy, że każdy materiał retro refleksyjny jest także refleksyjny, ale nie każdy materiał refleksyjny jest retro refleksyjny. Zależność ta została pokazana na rysunku 2.12.



Rysunek 2.12: Porównanie odbicia światła od powierzchni refleksyjnej i retro refleksyjnej. Widoczne są różnice w kątach padania i odbicia światła. Pomysł został zaczerpnięty z [10].

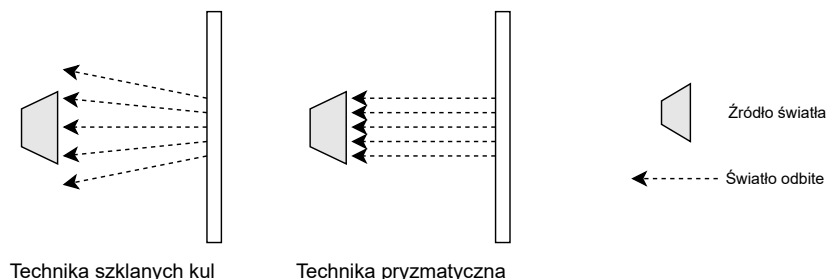
Materiały retro refleksyjne są wykonywane w dwóch podstawowych technikach — szklanych kul (ang. *glass bead*) oraz pryzmatycznych (ang. *prismatic*) [58]. Podstawowa technika szklanych kul opiera się o kule umieszczone na metalizowanym odbłyśniku, co pozwala na skierowane odbicie światła do źródła (rys. 2.13a). Kule są trzymane we właściwym dla nich miejscu przy użyciu kleju. Dodatkowo, zastosowany jest tutaj bezbarwny lub barwiony materiał wierzchni, który pełni rolę ochronną i koloryzującą. Druga technika – pryzmatyczna – opiera się o grupę mikropryzm, które to mogą być bezbarwne lub kolorowe (rys. 2.13b). Warstwa metalizowana zwiększa refleksyjność materiału. Inne warianty tej metody uwzględniają użycie akrylu lub żywicy. Ich zastosowanie często jest ograniczone, gdyż powyższe komplikuje proces produkcyjny oraz czasami powoduje problemy z delaminacją materiału. Technika pryzmatyczna – podobnie jak szklanych kul – uwzględnia także warstwy łączącą oraz zabezpieczającą. Ich przeznaczenie w obu technikach jest takie samo.



Rysunek 2.13: Struktura wybranych materiałów retro refleksyjnych. Porównane zostały dwie techniki wykonania taśm – szklanych kul (a) oraz mikropryzm (b). Pomysł został zaczerpnięty z [10].

W literaturze znaleźć można liczne klasyfikacje materiałów retro refleksyjnych. Często są one przypisywane do różnych kategorii jasności (np. Engineer Grade [EG], High Intensity Prismatic [HIP], Diamond Grade [DG]). Przypisanie związane jest z techniką wykonania oraz maksymalną jasnością danego materiału. Ta jest zależna między innymi od użytego koloru [10, 13]. Możliwe jest posortowanie kolorów począwszy od najjaśniejszego: biały, szary, żółty, pomarańczowy, zielony, czerwony, niebieski. Materiały wykonane techniką mikropryzm są zazwyczaj jaśniejsze [58], a odbijane światło jest bardziej skupione. Są one droższe w produkcji od materiałów zbudowanych w oparciu o szklane kule i co istotne, mają od nich gorszą widoczność kątową. Technika szklanych kul z kolei charakteryzuje się niższą jasnością, z powodu większego rozproszenia światła (rys. 2.14). W przypadku systemów przechwytywania ruchu, względnie stała jasność w szerokim zakresie kątowym jest bardzo pożądana.

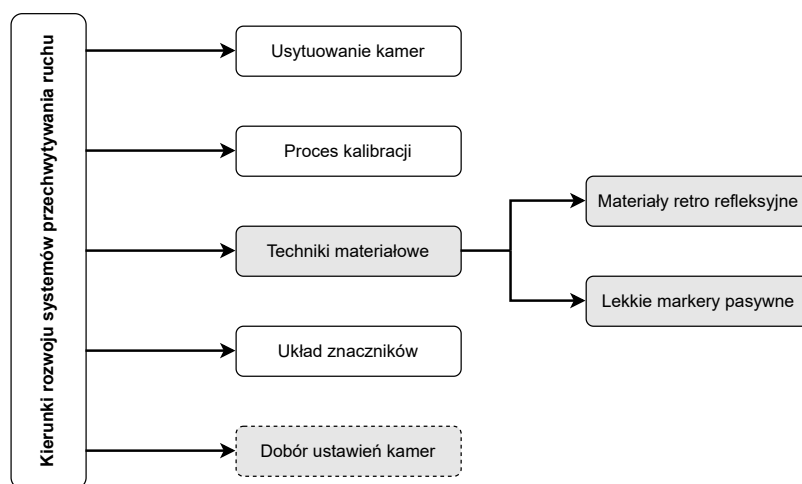
Pozwala ona uniknąć potencjalnie niepożądanego efektu nakładania się na siebie znaczników (ang. *occlusion problem*), który jest szczególnie zauważalny w ujęciu markerów płaskich.



Rysunek 2.14: Porównanie skupienia wiązki odbitego światła w odniesieniu do technik szklanych kul oraz pryzmatycznych. Pomysł został zaczerpnięty z [10].

2.4 Aktualny stan wiedzy

Poprawa działania optycznego systemu przechwytywania ruchu jest tematem dobrze znanym w literaturze. Termin „poprawa” należy rozumieć zarówno jako poprawę widoczności znaczników, jak i poprawę dokładności śledzenia systemu. Badania nad tym zagadnieniem stanowią istotny problem naukowy i są realizowane wielopłaszczyznowo. Wyróżnić tu można prace odnoszące się do procesu kalibracji, usytuowania kamer, technik materiałowych, układu znaczników oraz doboru ustawień kamer. Nie wszystkie odnoszą się jednak wprost do systemów wielokamerowych. Aktualne kierunki rozwoju zostały przedstawione na rysunku 2.15.



Rysunek 2.15: Kierunki rozwoju systemów przechwytywania ruchu. Kolorem szarym zaznaczono tematykę poruszoną w niniejszej rozprawie. Wykropkowanym obramowaniem zaznaczono aspekt dotychczas nieujęty w publicznie dostępnych pracach badawczych.

Dynamiczny rozwój systemów przechwytywania ruchu, związany z ich popularyzacją, skutkuje pojawianiem się wielu różnych podejść do poprawy ich parametrów. Jako, że niemożliwym jest zebranie, usystematyzowanie oraz porównanie ich wszystkich, wybrane zostały te, które zdaniem autora są warte uwagi.

Istotnym czynnikiem warunkującym stopień wykorzystania możliwości systemu przechwytywania ruchu, jest fizyczne umiejscowienie kamer w przestrzeni, w której mają zostać przeprowadzone eksperymenty. Problem ten jest nietrywialny, gdyż wraz ze wzrostem liczby kamer, wykładniczo wzrasta liczba kombinacji odnoszących się do odpowiedniego układu, to jest położenia i orientacji kamer. W literaturze znaleźć można przykłady prac, które korelują ten problem z problemem galerii sztuki (ang. *art gallery problem*) [55]. Klasycznie, operacja usytuowania kamer jest dokonywana w oparciu o ogólne wytyczne producenta. Z uwagi na znaczenie problemu, pojawiły się badania, które proces ten mają usprawnić, zoptymalizować oraz zautomatyzować. Jedno z podejść zostało opisane w [9]. Badacze zaproponowali metryki jakości dla systemu wielokamerowego, obejmujące probabilistyczny model okluzji. W ramach swojej pracy uwzględnili ograniczony kąt widzenia kamer, ich rozmieszczenie w przestrzeni trójwymiarowej i wpływ rozdzielczości kamer na jakość przechwytywanego obrazu w kontekście odległości od obserwowanego obiektu. Dla uproszczenia modelu przyjęto, że kamery są rozmieszczone w układach geometrycznie nieskomplikowanych. Założono też, że proponowane rozwiązanie nie musi zwracać optymalnych pozycji kamer, a jedynie sugerować poprawne. Inne podejście zostało zaproponowane w [65], gdzie rozpatrzono możliwość uzyskania optymalnego układu kamer w warunkach występowania dynamicznych okluzji. Metoda ta pozwala na wyznaczenie najlepszego układu kamer dla specyficznego zbioru punktów docelowych (obserwowanych). Algorytm uwzględnia parametry wejściowe takie jak liczba kamer oraz sugerowane ich usytuowanie w przestrzeni. Ogólna zasada działania polega na takim rozmieszczeniu kamer, aby w danym momencie co najmniej dwie z nich – o odpowiednio różnych kątach widzenia – obserwowały obiekt i możliwa była triangulacja jego położenia, przy zapewnieniu jak najmniejszego błędu pozycjonowania. Przeprowadzone badania uwzględniały testy teoretyczne oraz praktyczne, co pozwoliło potwierdzić użyteczność zaproponowanego rozwiązania. Alternatywna propozycja została opisana w [2]. Do celu wsparcia usytuowania kamer w przestrzeni, wykorzystana została tutaj odmiana algorytmu genetycznego (ang. *guided genetic algorithm*) oraz wprowadzone zostały metryki jakości. Algorytm obejmuje dwie fazy działania — modelowania graficznego oraz optymalizacji układu kamer. Pierwsza faza odnosi się do utworzenia wirtualnej sceny, układu bazowego kamer oraz jednostki testowej (humanoida), do którego przytwierdzone są markery. Tutaj kreowany jest także ruch robota, w oparciu o który ma odbyć się optymalizacja. Druga faza korzysta z algorytmu genetycznego w celu analizy i poprawy usytuowania kamer. Pod uwagę brany jest ruch robota. Choć zdaniem badaczy rozwiązanie to pozwala na zmniejszenie narzutu czasowego oraz obliczeniowego w porównaniu z alternatywnymi rozwiązaniami, brak jest tutaj walidacji eksperymentalnej, która pozwoliłaby jednoznacznie ocenić jego praktyczną wartość.

Kalibracja stanowi kluczowy proces, pozwalający na uzyskanie wysokiej jakości

śledzenia, co przekłada się na wysoki poziom pokrycia obszaru roboczego oraz minimalizację błędu pozycjonowania w przestrzeni trójwymiarowej. Prace odnoszące się do tej tematyki w ujęciu systemów przechwytywania ruchu operujących w paśmie podczerwonym światła są niszowe. Większość badań traktuje tego typu systemy, jako zewnętrznego obserwatora [21, 75, 95], przez co proponowane rozwiązania nie mają zastosowania w ich kontekście. Nie oznacza to jednak, że badania dotyczące procesu kalibracji nie są w ogóle dostępne w literaturze. W jednym z nich, badacze zaproponowali urządzenie montowane na narzędziu kalibracyjnym (róźdzce), które wspiera proces kalibracji w sposób wizualny [18]. Urządzenie to informuje użytkownika o stopniu pokrycia przestrzeni roboczej, a tym samym czy proces ten może zostać w danym momencie zakończony. Celem jest przede wszystkim poprawa procentowego pokrycia przestrzeni w procesie kalibracji, wsparcie użytkowników (w szczególności tych mniej doświadczonych) oraz minimalizacja błędu pozycjonowania obiektu w przestrzeni trójwymiarowej. Urządzenie komunikuje się ze stacją bazową za pośrednictwem protokołu Bluetooth Low Energy i odbiera dane pozycjonujące róźdzkę. Jako, że proces ten jest w pełni nadzorowany, możliwe jest określenie stopnia pokrycia przestrzeni roboczej. Ograniczenie rozwiązania stanowi fakt, że przed wykonaniem kalibracji docelowej, konieczne jest poprzedzenie jej kalibracją wstępną (bazową), tak aby położenie i orientacja róźdzki mogły zostać poprawnie odczytane. Inne interesujące badania zostały przeprowadzone w ramach pracy [47]. Naukowcy pośrednio przedstawili tutaj metodę, która pozwala na wykrycie niepoprawnie przeprowadzonego procesu kalibracji oraz na wykrycie defektu narzędzia kalibracyjnego. Przeprowadzone zostały pomiary róźdzki kalibracyjnej w temperaturze 21°C, które wykazały jej niedokładność wykonania. Choć niedokładność ta wynosiła zaledwie 0,25 mm, to wprowadzony w ten sposób błąd w procesie kalibracji mógł wpływać na pomiar, zaburzając go do 2,5 mm przy pomiarze o długości 5 metrów. W ramach pracy, wprowadzone zostało pojęcie współczynnika błędu, służącego do przeskalowania otrzymanych pomiarów, do postaci wolnej od błędu, wynikającego z niedokładności wykonania narzędzia kalibracyjnego. Eksperymenty zostały przeprowadzone na dwa sposoby — jeden obejmował wysoce precyzyjne instrumenty pomiarowe, drugi taśmę mierniczą o dokładności do jednego milimetra.

Techniki materiałowe stanowią najbardziej eksplorowany obszar badawczy. Wynika to z powszechnego trendu użycia materiałów retro refleksyjnych w życiu codziennym, przede wszystkim w ujęciu bezpieczeństwa [39], i konieczności kontynuacji badań, w celu zapewnienia jak najlepszej widoczności ludziom, pojazdom oraz infrastrukturze. Jako, że w przypadku systemów przechwytywania ruchu można zastosować praktycznie dowolny materiał retro refleksyjny, wyniki tych badań są wartościowe również tutaj. W pracy [16] przedstawiona została analiza przydatności materiałów retro refleksyjnych w kontekście detektorów scyntylacyjnych. Analiza obejmowała 5 powszechnie dostępnych materiałów firm Orafol, 3M, Michel Production oraz Telemecanique Sensors. Zweryfikowane zostały kąty widzenia materiałów oraz przeanalizowano ich strukturę. Testy przeprowadzono w świetle niebieskim, jednak uzyskane wnioski mają przełożenie na systemy działające w świetle (pod)czerwonym. Dotyczy to zarówno kwestii materiałowej (techniki wykonania) jak i technicznej,

odnoszącej się do „naklejania” taśm i ich wzoru widocznego dla ludzkiego oka. Inny zespół badaczy przeprowadził analizę fotometryczną materiałów retro refleksyjnych w zależności od ich struktury oraz kątów oświetlenia [58]. Wykonane zostały pomiary fotometryczne 4 próbek o różnej charakterystyce oraz o różnym kolorze. W badaniach wykorzystano taśmy zbudowane w technice szklanych kul na bazie tekstylnej oraz w technice mikropryzm na bazie polimerowej. Uwzględniono kolory czerwony oraz szary. Struktura wszystkich materiałów została przeanalizowana pod mikroskopem oraz zbadana na dedykowanym stanowisku. Istotny wynik pracy stanowi potwierdzenie wpływu użytego koloru na jasność taśmy oraz zależność kątową w odniesieniu do użytej techniki wykonania. Wnioski wskazują, że zastosowanie techniki szklanych kul skutkuje uzyskaniem mniej skupionego światła, jednak jednocześnie technika ta charakteryzuje się mniejszym współczynnikiem spadku widoczności, wraz ze wzrostem kąta pomiędzy źródłem światła, a obserwowanym materiałem. Praca [13] odnosi się z kolei do wpływu zużycia materiałów retro refleksyjnych na ich widoczność. Rozważania dotyczą materiałów wykonanych zarówno w technice szklanych kul jak i mikropryzm w kolorze białym oraz czerwonym. Postarzanie materiału było realizowane poprzez nanoszenie metodą druku kropek, zgodnie z przyjętymi wzorami. Wskazano, że czynniki takie jak czas, brud i naturalne zużycie związane z warunkami atmosferycznymi, mają wpływ na widoczność materiałów. Choć badania odnoszą się wprost do widoczności pojazdów, łatwo przenieść wyniki na warunki laboratoryjne, gdzie znaczniki są często dotykane oraz przecierane. Rozważania odnoszące się niebezpośrednio do technik materiałowych, stanowi także zaproponowanie współczynnika refleksyjności markerów (ang. *Reflection Rate Index*) [32], który pozwala na ocenę przydatności wybranego materiału retro refleksyjnego w danym zastosowaniu. Wskaźnik ten określa sposób i skalę redystrybucji światła. Przyjęto, że wartości współczynnika powyżej 1,0 odnoszą się do światła rozproszonego, natomiast poniżej 1,0 do światła skupionego. Testy przeprowadzono na grupie 4 markerów, w tym dwóch pasywnych i dwóch aktywnych. Choć zaproponowane rozwiązanie wydaje się być wysoce użyteczne, to brak testów na licznej grupie porównawczej, uniemożliwia jego użycie na szeroką skalę wśród osób korzystających z systemów przechwytywania ruchu.

Układ znaczników w znaczący sposób wpływa na proces akwizycji i przetwarzania danych. Niewłaściwe ich rozłożenie może utrudnić detekcję pojedynczych markerów, a tym samym całego obiektu. Dość powszechnym zjawiskiem jest nakładanie się na siebie znaczników (okluzja) zarówno z powodu niewłaściwego ich rozmieszczenia jak i generowanej przez nie poświaty. W literaturze znacząca większość prac odnosi się do tego zagadnienia w kontekście „szkieletów”, nie natomiast brył sztywnych. Tak też jest w przypadku badań [71]. Badacze przedstawili rozwiązanie, pozwalające na uzyskanie optymalnego układu markerów dla mimiki twarzy. Istotą tej pracy jest nie tylko optymalizacja tego procesu, ale także jego automatyzacja i ograniczenie udziału osób z wiedzą ekspercką. Rozważone zostały dwa podejścia — empiryczne oraz automatycznego grupowania. Pierwszy z nich obejmowało użycie powszechnie stosowanych układów markerów twarzy oraz zdefiniowania własnych zbiorów. Drugie z kolei odnosiło się do zautomatyzowanej metody nanoszenia punktów charaktery-

stycznych twarzy w taki sposób, aby możliwe było jej pokrycie w jak największym stopniu. Wykorzystana została tutaj metoda K-średnich. Zaproponowane rozwiązanie okazało się oferować lepsze wyniki, niż metoda empiryczna. Niestety jego użycie ogranicza się jedynie do układu markerów obejmujących ludzką twarz. Odmienne podejście do tego tematu zostało przedstawione w [94]. Tutaj, oprócz optymalizacji układu markerów, podjęto zagadnienie minimalizacji liczby użytych markerów, przy zachowaniu identycznej lub zbliżonej odtwarzalności mimiki twarzy. Wprost do zagadnienia usytuowania znaczników na bryle sztywnej odnosi się praca [82]. Wskazano w niej, że większość stosowanych podejść to metody iteracyjne, bazujące na wstępnym usytuowaniu markerów, które jest następnie poprawiane, zależnie od poziomu widoczności. Badawcze przedstawili tutaj półautomatyczne rozwiązanie, pozwalające na budowę bryły sztywnej z markerów pasywnych oraz algorytm, który ma za zadanie optymalizować ich układ. Co więcej, proponowane rozwiązanie uwzględnia także parametry systemów przechwytywania ruchu, w którym jest ono używane. Szczegółowy sposób implementacji algorytmu nie został przedstawiony. Najistotniejsza z punktu widzenia niniejszej rozprawy jest praca [1], w której to badania obejmowały optymalizację układu markerów na przedmiotach. Ma ona więc zastosowanie do obiektów, takich jak lekkie jednostki latające. Co więcej, zagadnienie odnosi się ściśle do markerów pasywnych. Przedstawiony algorytm nie tylko pozwala na automatyczne rozmieszczenie znaczników, ale także na ograniczenie ich liczby, ograniczenie okluzji oraz uwzględnia usytuowanie znaczników w kontekście zapewnienia wysokiej ich widoczności. Zastosowana została tutaj zmodyfikowana metoda Monte Carlo z wykorzystaniem odwracalnych łańcuchów Markowa (ang. *Reversible-Jump Markov Chain Monte Carlo*) [25]. Całość składa się z 5 faz — wejścia, w której to pozyskiwane są informacje na temat pomieszczenia, układu kamer oraz obiektu; przetwarzania wstępnego, w którym to siatka obiektu jest próbkowana; inicjacji, kiedy to proponowany jest bazowy układ znaczników; optymalizacji, w której przy użyciu metody Monte Carlo układ znaczników jest optymalizowany z uwzględnieniem parametrów podanych przez użytkownika; wyjścia, kiedy to otrzymany zostaje optymalny układ markerów. Cechą charakterystyczną badań jest ujęcie specyficznych cech obiektu w procesie optymalizacji układu markerów, w tym unikalnego kształtu, czy rozmiaru. Wyniki działania algorytmu zostały porównane z tymi, uzyskanymi od użytkowników z wiedzą ekspercką. Rozwiązanie charakteryzowało się lepszym rozkładem znaczników. Praca jest dość unikalna, gdyż zarówno badaczom jak i autorowi niniejszej rozprawy nie udało się znaleźć w literaturze innych badań tak ściśle związanych z układem znaczników dla obiektów, w kontekście pełnej automatyzacji. Pewien brak w pracy stanowi bardzo ograniczona walidacja na rzeczywistym systemie przechwytywania ruchu.

Najmniej eksplorowanym obszarem w kontekście wielokamerowych systemów przechwytywania ruchu jest dobór odpowiednich ustawień kamer. Zgodnie z wiedzą autora, w momencie redagowania niniejszej rozprawy, nie były dostępne znaczące prace odnoszące się wprost do tego zagadnienia. Nie oznacza to, że nie zostały znalezione prace warte uwagi, których wnioski mogą zostać przełożone na systemy wielokamerowe. W pracy [61] kompleksowo omówione zostały czynniki wpływające na

jakość obrazu kamer, rejestrujących próbki z wysokimi częstotliwościami. Analiza odnosiła się zarówno do ostrości oraz rozdzielczości, jak i do częstotliwości próbkowania, efektu rozmycia, ustawień migawki oraz oświetlenia zewnętrznego. Zaproponowane zostały wskazówki oraz wytyczne dotyczące doboru ustawień, aby uzyskać obraz wysokiej jakości, pozwalający na analizę wyjścia klatka po klatce. Badania zostały oparte o systemy działające w paśmie widzialnym światła, w kontekście sportu. Należy nadmienić, że choć wszystkich wytycznych nie da się zastosować wprost do systemów przechwytywania ruchu, korzystających z markerów pasywnych lub aktywnych, to praca ma istotne znaczenie w przypadku technik bezznacznikowych. Inny zespół badaczy zaproponował rozwiązanie pozwalające na automatyczną adaptację wartości czasu ekspozycji oraz wzmocnienia w ujęciu zmiennych warunków oświetlenia [84]. Zastosowana została tutaj głęboka konwolucyjna sieć neuronowa, której efekt działania zweryfikowano w warunkach miejskich. Praca, choć dotyczy systemu dwukamerowego, przedstawia różne podejścia do kontroli ekspozycji oraz ekspozycji i wzmocnienia, występujące w literaturze. Nawiązuje ponadto do systemów automatycznego doboru wzmocnienia oraz ekspozycji, mających zastosowanie również w rozwiązaniach wykorzystujących markery pasywne oraz aktywne.

Tabela 2.1: Zestawienie wybranych prac nad poprawą jakości śledzenia systemów przechwytywania ruchu.

| Kierunek rozwoju | Źródło |
|----------------------|------------------------------|
| Usytuowanie kamer | [2], [9], [65] |
| Proces kalibracji | [18], [47] |
| Techniki materiałowe | [13], [16], [20], [32], [58] |
| Układ znaczników | [1], [71], [82], [94] |
| Dobór ustawień kamer | [61], [84] |

2.5 Podsumowanie

W niniejszym rozdziale zaprezentowane i omówione zostały podstawowe systemy przechwytywania ruchu. Szczególną uwagę poświęcono systemom optycznym, działającym w oparciu o markery pasywne, z uwagi na ich istotność w kontekście sformułowanego tematu pracy badawczej. Systemy te zostały scharakteryzowane oraz podzielone na trzy podstawowe klasy — bezznacznikowe, z użyciem markerów aktywnych oraz z użyciem markerów pasywnych. W dalszych rozważaniach skupiono się na budowie systemów z użyciem markerów pasywnych, w tym omówiono budowę kamery, stacji roboczej oraz strukturę samych znaczników. Przeanalizowano ponadto cykl korzystania z systemów przechwytywania ruchu, począwszy od odpowiedniego usytuowania kamer, przez proces kalibracji i konstruowania bryły sztywnej, aż po akwizycję i przetworzenie danych do postaci przestrzeni trójwymiarowej. Z uwagi na

rolę materiałów retro refleksyjnych w prowadzonych badaniach, zagadnienia z nimi związane również zostały omówione. Dokonano ich charakterystyki oraz podziału na dwie podstawowe techniki wykonania. Bardzo istotnym punktem rozdziału jest prezentacja aktualnego stanu wiedzy na temat prac badawczych, dotyczących systemów przechwytywania ruchu. Jako, że badania nad rozwojem tych systemów są prowadzone na wielu płaszczyznach, dokonano ich podziału oraz omówienia wybranych prac, które zdaniem autora są warte uwagi. Zostały one odpowiednio zakwalifikowane do jednej z pięciu kategorii — usytuowania kamer, procesu kalibracji, technik materiałowych, układu znaczników oraz doboru ustawień kamer.

Badacze pracujący nad poprawą usytuowania kamer udowodnili, że proces ten może zostać zautomatyzowany i możliwa jest optymalizacja układu kamer pod kątem danego zastosowania, w tym uwzględniając przeszkody obecne w przestrzeni roboczej. Niestety wyniki prac w znacznej mierze opierają się na symulacjach i nie zostały dostatecznie zweryfikowane w sposób empiryczny. Istotną wadą proponowanych rozwiązań jest ponadto uzależnienie czasu obliczeń od liczby aktywnych kamer, co komplikuje zastosowanie prezentowanych metod w systemach o znacznej ich liczbie. Pewnym ograniczeniem jest także brak uwzględnienia czynników środowiskowych i ich wpływu na układ kamer w kontekście uzyskania optymalnego rozmieszczenia.

W pracach odnoszących się do procesu kalibracji pokazano, że możliwym jest polepszenie procentowego pokrycia przestrzeni roboczej na etapie kalibracji, co pozwala na uzyskanie lepszej jakości śledzenia obiektów. Pokazano również, że wykrycie nieprawidłowości w tym procesie jest możliwe już na poziomie samej kalibracji. Pozwala to na szybką ich detekcję oraz poprawę błędów. Istotny brak stanowi ograniczona możliwość dokonania globalnej oceny jakości kalibracji systemu lub systemów z uwagi na brak definiowanych metryk oraz kryteriów porównawczych.

Techniki materiałowe stanowią bardzo istotny punkt badań. Naukowcy wykazali wpływ zużycia materiałów retro refleksyjnych na ich widoczność oraz potwierdzili zależności kątowe tych materiałów w odniesieniu do użytej techniki wykonania. Analizy dedykowane systemom przechwytywania ruchu stanowią jednak niszę. To samo dotyczy braku kompleksowego przeglądu materiałów retro refleksyjnych dostępnych na rynku oraz wpływu tych materiałów – użytych jako znaczniki – na lekkie jednostki latające o ograniczonej nośności. Uwaga ta odnosi się przede wszystkim do widoczności oraz masy markerów.

Znaczny postęp notowany jest w pracach nad optymalizacją układu znaczników na bryle sztywnej. Autorzy badań pokazali możliwość automatyzacji tego procesu, przy zapewnieniu wysokiej widoczności nie tylko pojedynczych markerów, ale także całej bryły sztywnej. Co więcej wykazano, że dla indywidualnego obiektu, możliwe jest uzyskanie wielu, różnych kombinacji markerów, co zapewnia rozróżnialność brył sztywnych. Słabość badań stanowi ograniczona walidacja na sprzęcie i obiektach rzeczywistych — większość prezentowanych wyników, to wyniki symulacyjne.

Dobór ustawień kamer stanowi najmniej eksplorowany obszar badawczy. Naukowcy przeanalizowali wpływ ustawień (w tym sprzętowych) na wyjście kamery oraz podjęli się analizy wpływu ekspozycji oraz ekspozycji i wzmocnienia na rejestrowany obraz. Badania te były jednak ograniczone do systemów o relatywnie niewielkiej liczbie

kamer oraz działających głównie w paśmie światła widzialnego. Brak jest analiz wpływu czynników środowiskowych na dobór ustawień kamer oraz modelu doboru wartości czasu ekspozycji oraz progu detekcji.

Powyższa analiza stanowi motywację oraz punkt wyjścia do pracy badawczej, zrealizowanej oraz opisanej w niniejszej rozprawie.

Charakterystyka prac badawczych

Rozwój systemów przechwytywania ruchu wymaga dobrego zrozumienia sposobu ich działania oraz problematyki badawczej z nimi związanej. Wszystkie kierunki rozwoju wskazane w poprzednim rozdziale są bardzo istotne, choć w ujęciu lekkich jednostek latających można wskazać dwa najistotniejsze. Są nimi dobór ustawień kamer oraz techniki materiałowe. To one wpływają bezpośrednio na możliwość zmniejszenia narzutu systemu przechwytywania ruchu na te roboty, ograniczając masę markerów i elementów montażowych z nimi związanych. Oba te kierunki pozwalają na zapewnienie wysokiej widoczności znaczników, przy redukcji ich rozmiaru i masy. To z kolei przekłada się na zapewnienie warunków testowych bliskich, warunkom rzeczywistym dla danej jednostki.

Przed rozpoczęciem prac badawczych konieczne jest zdefiniowanie warunków i technik, które pozwolą w sposób jednoznaczny oraz powtarzalny przeprowadzić eksperymenty, a w dalszej perspektywie przenieść wyniki uzyskane w ramach jednego systemu na inne systemy tego typu. Konieczne jest również zidentyfikowanie czynników, które mogą negatywnie wpłynąć na uzyskane wyniki, wprowadzając błąd do pomiarów. Mowa tu zarówno o czynnikach środowiskowych jak i występowaniu fałszywych markerów w otoczeniu. Dopiero po usystematyzowaniu tych zagadnień, możliwe jest przejście do problematyki badawczej i zaproponowanie nowych rozwiązań.

3.1 Wskaźniki jakości

Przeprowadzenie testów w sposób pozwalający na bezpośrednie porównanie wyników, uzyskanych podczas badań różnych systemów przechwytywania ruchu, nie jest zagadnieniem prostym. Jest to związane przede wszystkim ze złożonością systemów oraz mnogością zmiennych, pojawiających się w trakcie przeprowadzania eksperymentów. Aby cel ten mógł zostać zrealizowany, zdefiniowane zostały pomocnicze wskaźniki jakości. Odnoszą się one wprost do śledzonego obiektu oraz pojedynczych markerów, użytych w procesie tworzenia bryły sztywnej [69]. Są to kolejno *overall quality index* (I_{track}), *overall markers visibility index* ($I_{\text{vis-all}}$) oraz *single camera visibility index* ($I_{\text{vis-cam}}$). Wartość wynikowa każdego ze wskaźników wyrażona jest w procentach.

Pierwszy z nich – *overall quality index* (3.1) – odnosi się do widoczności obiektu (bryły sztywnej) w trakcie trwania eksperymentu. Wskazuje na czas, przez jaki obiekt był prawidłowo śledzony, czyli można było odczytać jego położenie oraz orientację. Oczekiwane są wartości bliskie lub równe 100%.

$$I_{\text{track}} = \frac{f_{\text{trb}}}{f_{\text{all}}} \cdot 100 [\%] \quad (3.1)$$

Użyte oznaczenia to kolejno: f_{trb} – liczba klatek obrazu, w których obiekt był śledzony; f_{all} – liczba wszystkich zarejestrowanych klatek obrazu.

Drugi wskaźnik to *overall markers visibility index* (3.2). Odnosi się do średniej widoczności markerów tworzących bryłę sztywną. Istotny jest fakt, że nawet w przypadku, gdy bryła sztywna nie może zostać prawidłowo zrekonstruowana, wartość wskaźnika jest liczona.

$$I_{\text{vis-all}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^C mv(i, t)}{C \cdot M_{\text{rb}}} \cdot 100 [\%] \quad (3.2)$$

Użyte oznaczenia to kolejno: C – liczba aktywnych kamer w systemie; $mv(i, t)$ – funkcja zwracająca liczbę widocznych markerów przez i -tą kamerę w czasie t (numer klatki); M_{rb} – liczba markerów użytych do zdefiniowania bryły sztywnej.

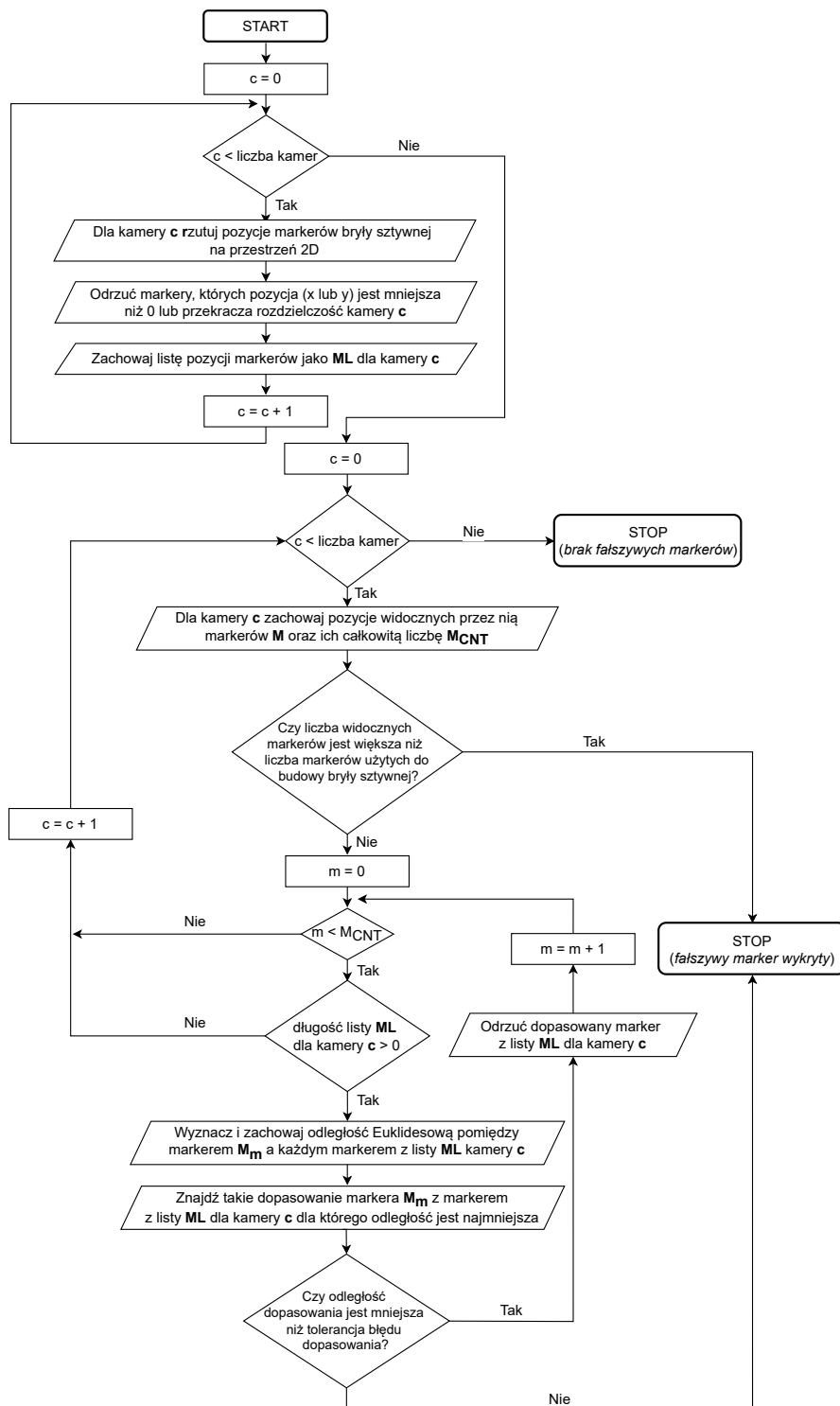
Wskaźnik *single camera visibility index* (3.3) stanowi zmodyfikowaną wersję drugiego wskaźnika. Tutaj wartość wynikowa odnosi się tylko i wyłącznie do pojedynczej kamery (c_i), a nie do średniej systemu. Pozwala to na identyfikację, która z kamer nie jest w pełni wykorzystana w procesie śledzenia, na przykład z powodu złego usytuowania, niepoprawnie zdefiniowanego scenariusza testu lub źle dobranych znaczników.

$$I_{\text{vis-cam}}(c_i, t) = \frac{mv(c_i, t)}{M_{\text{rb}}} \cdot 100 [\%] \quad (3.3)$$

3.2 Mechanizm wykrywania fałszywych znaczników

Pojawianie się fałszywych markerów w przestrzeni roboczej jest zjawiskiem dość powszechnym. Niekiedy zdarza się, że występują one tylko okresowo, a ich lokalizacja jest trudna do określenia. W niektórych przypadkach, takie znaczniki mogą zmniejszać widoczność markerów tworzących bryłę sztywną w ujęciu jednej lub kilku kamer, czasowo nakładając się na inne markery. Zaproponowanie kompleksowego rozwiązania, które zawsze wykrywałoby takie przypadki jest w praktyce bardzo trudne lub niemożliwe. Wynika to z braku możliwości przyjęcia jakiegokolwiek referencji w kontekście rozróżnienia znaczników, jak ma to miejsce w przypadku systemów aktywnych. Co więcej, ma tutaj miejsce reżim czasowy, odnoszący się do przetwarzania danych. W przypadku rejestracji obrazu z częstotliwością 250 Hz, czas na jego przetworzenie wynosi do 4 ms, co w praktyce przekłada się na jeszcze mniej,

z uwagi na konieczność pobrania danych z interfejsu programistycznego systemu przechwytywania ruchu. To dodatkowo ogranicza możliwości zastosowania rozwiązań programowych lub wymusza użycie wysoce wydajnych stacji roboczych.



Rysunek 3.1: Diagram przepływu algorytmu detekcji fałszywych znaczników.

W przypadku pojawienia się fałszywych markerów, muszą one zostać zlokalizowane, wyeliminowane, a dotychczas przeprowadzone eksperymenty powtórzone. Konieczne jest więc użycie swego rodzaju systemu „wczesnego ostrzegania”, który to monitorując przestrzeń roboczą, odpowiednio wcześniej poinformuje o wystąpieniu anomalii i uniemożliwi kontynuację eksperymentów. Ważne jest, aby system działał w sposób możliwie autonomiczny. Efektem przeprowadzonych analiz jest propozycja metody wykrywania fałszywych markerów w przestrzeni roboczej (rys. 3.1). Jej użycie jest ograniczone do pojedynczego obiektu. Bazuje ona na układzie znaczników definiujących bryłę sztywną. Charakteryzuje się wysoką skutecznością wykrywania fałszywych znaczników, informując o ich wystąpieniu. Niestety użycie jest ograniczone tylko do przypadków, w których obiekt jest śledzony.

Proponowana metoda działa w oparciu o położenie markerów w przestrzeni 2D tworzących bryłę sztywną, indywidualnie dla każdej z kamer. Jako, że dany marker może nie być widoczny w danej chwili przez wszystkie kamery, musi on zostać odfiltrowany⁴. Następnie, dla każdej kamery zapisywane są współrzędne widocznych przez nią markerów. Współrzędne te są kolejno dopasowywane przy użyciu odległości euklidesowej z położeniem markerów bryły dla danej kamery. Jeśli minimalne wartości odległości zostaną przyporządkowane w ramach zadanej tolerancji błędu dopasowania⁵ to uznaje się, że fałszywe markery (w ramach danej kamery) nie występują. Proces ten musi zostać powtórzony dla każdej z kamer oraz dla każdej klatki zarejestrowanego obrazu.

Jako że znane jest położenie fałszywego markera w obrębie pojedynczej kamery, system ten może zostać rozszerzony o mechanizm wizualizujący dokładne miejsce jego wykrycia. Informacja taka może zostać naniesiona wprost na klatkę obrazu, co umożliwi odszukanie miejsca w przestrzeni roboczej i jego fizyczne zamaskowanie lub — o ile możliwe — zastosowanie odpowiedniej filtracji na poziomie oprogramowania. Na podstawie doświadczeń autora stwierdzić można, że lepsze rozwiązanie stanowi fizyczne maskowanie fałszywych markerów, co potwierdziły eksperymenty przeprowadzone z udziałem manipulatora Kuka (rys. 4.5).

3.3 Składowe środowiskowe, temperatura kamer

Systemy przechwytywania ruchu z natury są podatne na zakłócenia zewnętrzne. Mnogość czynników mogących pośrednio lub bezpośrednio wpływać na proces akwizycji danych jest w znacznej mierze zależna od środowiska, w którym system jest używany. Zakłócenia te mogą skutkować zarówno spadkiem dokładności pozycjonowania jak i ograniczeniem widoczności markerów.

W literaturze oraz dokumentacjach producentów [52, 63, 77, 89] znaleźć można listę czynników środowiskowych, negatywnie wpływających na wyjście systemów. Wśród nich wyróżnione zostały temperatura otoczenia oraz jej zmienność, wilgotność

⁴Współrzędne znacznika będą poza zakresem rozdzielczości kamery.

⁵Wartość ta musi zostać wyznaczona empirycznie, uwzględniając prędkość obiektu oraz częstotliwość pracy systemu przechwytywania ruchu.

powietrza, dostęp światła słonecznego, sposób montażu kamer i stałość pozycji kamer, w tym aspekt rozszerzalności cieplnej mocowań. Wskazane zostały także wytyczne co do temperatury roboczej kamer. Wpływ temperatury na urządzenie rejestrujące jest powszechnie znany, jednak nie są znane jej skutki.

W ramach prowadzonych prac, podjęto się analizy zagadnienia temperatury kamer, jako że jest ono niejako zmarginalizowane w literaturze. Motywacją do podjęcia się tego tematu były rozbieżności w wynikach eksperymentów prowadzonych w sesjach, przez kilka lub kilkanaście dni. Wyniki te powinny być powtarzalne i porównywalne, jednak w niektórych przypadkach różniły się od siebie znacząco. Po etapowej weryfikacji kolejnych elementów składowych systemu, pozostał jeden, którym była temperatura samych kamer. Postanowiono przyjrzeć się temu zagadnieniu bliżej.

Prace obejmowały kolejno analizę wpływu temperatury na widoczność markerów, w tym czas nagrzewania i chłodzenia się kamer dla przypadków kiedy to akwizycja danych jest aktywna i nieaktywna, oraz wpływu temperatury na pozycjonowanie markerów. Przed rozpoczęciem badań system został rozgrzany do temperatury roboczej, skalibrowany oraz wychłodzony⁶. Warto zaznaczyć, że temperatura robocza kamer jest zależna od temperatury otoczenia, wilgotności, ruchu powietrza oraz wybranej częstotliwości rejestracji danych. W przypadku systemów NaturalPoint OptiTrack, temperatura robocza kamer wynosi 40°C-50°C lub 25°C powyżej temperatury otoczenia [51]. Utrzymanie odpowiedniej temperatury podczas testów jest bardzo istotne z punktu widzenia powtarzalności testów.

3.3.1 Widoczność markerów a temperatura kamer

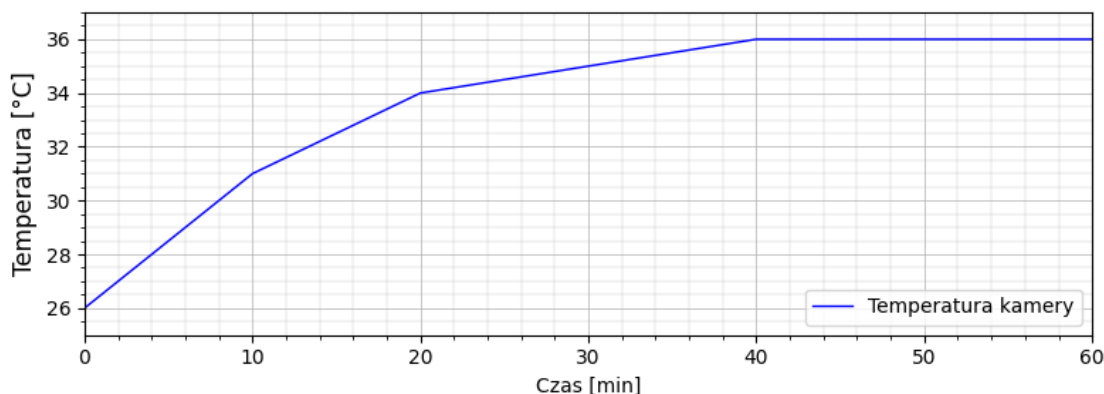
Widoczność markerów jest istotna z punktu widzenia rekonstrukcji bryły sztywnej. Rozmiar markera, gdy jest on rzutowany na płaszczyznę 2D, jest zmienny i zależy między innymi od odległości znacznika od kamery. Oznacza to, że markery o większym polu powierzchni⁷ mogą być widoczne z większej odległości. Istotnym jest więc uzyskanie dużego pola powierzchni oraz stabilnych jego pomiarów. Aby lepiej zrozumieć jak temperatura wpływa na rozmiar znacznika i jak szybko temperatura zmienia się podczas aktywności systemu, rozważone zostały dwa scenariusze. Pierwszy z nich odnosi się do procesu nagrzewania kamer, drugi do ich chłodzenia.

Nagrzewanie kamer

Badania związane z procesem nagrzewania kamer i widocznością markerów składały się z trzech etapów — pierwszy etap obejmował sytuację, kiedy to kamery były tylko podłączone do zasilania, ale żadne dane nie były rejestrowane (nie odbywała się komunikacja z kamerami), drugi etap zakładał, że dane są rejestrowane, a trzeci dodatkowo analizował wpływ liczby widocznych markerów na szybkość procesu nagrzewania się kamer. Temperatura otoczenia wynosiła $(25,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$.

⁶System przechwytywania ruchu został wyłączony na około 24 godziny.

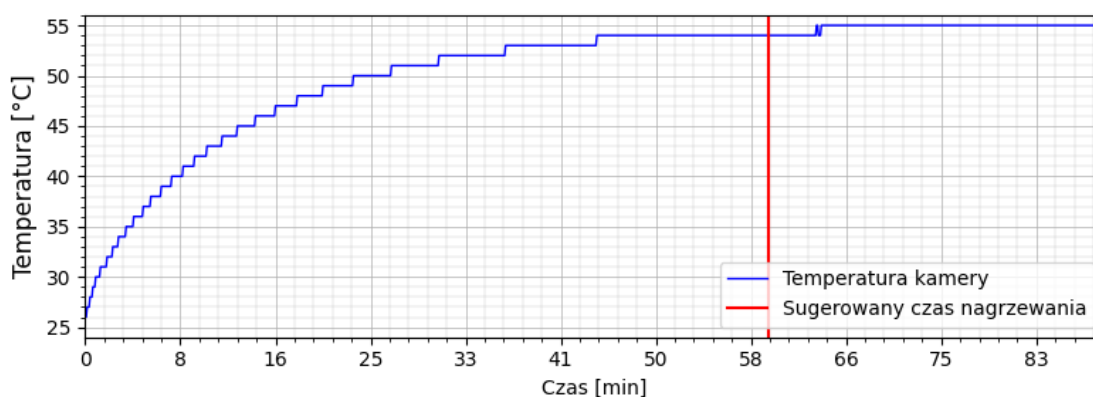
⁷Nie zawsze jest to tożsame z fizyczną średnicą znacznika.



Rysunek 3.2: Zmiana temperatury w czasie gdy system był podłączony do zasilania i rejestracja danych nie była aktywna. Z uwagi na bardzo powolny wzrost temperatury, liczba pomiarów została ograniczona w celu zapewnienia czytelności wykresu.

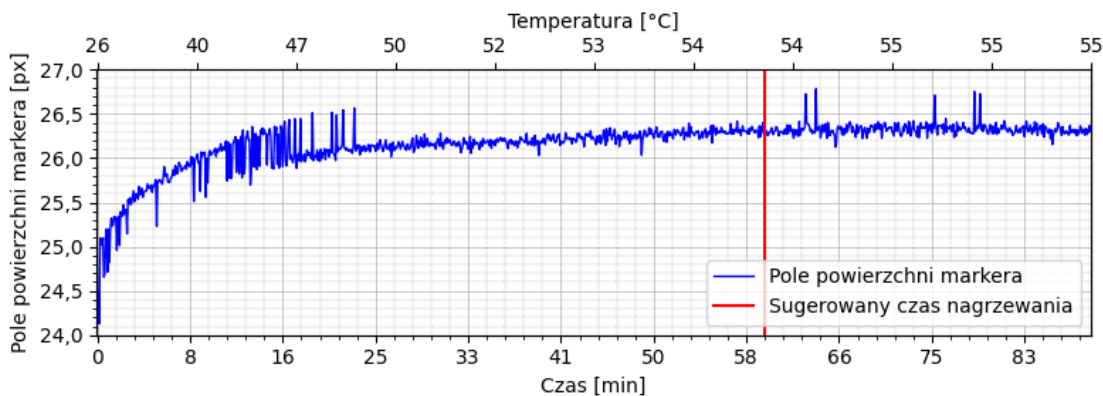
Wyniki dla wariantu pierwszego zostały przedstawione na rysunku 3.2. Wzrost temperatury był bardzo powolny, a temperatura robocza kamery nie została osiągnięta. Z tego też powodu, wykres został ograniczony czasowo do pierwszych 60 minut testu z krokiem 10 minut, co zapewnia czytelność. Niemożliwym okazała się tutaj analiza wpływu temperatury na rozmiar znacznika, gdyż kryteria warunków roboczych nie zostały spełnione. Powyższe pokazuje, że pozostawienie systemu „podłączonego do zasilania” na zadany czas (tutaj 60 minut) jest niewystarczające w kontekście jego gotowości do testów.

Drugi wariant zakładał, że pomiary zostaną zrealizowane podczas aktywności systemu. Do tego celu wykorzystano pojedynczy, oryginalny znacznik firmy OptiTrack o średnicy 12,7 mm. Testowana kamera osiągnęła temperaturę roboczą po około 25 minutach, a temperatura ustabilizowała się w pełni po około 64 minutach (rys. 3.3).



Rysunek 3.3: Zmiana temperatury w czasie gdy system był podłączony do zasilania i rejestracja danych była aktywna.

Jak pokazano na rysunku 3.4, pole powierzchni markera zmieniało się w trakcie



Rysunek 3.4: Zmiana pola powierzchni markera w trakcie testu. Temperatura kamery ma wpływ na pole powierzchni, a tym samym może ograniczać widoczność znacznika, gdy jest zbyt niska. Rozmiar użytego markera to 12,7 mm.

trwania testu. Poniżej temperatury roboczej, wartość znacząco oscylowała i była mocno zaszumiona. Cecha ta jest szczególnie istotna w kontekście mniejszych markerów, gdzie zbyt niska temperatura będzie ograniczała ich widoczność, a w konsekwencji może dojść do sytuacji, w której zostaną one odfiltrowane podczas *post-processingu*. Co więcej, znacząca fluktuacja rozmiaru może prowadzić do zmiany środka wykrytego markera, co przełoży się na dokładność jego pozycjonowania.

Trzeci wariant zakładał zbadanie wpływu liczby widocznych markerów na czas nagrzewania się kamer. Jako, że liczba wykrytych markerów ma wpływ na ilość danych przetwarzanych po stronie kamery jak i transmitowanych przez sieć (tab. 3.1), zaistniało prawdopodobieństwo, że większa liczba znaczników może skrócić czas uzyskania temperatury operacyjnej. Testy obejmowały przypadki, w których to widoczne były następujące liczby markerów: 0, 1, 2, 3, 7. Różnice w temperaturze, po czasie 60 minut dla liczby markerów 0 oraz 7, wynosiły do 2°C, co bardziej wskazuje na błąd pomiaru lub czynniki środowiskowe, niż na rzeczywisty wpływ liczby znaczników na czas nagrzewania się kamery. Uzyskane krzywe były podobne do tej, przedstawionej na rysunku 3.3.

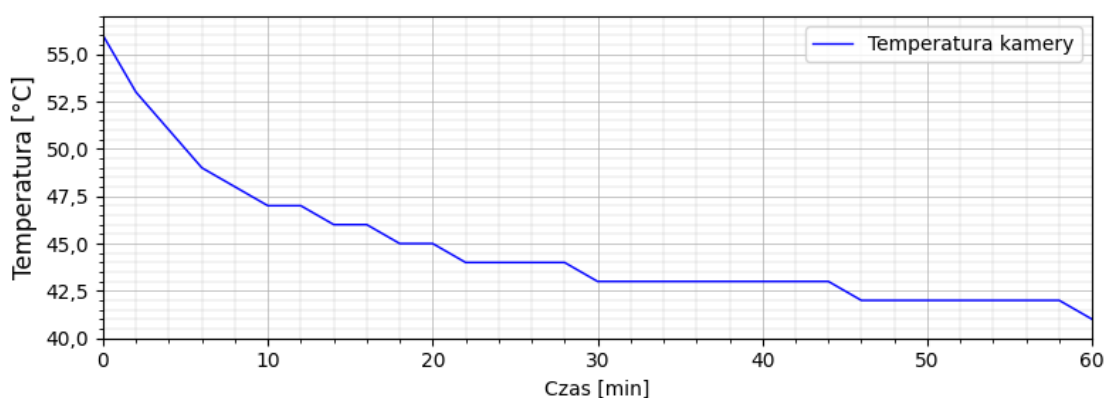
Tabela 3.1: Ilość danych transmitowanych przez pojedynczą kamerę w zależności od wybranej częstotliwości rejestrowania danych oraz liczby widocznych markerów. Dane odnoszą się do kamer OptiTrack Prime^x 13W. Wartości zostały wyrażone w KB/s.

| Częstotliwość [Hz] | Ilość transmitowanych danych [KB/s] | | | | |
|-----------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|
| | Liczba znaczników | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 7 |
| 50 | 2,0 | 3,0 | 4,1 | 5,2 | 9,5 |
| 100 | 3,9 | 6,1 | 8,2 | 10,4 | 19,1 |
| 150 | 5,9 | 9,1 | 12,4 | 15,6 | 28,6 |
| 200 | 7,8 | 12,2 | 16,5 | 20,8 | 38,2 |
| 250 | 9,4 | 14,6 | 19,8 | 25,0 | 45,8 |

Chłodzenie kamer

Analiza dotycząca szybkości chłodzenia się systemu została podzielona na dwa etapy — gdy kamera jest podłączona do zasilania, jednak nie są rejestrowane żadne dane oraz gdy kamera pozostaje w spoczynku w ramach komunikacji z dedykowanym oprogramowaniem (tryb „idle”). Oba przypadki są bardzo powszechne, kiedy badacze przeprowadzają analizę zebranych danych lub wprowadzają zmiany w kodzie, pozwalającym na akwizycję danych bezpośrednio z systemu przechwytywania ruchu.

W przypadku, gdy system nie jest aktywny, spadek temperatury jest zauważalny (rys. 3.5). Już po około 6 minutach, system powinien zostać rozgrzany ponownie, a po około 10 minutach, zachodzi prawdopodobieństwo, że mogą zacząć się pojawiać fluktuacje w polu powierzchni markerów, co w konsekwencji może doprowadzić do błędów pomiarowych (spadku dokładności).

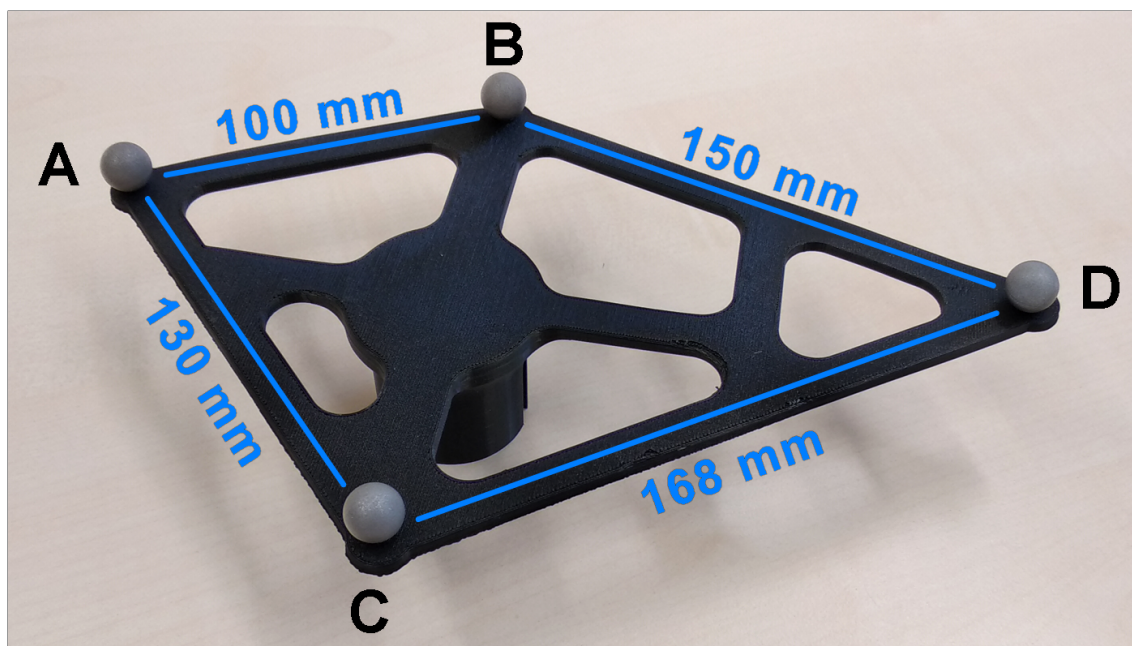


Rysunek 3.5: Zmiana temperatury w czasie gdy system był podłączony do zasilania i rejestracja danych nie była aktywna.

Drugi wariant obejmował sytuację, gdy aktywne było dedykowane narzędzie, dostarczone przez producenta kamer, a akwizycja danych została wyłączona (uruchomiono tryb edycji danych). Testy wykazały, że temperatura robocza została utrzymana i nie było potrzeby ponownego nagrzewania kamer. Co ważne, zależność ta nie dotyczy interfejsów programistycznych — tutaj spadek temperatury jest zgodny z charakterystyką omówioną w ramach pierwszego etapu.

3.3.2 Pozycjonowanie bryły sztywnej

W poprzednim rozdziale pokazano, jak temperatura kamer wpływa na widoczność znacznika (na pole jego powierzchni). Zależność ta jest o tyle istotna, że w przypadku fluktuacji wartości, istnieje prawdopodobieństwo zmiany środka znacznika, a tym samym zmiany estymacji jego położenia w przestrzeni. Na potrzeby tych oraz kolejnych badań, stworzone zostało specjalne narzędzie. Składa się ono z podstawy oraz 4 markerów o średnicy 12,7 mm firmy NaturalPoint OptiTrack. Zostało ono zaprezentowane na rysunku 3.6. Dokładne odległości w usytuowaniu markerów różniły



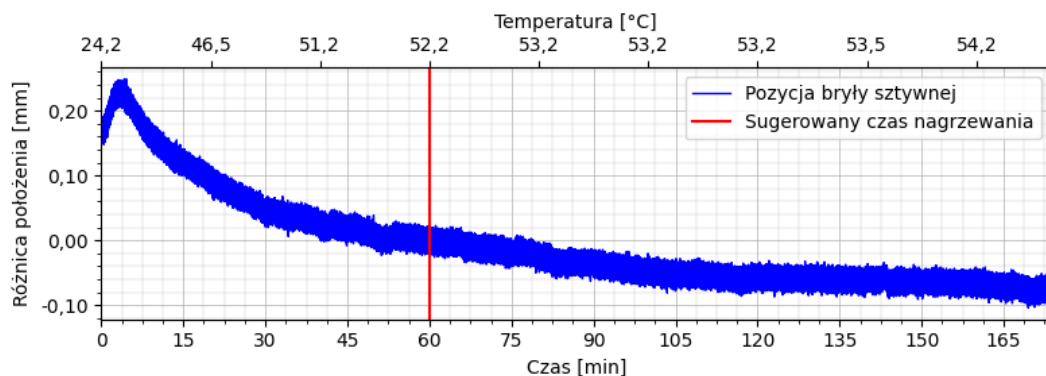
Rysunek 3.6: Narzędzie pozwalające na pomiar dokładności pozycjonowania. Zostało wykonane techniką druku 3D przy użyciu materiału PLA. Odległości pomiędzy znacznikami zostały zaznaczone na zdjęciu — są to wartości modelu 3D i mogą się one nieznacznie różnić od rzeczywistych z uwagi na proces druku.

się nieznacznie względem modelu i wynosiły odpowiednio: 100,14 mm; 129,27 mm; 148,23 mm; 167,41 mm. Rozbieżności te wynikały przede wszystkim z niedokładności procesu druku 3D. Do pomiaru użyto mikrometrów o dokładności 0,01 mm.

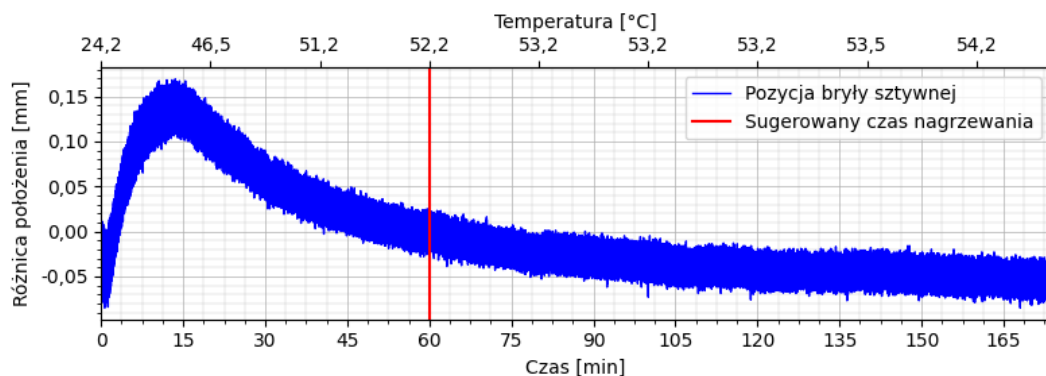
Narzędzie zostało usytuowane na podłożu i nie było przemieszczane podczas trwania testu. Spodziewany był nieznaczny dryf pomiarowy, który występuje zawsze w przypadku systemów przechwytywania ruchu. Cały eksperyment trwał 7 godzin. Z uwagi na fakt, że dryf po rozgrzaniu systemu był relatywnie nieznaczny, zaprezentowane dane zostały ograniczone do pierwszych 180 minut (rys. 3.7-3.9).

Położenie bryły sztywnej w osiach X oraz Y zmieniało się w początkowym stadium testu (po uruchomieniu systemu). Gdy osiągnięta została temperatura robocza, błąd pomiaru narastał, jednak bardzo powoli. Maksymalna różnica w położeniu, względem pozycji referencyjnej, wynosiła do 0,25 mm w osi X oraz do 0,18 mm w osi Y . Pozycję referencyjną stanowiła wartość pomiaru w momencie, gdy upłynął sugerowany czas nagrzewania systemu (60 minut). Sytuacja była nieco odmienna dla przypadku osi Z . Tutaj błąd pozycjonowania był znaczny i osiągnął ponad 2,0 mm. Dopiero po uzyskaniu temperatury roboczej, wartość położenia zaczęła się względnie stabilizować (nastąpiło spowolnienie zmiany położenia). Widoczne zjawisko dryfu — po upłynięciu sugerowanego czasu nagrzewania — jest związane z zastosowaniem przez producenta systemu, filtra Kalmana do estymacji położenia. Dryf ten mógłby zostać skompensowany, gdyby obiekt znajdował się w ruchu. Niestety przeprowadzenie takich badań okazało się być niemożliwe dla autora, gdyż wymagało użycia drugiego systemu pomiarowego, o dokładności większej niż testowany.

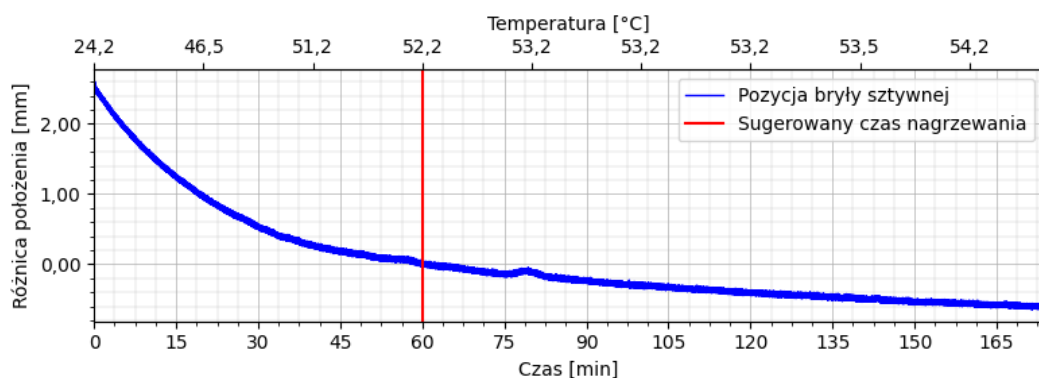
Rozwój metod śledzenia markerów pasywnych dedykowanych dla lekkich jednostek latających z wykorzystaniem optycznych systemów przechwytywania ruchu



Rysunek 3.7: Dryf pomiarowy w osi X. Dane zostały znormalizowane i ukazują różnice względem wartości pomiaru uzyskanego w momencie, gdy upłynął sugerowany czas nagrzewania systemu (60 minut).



Rysunek 3.8: Dryf pomiarowy w osi Y. Dane zostały znormalizowane i ukazują różnice względem wartości pomiaru uzyskanego w momencie, gdy upłynął sugerowany czas nagrzewania systemu (60 minut).



Rysunek 3.9: Dryf pomiarowy w osi Z. Dane zostały znormalizowane i ukazują różnice względem wartości pomiaru uzyskanego w momencie, gdy upłynął sugerowany czas nagrzewania systemu (60 minut).

3.4 Konfiguracja kamer

Poprawa widoczności znaczników oraz jakości śledzenia, wymaga specjalistycznej wiedzy oraz bardzo często fizycznego dostępu do sprzętu. Odnosi się to zarówno do zmiany usytuowania kamer jak i ingerencji w ustawienia czysto sprzętowe, takie jak ostrość czy ogniskowa kamer. Często zmiany tego typu są trudno odwracalne i powrót do poprzednich ustawień bywa bardzo czasochłonny. Z tego punktu widzenia, szczególnie w odniesieniu do mniej zaawansowanych użytkowników, sensowna wydaje się być zmiana ustawień tylko z poziomu oprogramowania, co nie niesie za sobą takich problemów, a proces ten może zostać dodatkowo zautomatyzowany.

Oprogramowanie kamer, oferowane przez znaczących producentów na rynku, pozwala na zmianę szeregu różnych ustawień. Częścią wspólną ich wszystkich są ekspozycja, próg detekcji oraz wzmocnienie. Parametry te mogą zostać dostosowane z poziomu dedykowanego oprogramowania lub interfejsu programistycznego. Wzmocnienie jako takie, często jest ściśle związane z mocą oświetlacza podczerwonego i determinuje maksymalną odległość z jakiej markery pasywne będą widoczne. Innymi słowy, jest ono dobierane między innymi do rozmiaru laboratorium, czy typu zastosowanych kamer, a nie do danego eksperymentu lub zmiennych czynników środowiska⁸. Istotne wydają się być więc dwa parametry – czas ekspozycji (EXP) oraz próg detekcji (TH). Zmiana tych parametrów w sposób nieodpowiedni może prowadzić do znacznego pogorszenia parametrów śledzenia, w tym zmniejszenia widoczności markerów, zmniejszenie dokładności pozycjonowania, czy też zwiększenia prawdopodobieństwa pojawienia się fałszywych markerów.

W niniejszej pracy [68] zaproponowano metodę automatycznego doboru wartości ekspozycji oraz progu detekcji kamer, bliskich minimum. Zostało to zrealizowane w oparciu o algorytm dziel i zwyciężaj (ang. *Divide and Conquer*) [78]. Metoda ta pozwala na uzyskanie maksymalnej widoczności markerów w sposób bardzo efektywny. Wartości są wyznaczane dla każdej kamery indywidualnie, uwzględniając tym samym składowe otoczenia, które dana kamera obserwuje. Proces doboru wartości nie wymaga nadmiernej interakcji z użytkownikiem, co pozwala z kolei na użycie rozwiązania także przez mniej doświadczonych użytkowników, nieposiadających specjalistycznej wiedzy w temacie systemów przechwytywania ruchu. Zasada działania opiera się na założeniu, że zarówno ekspozycja jak i próg detekcji stanowią przedziały, będące skończonymi zbiorami wartości. Jako, że występują tutaj zależności liniowe, algorytm dziel i zwyciężaj wydaje się być odpowiedni z uwagi na niską złożoność obliczeniową. Pamiętać należy, że rozwiązanie to dedykowane jest zastosowaniom wewnętrznym i nie było testowane poza laboratorium.

Omówienie metody zostało podzielone na 4 części, odnoszące się kolejno do algorytmów wyznaczania wartości ekspozycji oraz progu detekcji bliskich minimum, zagadnienia ekspozycji i procesu śledzenia oraz uwag ogólnych. Sformułowanie „bliskie minimum” należy rozumieć:

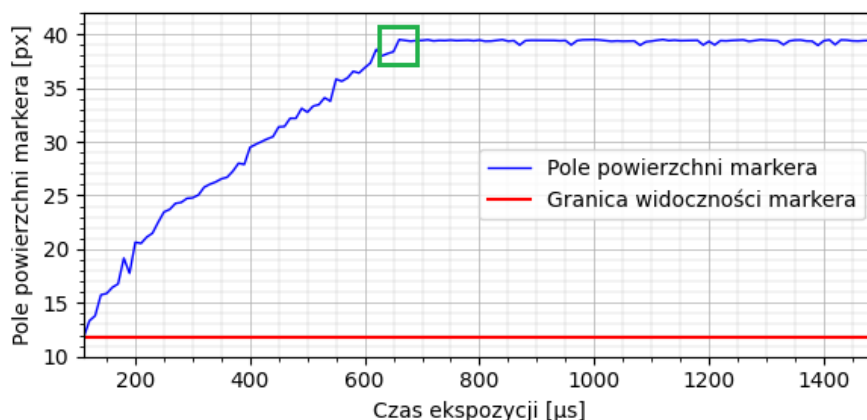
⁸Odpowiedni dobór wzmocnienia jest kluczowy, gdy testy są wykonywane blisko kamer. Zbyt duża wartość wzmocnienia może utrudnić wykrywanie markerów z uwagi na ich poświatę, a w konsekwencji nakładanie się ich na siebie.

- w przypadku ekspozycji, jako wartość poniżej której widoczność markerów jest ograniczana (zmniejsza się ich pole powierzchni) i powyżej której zwiększa się prawdopodobieństwo rozmycia obrazu i spadku dokładności śledzenia;
- w przypadku progu detekcji, jako wartość poniżej której zwiększa się prawdopodobieństwo wystąpienia fałszywych markerów lub artefaktów i powyżej której widoczność markerów jest ograniczana (zmniejsza się ich pole powierzchni).

3.4.1 Algorytm wyznaczania wartości ekspozycji bliskiej minimum

Algorytm wyznaczania wartości ekspozycji bliskiej minimum opiera się na zależności pomiędzy wartością ekspozycji kamery a rozmiarem markera (rys. 3.10). Można ją opisać przy pomocy następujących reguł:

- pole powierzchni markera zwiększa się wraz ze zwiększaniem wartości ekspozycji kamery,
- gdy pole powierzchni markera ustabilizuje się⁹, odpowiednia wartość została potencjalnie znaleziona,
- zbyt wysoka wartość ekspozycji może powodować rozmycie podczas wykonywania szybkiego ruchu.



Rysunek 3.10: Zależność pomiędzy czasem ekspozycji a polem powierzchni znacznika. Wraz ze wzrostem czasu ekspozycji, pole powierzchni również rośnie, aż do osiągnięcia punktu stabilizacji (tutaj około $650 \mu\text{s}$, co zaznaczono zielonym kwadratem). Wartość ekspozycji nie powinna znacznie przekraczać tego punktu, gdyż może to prowadzić do rozmycia obrazu podczas ruchu. Poniżej $110 \mu\text{s}$, marker nie był prawidłowo wykrywany. Test został wykonany przy liczbie klatek na sekundę równej 250. Wykorzystano do tego celu autorskie oprogramowanie.

Ogólna idea algorytmu została przedstawiona w formie pseudokodu (lis. 3.1), co pozwala na lepsze zrozumienie jego konstrukcji. Algorytm działa w dwóch fazach

⁹Niewielkie fluktuacje w wartości pola powierzchni mogą być nadal widoczne.

— fazy wykrywania górnej granicy (`expUBoundary`), używając stałej wartości kroku (`FIXED_STEP = 1000`) celem przyspieszenia procesu przeszukiwania oraz fazy wyznaczenia wynikowej wartości ekspozycji (`expCand`), przy użyciu metody dzielenia i zwyciężaj. Wartości stałe `EXP_H` oraz `EXP_PRECISE` zostały dobrane w sposób eksperymentalny. Zasady doboru są następujące. Jeśli wartość `EXP_H` będzie zbyt wysoka, algorytm może wybrać zbyt niską wartość górnej granicy. Dla przykładu, jeśli `EXP_H` przyjmie wartość 20,0 to istnieje wysokie prawdopodobieństwo, że algorytm zakończy działanie w pierwszym kroku, jako że różnica w polu powierzchni markera między bieżącą wartością a bieżącą wartością+`FIXED_STEP` spełni warunek, o którym mowa. W przypadku wartości zbyt niskiej (np. 0,001), istnieje ryzyko że algorytm osiągnie bardzo wysoką wartość górnej granicy. Nie będzie to miało negatywnego wpływu na ostateczny wynik, jednak wydłuży czas poszukiwań wartości ekspozycji. Jeśli wartość `EXP_PRECISE` będzie zbyt wysoka, istnieje szansa, że algorytm zatrzyma się zanim odpowiednia wartość zostanie odnaleziona. Dla przykładu, jeśli `EXP_PRECISE` przyjmie 5,0 a największe pole powierzchni markera wyniesie 40 pikseli, algorytm zatrzyma się na wartości około 35 pikseli. W przeciwnym wypadku, jeśli wartość będzie zbyt niska, zachodzi wysokie prawdopodobieństwo, że algorytm nigdy nie zakończy działania z uwagi na występujący szum pomiarowy¹⁰. Jeśli `EXP_PRECISE` będzie równe np. 0,001 to czas przeszukiwania znacząco się wydłuży, a co więcej, algorytm może nigdy nie zakończyć działania z uwagi na wzmiankowany szum pomiarowy.

W listingu 3.1 przedstawione zostały dwie metody wirtualne (niezależne od platformy). Są to `setExpValueOnCamera` pozwalająca na zastosowanie zadanej wartości ekspozycji dla wskazanej kamery oraz `getAverageAreaOfMarker`, która zwraca średnią wartość pola powierzchni znacznika. Średnia ta powinna zostać wyznaczona w oparciu o kilka lub kilkanaście próbek (10-15 próbek jest zazwyczaj wystarczające).

Listing 3.1: Pseudokod algorytmu wyznaczania wartości ekspozycji bliskiej minimum. Kod musi zostać uruchomiony niezależnie dla każdej kamery.

```
1  const float EXP_H = 0.5, EXP_PRECISE = 1.0;
2  const int FIXED_STEP = 1000;
3
4  int expLBoundary = 1, expUBoundary = 0, tempExp = 250;
5  float baseMarkerSize = 0.0;
6
7  while (true) {
8      float markerSize = getAverageAreaOfMarker();
9      if (markerSize - baseMarkerSize < EXP_H) {
10         expUBoundary = tempExp;
11         break;
12     } else {
13         baseMarkerSize = markerSize;
14         tempExp = tempExp + FIXED_STEP;
15         setExpValueOnCamera(tempExp); } }
16
17 while (true) {
18     int expCand = (expLBoundary + expUBoundary) / 2;
19     setExpValueOnCamera(expCand);
20
21     float markerSize = getAverageAreaOfMarker();
22
23     if (baseMarkerSize - markerSize < EXP_PRECISE) {
```

¹⁰Podczas pomiarów zawsze widoczne będą pewne fluktuacje w polu powierzchni markerów.

```
24     expUBoundary = expCand;
25   } else {
26     expLBoundary = expCand; }
27
28   if (expUBoundary - expLBoundary < 2) {
29     expCand = expLBoundary;
30     print(expCand);
31     break; } }
```

Podczas pierwszej fazy pracy, algorytm próbuje znaleźć wartość ekspozycji, dla której zmiana pola powierzchni znacznika będzie poniżej EXP_H. Gdy zostanie ona wyznaczona, zachowuje ją jako górną granicę przedziału poszukiwań i przechodzi do fazy drugiej. Druga faza obejmuje wyznaczenie wartości średniej z górnej i dolnej wartości przedziału oraz odczytanie pola powierzchni markera. Jeśli pole powierzchni jest mniejsze niż największa znaleziona dotychczas wartość (`baseMarkerSize`) lub nie ulega ono zmianie, następuje modyfikacja odpowiedniej granicy przedziału. W przypadku, gdy różnica pomiędzy granicami jest mniejsza niż 2, wtedy przyjmuje się znalezioną wartość jako wartość ekspozycji i algorytm kończy działanie¹¹.

3.4.2 Algorytm wyznaczania wartości progu detekcji bliskiej minimum

Zastosowanie metody wyznaczania wartości progu detekcji bliskiej minimum, musi zostać poprzedzone uruchomieniem algorytmu wyznaczania wartości ekspozycji, z uwagi na fakt, że algorytm ten korzysta z wartości ekspozycji, będących wyjściem algorytmu z rozdziału 3.4.1. Pseudokod rozwiązania został przedstawiony jako listing 3.2. Należy pamiętać, że zmienna `expCand` przyjmuje wartość, będącą wynikiem działania poprzedniego algorytmu. Istotna jest również zmienna `TH_PRECISE`, związana z czułością metody. Jeśli wartość ta jest zbyt mała (np. 0,001) to istnieje ryzyko, że początkowa górna granica przedziału stanie się wartością końcową progu detekcji, co nie jest pożądane. Wynika to z faktu, że początkowa górna granica bardzo często stanowi jednocześnie granicę widoczności markerów. Zbyt duża wartość (np. 10,0) może skutkować bardzo dobrą widocznością znaczników, jednak jednocześnie, pojawianiem się fałszywych markerów. Wartość zbliżona do 2,0 wydaje się być wartością najbardziej odpowiednią.

W ramach algorytmu zdefiniowana została jedna, dodatkowa zmienna wirtualna `getAverageMarkerCount`, zwracająca średnią liczbę markerów widocznych w określonym czasie próbkowania. Jeśli wartość ta jest równa 1,0 to oznacza, że znacznik był prawidłowo widoczny w każdej zarejestrowanej próbce. Jeśli wartość będzie poniżej 1,0 wtedy marker był niewidoczny przez pewien czas lub stał się całkowicie niewidoczny. Wartości powyżej 1,0 oznaczają pojawienie się fałszywych znaczników. Teoretycznie, może zaistnieć taka sytuacja, w której to metoda zwróci wartość 1,0, pomimo że w jednej klatce pojawią się dwa znaczniki (w tym jeden fałszywy), a w innej nie będzie żadnego. Ten przypadek był rozpatrywany podczas badań i nigdy nie miał miejsca.

¹¹Wartość mniejsza niż 2, oznacza że obszar przeszukiwań zawiera tylko jeden element lub granice są identyczne.

Listing 3.2: Pseudokod algorytmu wyznaczania wartości progu detekcji bliskiej minimum. Kod musi zostać uruchomiony niezależnie dla każdej kamery.

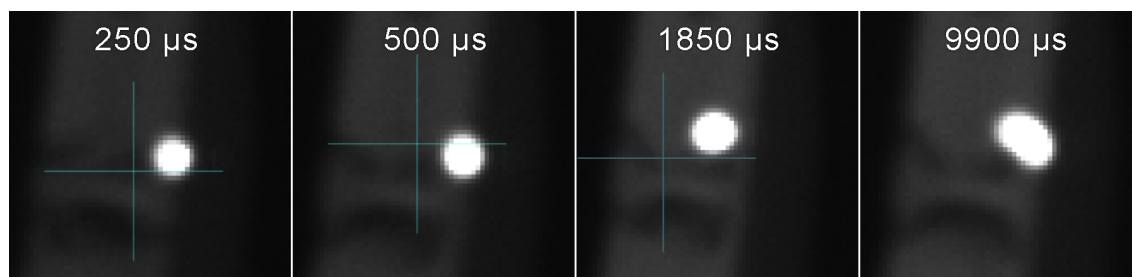
```
1 // expCand = wynik wartosci ekspozycji bliskiej minimum
2 const int CAMERA_EXP = expCand;
3 const float TH_PRECISE = 2.0;
4
5 int thLBoundary = 1, thUBoundary = 240;
6 int tmpLBoundary = 1, tmpUBoundary = 240;
7 int tmpBoundary = 120;
8
9 float baseMarkerSize = 0.0;
10
11 setExpValueOnCamera(CAMERA_EXP);
12
13 while (true) {
14     float markerCount = getAverageMarkerCount();
15
16     if (markerCount == 1.0) {
17         if (tmpUBoundary - tmpLBoundary < 2) {
18             thUBoundary = tmpBoundary;
19             break; }
20     } else if (markerCount < 1.0) {
21         tmpUBoundary = tmpBoundary;
22     } else {
23         tmpLBoundary = tmpBoundary; }
24
25     tmpBoundary = (tmpLBoundary + tmpUBoundary) / 2;
26     setThValueOnCamera(tmpBoundary); }
27
28 baseMarkerSize = getAverageAreaOfMarker();
29
30 while (true) {
31     int thCand = (thLBoundary + thUBoundary) / 2;
32     setThValueOnCamera(thCand);
33
34     float markerCount = getAverageMarkerCount();
35     float markerSize = getAverageAreaOfMarker();
36
37     if (markerCount > 1.0) {
38         thLBoundary = thCand;
39         continue;
40     } else {
41         if (markerSize - baseMarkerSize < TH_PRECISE) {
42             thUBoundary = thCand;
43         } else {
44             thLBoundary = thCand; }
45
46         if (thUBoundary - thLBoundary < 2) {
47             expCand = thUBoundary;
48             print(thCand);
49             break; } } }
```

Pierwszym krokiem w pozyskaniu wartości progu detekcji jest wyznaczenie górnej granicy poszukiwań. Jest to ważne, gdyż w przypadku różnych częstotliwości pracy kamer, zależność widoczności markerów od wartości progu detekcji będzie różna. Etap ten bazuje na widoczności znaczników, jako że w przypadku błędnie dobranego progu detekcji, znacznie łatwiejsze jest uzyskanie klatki obrazu bez żadnych markerów lub z wieloma znacznikami fałszywymi. Kiedy górna granica przedziału jest znana, wartość progu detekcji bliska minimum może zostać wyznaczona. Przedział jest określany w oparciu o rozmiar markera oraz liczbę fałszywych znaczników, występujących w przestrzeni roboczej. Algorytm zapewnia, że tylko jeden (właściwy) znacznik jest

widoczny. Dokonuje się tego poprzez zwiększanie wartości dolnej granicy przedziału, gdy pojawiają się fałszywe znaczniki. Jest to ściśle związane z zasadą, że zmniejszanie wartości progu detekcji, wpływa na zwiększenie liczby fałszywych markerów w otoczeniu. Ostatecznie, gdy różnica pomiędzy górną a dolną granicą przedziału jest mniejsza niż 2, wartość progu detekcji bliska minimum zostaje wyznaczona (thCand).

3.4.3 Ekspozycja i proces śledzenia

Dobór wartości ekspozycji jest bardzo ważny, jako że może on oddziaływać zarówno na widoczność jak i proces pozycjonowania znacznika. Podczas prowadzonych badań, wykonano kilka dodatkowych eksperymentów, aby dogłębnie przeanalizować to zagadnienie. Były one związane z efektem rozmycia (ang. *blurring effect*) oraz dokładnością pozycjonowania bryły. Rozpatrzone zostały przypadki czasu ekspozycji, powyżej wartości domyślnej¹².



Rysunek 3.11: Wpływ ekspozycji na widoczność markera. Płaski marker został zamocowany na rotorze małej jednostki latającej, przytwierdzonej do stojaka. Wartość ciągu była stała (10%), co przekładało się na około 30 obrotów na sekundę. Krzyżyk wskazuje, gdzie OptiTrack widział marker przy tej prędkości. Dla wartości poniżej $100 \mu\text{s}$ marker nie był widoczny.

Analiza efektu rozmycia dotyczyła dwóch przypadków. Pierwszy obejmował szybki ruch pojedynczego płaskiego markera, przy rejestracji obrazu z częstotliwością 50 Hz (rys. 3.11). Uzyskane wyniki potwierdzają, że zbyt wysokie wartości ekspozycji, w połączeniu z szybko wykonywanym ruchem, skutkują rozmyciem i ograniczają możliwości detekcji pojedynczych markerów, a tym samym rekonstrukcję bryły sztywnej. Co więcej, może to prowadzić do znacznego błędu przy pozycjonowaniu obiektu. Drugi przypadek to przelot dronem z prędkością ograniczoną do 4 m/s (z uwagi na wytyczne bezpieczeństwa). Bryła sztywna została utworzona przy użyciu 4 markerów sferycznych $\varnothing 12,7$ mm, a lot był rejestrowany z prędkością 250 klatek na sekundę (tab. 3.2). Potwierdzono, że przy wyższych częstotliwościach pracy kamer, wpływ błędnie dobranej wartości ekspozycji na pomiar jest mniejszy. Rozmycie w pierwszej kolejności skutkuje owalizacją markera, a tym samym niedokładnością w wyznaczeniu jego środka. Zauważono, że przy kolistości poniżej 60%-70% możliwości użycia danego markera w procesie rekonstrukcji stają się mocno ograniczone. W obu przypadkach wartość progu detekcji została ustawiona na 200.

¹²W przypadku systemu NaturalPoint OptiTrack i kamer Prime^x13W jest to wartość $250 \mu\text{s}$.

Tabela 3.2: Wpływ ekspozycji na widoczność markerów. Najbardziej odpowiedni czas ekspozycji znajdował się w okolicach $600 \mu s$ i został zaznaczony kolorem szarym. Powyżej tej wartości wskaźniki jakości zmieniały się nieznacznie. Zbyt długi czas ekspozycji w połączeniu z szybkim ruchem może prowadzić do rozmycia, czego efektem będzie spadek wartości wskaźników. Wyniki zostały wyrażone w procentach (%).

| Ekspozycja [μs] | I_{track} [%] | $I_{\text{vis-all}}$ [%] | | |
|---------------------------|---------------------------|--------------------------|-------|------|
| | | Min. | Maks. | Śr. |
| 140 | 100,0 | 53,5 | 73,1 | 62,1 |
| 250 | 100,0 | 58,4 | 78,0 | 61,9 |
| 500 | 100,0 | 68,8 | 86,9 | 68,8 |
| 600 | 100,0 | 71,3 | 90,5 | 71,3 |
| 1000 | 100,0 | 71,2 | 91,7 | 71,2 |

Pomiary dokładności pozycjonowania zostały przeprowadzone w sposób statyczny oraz dynamiczny przy użyciu dedykowanego narzędzia (rys. 3.6, na stronie 49). Pomiary statyczne odnosiły się do bryły sztywnej usytuowanej na podłodze laboratorium. Testy dynamiczne obejmowały ruch, w którym położenie oraz orientacja narzędzia były zmieniane. Eksperymenty zostały przeprowadzone dla częstotliwości pracy kamer 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz oraz 250 Hz. Testy przeprowadzono dla wartości domyślnych systemu¹³ oraz dla uśrednionych wartości wynikowych, wyznaczonych przez algorytmy (tab. 3.3). Eksperymenty miały na celu określić średnią różnicę w odległości pomiędzy znacznikami na narzędziu, a wartością zmierzoną przez system przechwytywania ruchu w trakcie danego testu. Różnice w przypadku ustawień domyślnych wynosiły do 0,22 mm, a w przypadku ustawień uśrednionych do 0,10 mm. Wyniki uzyskane w testach dynamicznych były nieco odmienne. Tutaj, różnice wynosiły do 0,23 mm w przypadku ustawień domyślnych oraz do 0,35 mm w przypadku ustawień uśrednionych. Należy przy tym zauważyć, że teoretyczna dokładność systemu, wskazana przez producenta, wynosi $\pm 0,3$ mm.

Tabela 3.3: Lista uśrednionych wartości ekspozycji oraz progu detekcji, będących wynikiem działania zaproponowanych algorytmów.

| Parametr | Częstotliwość pracy kamer [Hz] | | | | |
|------------------------|--------------------------------|------|-----|-----|-----|
| | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 |
| Ekspozycja [μs] | 1780 | 1287 | 897 | 659 | 529 |
| Próg detekcji [0-255] | 156 | 149 | 139 | 153 | 141 |

¹³Ekspozycja: $250 \mu s$, próg detekcji: 200.

3.4.4 Uwagi ogólne

Zastosowanie algorytmów wyznaczania wartości bliskich minimum wymusza użycie rozwiązań, pozwalających zminimalizować wpływ fluktuacji rozmiaru pola powierzchni markera na wynik. W tym celu konieczne jest uśrednianie kilku kolejnych pomiarów. Ponadto, istotne jest wdrożenie mechanizmu obliczającego różnicę pomiędzy minimalną i maksymalną wartością pola powierzchni w zbiorze próbek pomiarowych. Mechanizm ten pozwoli na otrzymywanie wyników w sposób powtarzalny. W ramach przeprowadzonych badań, wartością uniwersalną dla wszystkich testowanych konfiguracji kamer, okazała się być różnica wynosząca dwa piksele.

Jako, że w procesie produkcji oraz montażu kamer mogą pojawić się pewne różnice, a co więcej, każda kamera obserwuje inny obszar (w tym o zróżnicowanej jasności), każdy pomiar powinien zostać wykonany indywidualnie dla każdej z nich. Uwaga ta obejmuje także wszystkie częstotliwości, dla których przewiduje się przyszłą pracę systemu. Jest to niezwykle ważne, aby otrzymać wartości jak najlepiej odpowiadające danej kamerze. Podejście takie jest niestety czasochłonne. Aby zredukować czas pracy wejścia, możliwe jest ograniczenie nadmiarowych kamer lub ograniczenie częstotliwości, na których przeprowadzane są pomiary. Należy jednak mieć na uwadze, że w niektórych przypadkach, redukcja liczby kamer będzie negatywnie wpływać na widoczność markerów oraz na dokładność ich pozycjonowania.

Podczas testów, w polu widzenia kamery obecny powinien być tylko jeden znacznik. Znacznik ten powinien zostać usytuowany możliwie blisko środka obszaru śledzenia, który jest widoczny przez kamerę. Pełna implementacja algorytmu musi obejmować przypadki, w których to fałszywe markery będą widoczne lub nie będzie widoczny żaden znacznik. Najistotniejsze przypadki zostały uwzględnione w pseudokodzie. Nadmienić należy, że przeprowadzone badania nie obejmowały doboru ustawień w oparciu o dwa markery lub więcej oraz przypadków, gdy znaczniki nakładają się na siebie z powodu zbyt dużej poświaty lub zbyt bliskiego usytuowania. Nie rozpatrzono także wpływu zbyt dużego obszaru śledzenia na dokładność pozycjonowania markerów.

Występowanie fałszywych znaczników, spowodowane zmiennością czynników zewnętrznych, może mieć wpływ na wyniki zwracane przez algorytmy. Ograniczenie dostępu światła słonecznego poprzez zastosowanie przysłon, użycie sztucznego oświetlenia oraz utrzymywanie stałej temperatury w pomieszczeniu jest wysoce pożądane.

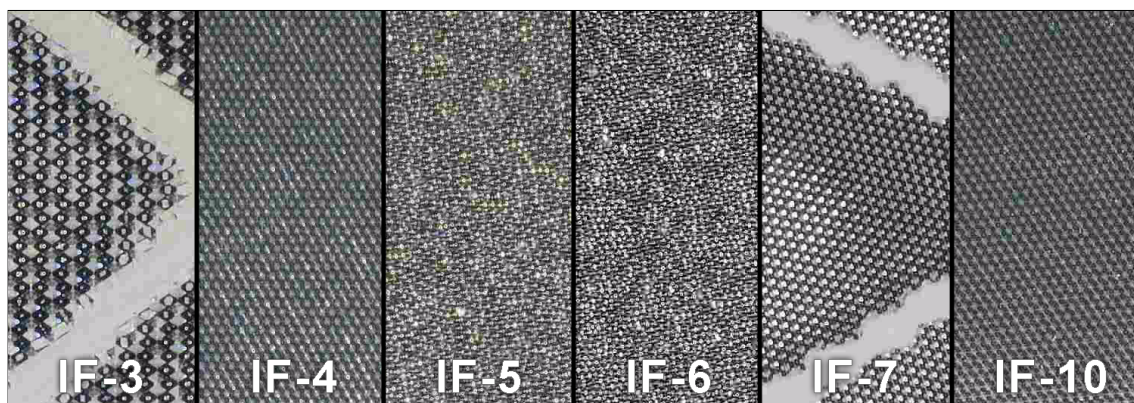
3.5 Techniki materiałowe

Odpowiedni dobór znaczników pasywnych jest kluczowy z punktu widzenia prowadzonych badań. To widoczność markerów w znacznym stopniu ma wpływ na to, czy obiekt będzie prawidłowo śledzony oraz jaka będzie dokładność jego pozycjonowania. Zasadniczym problemem jest tutaj osiągnięcie kompromisu pomiędzy rozmiarem i masą z jednej strony, a widocznością z drugiej. Uwaga ta ma zastosowanie szczególnie, gdy mowa o lekkich jednostkach latających oraz takich, na których montaż elementów przestrzennych może zaburzyć ich aerodynamikę (np. lekkie sterowce).

3.5.1 Zestawienie wybranych materiałów

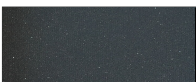
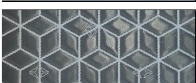
Istotną część badań stanowił przegląd materiałów, dostępnych powszechnie na rynku oraz analiza możliwości ich zastosowania w kontekście budowy pasywnych markerów płaskich oraz sferycznych. Materiały te zostały zaklasyfikowane do dwóch grup – materiałów płaskich (tab. 3.4-3.5) oraz materiałów sferycznych (tab. 3.6). Materiały płaskie obejmowały 20 taśm retro refleksyjnych różnego rodzaju. Te spośród nich, charakteryzujące się najlepszą widocznością, miały później stanowić bazę dla markerów płaskich oraz markerów sferycznych. Grubość każdej z taśm została zmierzona przy użyciu mikrometru o dokładności 0,01 mm. Pierwotnie, grupa ta zawierała także inne materiały nierefleksyjne oraz refleksyjne, jednak z uwagi na ich bardzo ograniczoną widoczność i brak praktycznego zastosowania, zostały one pominięte w niniejszej rozprawie. Były to między innymi taśmy montażowe, taśmy lustrzane oraz taśmy kaptonowe. Grupa materiałów sferycznych obejmowała 11 produktów, w tym markery oferowane przez producentów systemów przechwytywania ruchu takich jak Vicon, OptiTrack oraz Qualisys. Kryterium doboru materiałów stanowiła masa, nie wyższa niż najcięższy z testowanych, oryginalnych, sferycznych markerów pasywnych. Z tego powodu, wykluczonych zostało ponad 10 innych produktów, między innymi większość szklanych kul.

Struktura wybranych taśm została przeanalizowana pod mikroskopem cyfrowym o powiększeniu 300X (rys. 3.12). Przyjrano się zarówno materiałom wykonanym w technice szklanych kul jak i w pryzmatycznej. Różnice są wyraźnie widoczne. Struktura materiałów zbudowanych w oparciu o mikropryzmy jest bardziej regularna. W przypadku szklanych kul, ich rozmieszczenie charakteryzuje się większą zmiennością.



Rysunek 3.12: Porównanie struktury materiałów retro refleksyjnych wykonanych w różnych technikach. Zdjęcia wykonano przy użyciu mikroskopu cyfrowego o powiększeniu 300X. Symbole odpowiadają numerom taśm zawartym w tabelach 3.4-3.5.



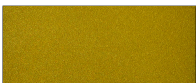

Tabela 3.4: Porównanie testowanych materiałów 2D (część I).

| Próbka | Numer | Producent | Symbol | Typ | Grubość ⁽¹⁾ | Koszt (0,1 m ²) |
|---|-------|------------|---------|--------------|------------------------|-----------------------------|
|  | IF-1 | 3M | 983-71 | Pryzmatyczne | 0,46 mm | 20,00 PLN |
|  | IF-2 | 3M | 983-72 | Pryzmatyczne | 0,46 mm | 20,00 PLN |
|  | IF-3 | 3M | 983-10 | Pryzmatyczne | 0,44 mm | 20,00 PLN |
|  | IF-4 | 3M | 957-10S | Pryzmatyczne | 0,47 mm | 32,00 PLN |
|  | IF-5 | TXR | T-Term | Szklane kule | 0,15 mm | 10,00 PLN |
|  | IF-6 | VizLite | 201HA | Szklane kule | 0,26 mm | 12,00 PLN |
|  | IF-7 | Oralite | VC 104+ | Pryzmatyczne | 0,30 mm | 24,00 PLN |
|  | IF-8 | Oralite | VC 104+ | Pryzmatyczne | 0,36 mm | 24,00 PLN |
|  | IF-9 | Oralite | VC 104+ | Pryzmatyczne | 0,36 mm | 24,00 PLN |
|  | IF-10 | 3M | 943-10 | Pryzmatyczne | 0,28 mm | 14,00 PLN |
|  | IF-11 | 3M | 943-71 | Pryzmatyczne | 0,28 mm | 14,00 PLN |
|  | IF-12 | 3M | 943-72 | Pryzmatyczne | 0,28 mm | 14,00 PLN |
|  | IF-13 | UM (Chiny) | - | Pryzmatyczne | 0,48 mm | 12,00 PLN |
|  | IF-14 | UM (Chiny) | - | Pryzmatyczne | 0,35 mm | 12,00 PLN |
|  | IF-15 | UM (Chiny) | - | Szklane kule | 0,23 mm | 16,00 PLN |
|  | IF-16 | UM (Chiny) | - | Pryzmatyczne | 0,47 mm | 16,00 PLN |

⁽¹⁾Wraz z taśmą zabezpieczającą.












UM – Producent nieznan (ang. *Unknown Manufacturer*).

Tabela 3.5: Porównanie testowanych materiałów 2D (część II).

| Próbka | Numer | Producent | Symbol | Typ | Grubość ⁽¹⁾ | Koszt (0,1 m ²) |
|---|-------|------------|--------|--------------|------------------------|-----------------------------|
|  | IF-17 | UM (Chiny) | - | Szklane kule | 0,29 mm | 16,00 PLN |
|  | IF-18 | UM (Chiny) | - | Pryzmatyczne | 0,35 mm | 20,00 PLN |
|  | IF-19 | UM (Chiny) | - | Szklane kule | 0,29 mm | 16,00 PLN |
|  | IF-20 | UM (Chiny) | - | Pryzmatyczne | 0,35 mm | 20,00 PLN |

⁽¹⁾Wraz z taśmą zabezpieczającą.
UM – Producent nieznan (ang. *Unknown Manufacturer*).

Tabela 3.6: Porównanie testowanych materiałów 3D.

| Próbka | Numer | Producent | Symbol | Typ | Średnica | Waga | Koszt |
|---|-------|-------------|--------|----------------------|--------------------------|--------|-----------|
|  | IB-1 | Vicon | - | Retro refleksyjne | 14,0 mm | 1,99 g | 47,00 PLN |
|  | IB-2 | OptiTrack | - | Retro refleksyjne | 12,7 mm | 0,99 g | 25,00 PLN |
|  | IB-3 | Qualisys | - | Retro refleksyjne | 12,5 mm | 0,93 g | 28,00 PLN |
|  | IB-4 | Titanium | 439979 | Styropian z brokatem | 11,0 mm | 0,07 g | 0,05 PLN |
|  | IB-5 | UM (Polska) | - | Stryropian | 12,0 mm | 0,03 g | 0,10 PLN |
|  | IB-6 | UM (Czechy) | - | Drewno | 14,0 mm | 0,91 g | 0,40 PLN |
|  | IB-7 | Stoklasa | 340206 | Drewno | 14,0 mm | 0,71 g | 0,20 PLN |
|  | IB-8 | UM (Chiny) | - | Szkło | ok. 10 ⁽¹⁾ mm | 1,26 g | 1,50 PLN |
|  | IB-9 | UM (Chiny) | - | Akryl | 10,0 mm | 1,44 g | 1,45 PLN |
|  | IB-10 | UM (Chiny) | - | Metal (mrożony) | 12,0 mm | 1,07 g | 0,50 PLN |
|  | IB-11 | UM (Chiny) | - | ABS | 12,0 mm | 0,68 g | 0,30 PLN |

⁽¹⁾Materiał cechuje się niskim współczynnikiem kulistości.
UM – Producent nieznan (ang. *Unknown Manufacturer*).

3.5.2 Analiza użyteczności materiałów

Analizę użyteczności materiałów rozpoczęto od sprawdzenia zależności pomiędzy temperaturą markerów pasywnych, a ich widocznością w temperaturze otoczenia ($20,0 \pm 0,5$)°C. Badania zostały przeprowadzone w oparciu o markery firm Vicon, OptiTrack oraz Qualisys. Znaczniki zostały podgrzane do temperatury 60°C, a następnie porównano ich charakterystykę z markerami o temperaturze roboczej. Nie zaobserwowano zmian ani w polu powierzchni znaczników, ani wpływu temperatury na fluktuacje tej wartości. Kolejny krok obejmował schłodzenie markerów do temperatury -10°C. Tutaj również żadna znacząca zmiana nie była zauważalna, oprócz kilkusekundowej fluktuacji pola powierzchni. Ta jednak wynikała z różnicy temperatur oraz kondensacji pary wodnej na powierzchni znacznika.



Rysunek 3.13: Narzędzie pomiarowe umieszczone w laboratorium wyposażonym w kamery OptiTrack Prime^x 13W. Odległość pomiędzy kamerą a testowanym materiałem wynosiła około 238 cm. Na zdjęciu zaznaczono układ współrzędnych narzędzia pomiarowego.

Właściwe eksperymenty obejmowały analizę widoczności kątowej materiałów oraz generowaną przez nie poświatę. Dla zapewnienia powtarzalności i wiarygodności badań, zbudowane zostało dedykowane narzędzie pomiarowe (rys. 3.13). Narzędzie zostało zaprojektowane w taki sposób, aby umożliwić rotację markera względem osi *Y* oraz *Z* (w układzie narzędzia). Obrót względem osi *Y* został ograniczony do kątów w zakresie od -70° do 70° z krokiem 1°. Rotacja względem osi *Z* to pełne 360° z krokiem 1°. Narzędzie pomiarowe zostało wyposażone w mocowanie, które pozwala na przytwierdzenie znacznika płaskiego lub sferycznego w sposób powtarzalny. Co więcej, sposób montażu uniemożliwia ruch znacznika w trakcie przeprowadzania eksperymentu. Na narzędziu pomiarowym mocowane były po dwa markery płaskie lub jeden marker sferyczny. Ich położenie względem narzędzia nie było zmieniana w trakcie trwania badań. Mierzone były zarówno kłistość jak i pole powierzchni znacznika. Materiały 3D były testowane tylko dla kąta 0° w osi *Y* oraz *Z* narzędzia.

Materiały 2D były testowane dla następujących kątów:

- względem osi Y — dla -50° , -30° oraz -15° ,
- względem osi Z — od -50° do 50° z krokiem 10° .

Badania obejmowały empiryczne sprawdzenie widoczności każdego z materiałów. Do tego celu zmieniono standardowe ustawienia czasu ekspozycji oraz progu detekcji systemu przechwytywania ruchu, odpowiednio na $500 \mu s$ oraz 240. Średnia jasność w okolicach narzędzia pomiarowego wynosiła 1086 luksów. Narzędzie zostało umieszczone naprzeciwko jednej, wybranej kamery. Oświetlacze podczerwieni pozostałych kamer zostały wyłączone, aby mieć pewność, że nie będą one wpływały na wyniki pomiarów. Odległość pomiędzy kamerą a narzędziem wynosiła ok. 238 cm. Kąt pomiędzy podłogą, a osią Z kamery wynosił natomiast $51,22^\circ$. Za bazową średnicę materiałów 2D przyjęto 12,7 mm.

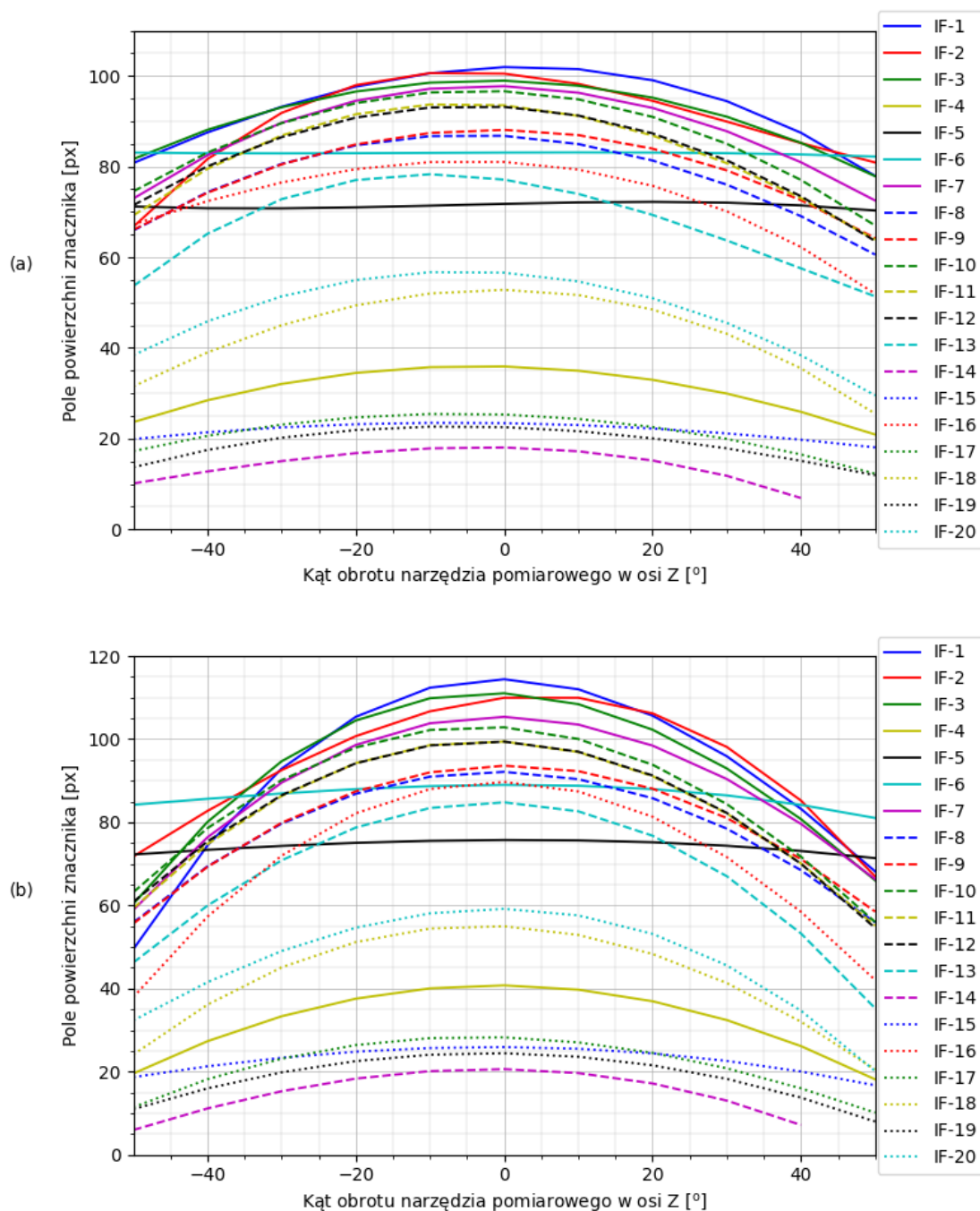
Tabela 3.7: Lista przetestowanych materiałów retro refleksyjnych. Znak „-” oznacza, że podczas co najmniej jednego pomiaru, materiał nie był widoczny. Średnica markerów płaskich to 12,7 mm. Średnica materiałów IB to odpowiednio 14,0, 12,7 oraz 12,5 mm. Wyższa wartość oznacza lepszy wynik.

| Identyfikator | Pole powierzchni [px] | | Kolistość [%] | |
|---------------|-----------------------|------|---------------|------|
| | Maks. | Min. | Maks. | Min. |
| Materiał 2D | | | | |
| IF-1 | 112 | 25 | 96 | 82 |
| IF-2 | 111 | 30 | 96 | 83 |
| IF-3 | 110 | 26 | 96 | 84 |
| IF-4 | 42 | 11 | 95 | 80 |
| IF-5 | 78 | 56 | 96 | 90 |
| IF-6 | 91 | 64 | 96 | 88 |
| IF-7 | 107 | 44 | 96 | 86 |
| IF-8 | 92 | 36 | 95 | 88 |
| IF-9 | 96 | 40 | 94 | 88 |
| IF-10 | 104 | 36 | 94 | 85 |
| IF-11 | 101 | 36 | 95 | 85 |
| IF-12 | 100 | 35 | 96 | 83 |
| IF-13 | 86 | 21 | 96 | 82 |
| IF-14 | 21 | - | 92 | - |
| IF-15 | 27 | 14 | 94 | 79 |
| IF-16 | 87 | 13 | 93 | 82 |
| IF-17 | 29 | - | 95 | - |
| IF-18 | 55 | 10 | 96 | 81 |
| IF-19 | 25 | - | 95 | - |
| IF-20 | 60 | 13 | 94 | 83 |
| Materiał 3D | | | | |
| IB-1 | 67 | | 95 | |
| IB-2 | 57 | | 95 | |
| IB-3 | 58 | | 96 | |

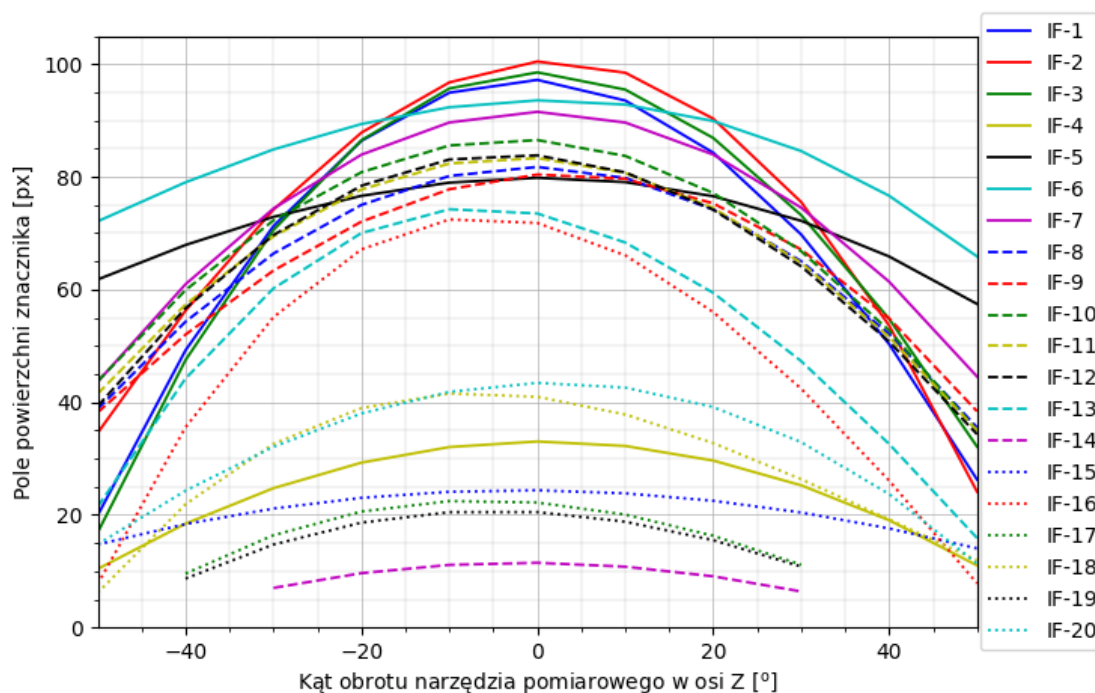
Wyniki badań zostały przedstawione w tabeli 3.7. W drugiej oraz w trzeciej kolumnie, pokazano tylko najwyższe oraz najniższe spośród uzyskanych wartości. W przypadku materiałów 3D, przeprowadzony został tylko jeden eksperyment, jako że sfera rzutowana na płaszczyznę dwuwymiarową staje się kołem. Wyraźnie widać, że niektóre materiały jak IF-1 – IF-3, IF-7 – IF-9, IF-10 – IF-12 oraz IF-16 generowały dość znaczną, niestałą poświatę. Wskazuje na to znacząca różnica pomiędzy maksymalną oraz minimalną wartością pola powierzchni. Zastosowanie takiego materiału do budowy znaczników może więc skutkować, w pewnym zakresie kątowym, nakładaniem się na siebie markerów lub brakiem ich widoczności. Jest to charakterystyka wysoce niepożądana. Inne materiały jak IF-4, IF-14, IF-15, IF-17, czy IF-19 były bardzo słabo widoczne, a w pewnym zakresie kątowym stawały się wręcz niewidoczne. Interesująca jest natomiast charakterystyka materiałów IF-5 oraz IF-6. Zachowują one dobrą widoczność, a przy tym względną stałość pola powierzchni. Co więcej, ich widoczność jest zbliżona do fabrycznych znaczników sferycznych, a niekiedy nawet je przewyższa. Podobnie jest też w przypadku kolistości materiałów IF-5 oraz IF-6 – uzyskane wyniki gwarantują dokładną rekonstrukcję bryły. Należy tutaj przypomnieć, że w przypadku spadku kolistości poniżej 60%-70%, detekcja znacznika jest ograniczona lub niemożliwa.

Prezentacja uzyskanych wyników została zamieszczona także w formie rysunków 3.14 oraz 3.15. Zdecydowano się nie unifikować zebranych danych do postaci pojedynczego wykresu, gdyż analiza byłaby znacznie utrudniona. Wykresy prezentują widoczność kątową materiałów w relacji do rotacji względem osi Z narzędzia pomiarowego. Kolejno odnoszą się do rotacji narzędzia względem osi Y o -50° , -30° oraz -15° . Aby zapewnić dobrą czytelność, krzywe zostały wygenerowane przy użyciu funkcji `polyfit` oraz `polyval`. Przyjęto aproksymację danych wielomianem trzeciego stopnia. Niektóre spośród krzywych zanikają (IF-14), co jest spowodowane brakiem ich widoczności w danym zakresie kątowym. Istotne są tutaj przede wszystkim charakterystyki materiałów IF-1 oraz IF-14, jako tych, które uzyskały skrajne wyniki oraz IF-5 i IF-6, jako materiały doskonale prezentujące się w kontekście niskiej poświaty i względnej stałości pola powierzchni. Materiał IF-1, pomimo bardzo dobrej widoczności początkowej, wraz ze zmianą kąta względem kamery, gwałtownie tracił na widoczności. Materiał IF-14, pomimo identycznej odległości od kamery co IF-1, już na początku był znacznie mniej widoczny i bardzo szybko przestał być wykrywany przez system przechwytywania ruchu. Warto jednak zwrócić uwagę na taśmy IF-5 oraz IF-6. Pomimo zmiany kąta względem kamery, bardzo długo zachowywały one stałość pola powierzchni i w ujęciu przeprowadzonych testów, były widoczne na równi z markerami sferycznymi. Oznacza to, że w porównaniu do innych badanych płaskich materiałów retrorefleksyjnych, stanowią one ciekawą propozycję w kontekście budowy zarówno własnych markerów płaskich, jak i sferycznych.

Badania zakładały przygotowanie autorskich znaczników obu typów. Z tego względu, konieczne było zaproponowanie bazy (sfery) oraz metody łatwego jej oklejania. Zdecydowano się na kule drewniane (IB-6, IB-7), które były cięższe od styropianowych (IB-5), jednak cechowały się dużo wyższą jakością wykonania w kontekście kulistości. Co więcej, ich masa mogła zostać dodatkowo zredukowana poprzez na-



Rysunek 3.14: Wizualizacja zależności rozmiaru pola powierzchni znacznika od kąta obrotu narzędzia pomiarowego. Obrót był wykonywany względem osi Z. Widoczność została sprawdzona dla kąta Y równego -50° (a) oraz -30° (b).

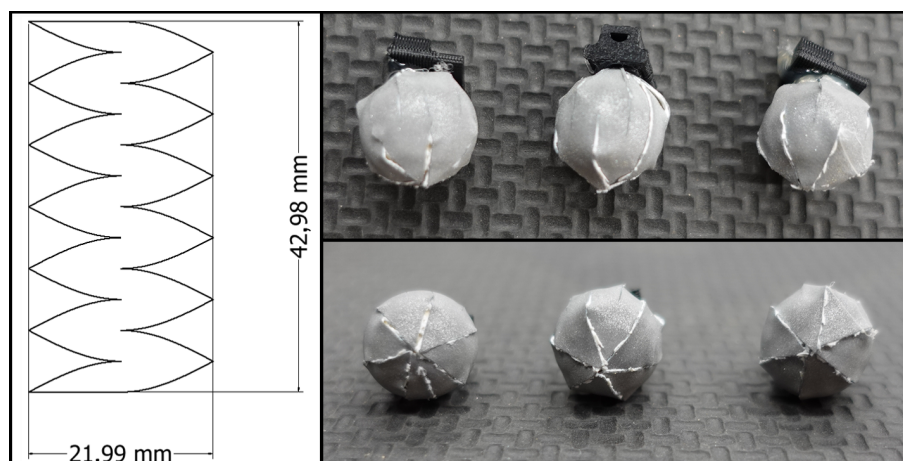


Rysunek 3.15: Wizualizacja zależności rozmiaru pola powierzchni znacznika od kąta obrotu narzędzia pomiarowego. Obrót był wykonywany względem osi Z . Widoczność została sprawdzona dla kąta Y równego -15° .

wiercenie otworów, w tym montażowych. Aby sfera mogła być powtarzalnie oklejana, przygotowano specjalny szablon, dedykowany markerom o średnicy 14,0 mm. Za jego pomocą, płaski materiał retro refleksyjny mógł zostać docięty (używając skalpela), a następnie naklejony na sferę. Aby zapewnić trwałość szablonu i powtarzalność cięcia, został on wykonany w technologii druku 3D przy użyciu materiału ABS. Rysunek 3.16 ilustruje siatkę sfery, stanowiącą szablon oraz wykonane markery pasywne wraz ze stopkami montażowymi, dedykowanymi dla jednej z platform walidacyjnych.

3.6 Podsumowanie

Prace badawcze omówione w niniejszym rozdziale, obejmowały swoim zakresem zarówno problematykę poruszaną w literaturze, jak i nowe, dotychczas nieeksplorowane obszary naukowe. Pierwszy etap prac związany był z zaproponowaniem zunifikowanego modelu oceny widoczności markerów w systemach przechwytywania ruchu, który to pozwoliłby na porównanie ze sobą widoczności obiektów oraz znaczników w systemach różnych producentów, z różną liczbą kamer i z różnym ich układem. Efekt tych badań stanowią wskaźniki jakości, będące prostymi formułami matematycznymi, obliczane w czasie rzeczywistym, w trakcie trwania eksperymentu. Zaproponowano także system wykrywania fałszywych markerów, który uodparnia wskaźniki jakości na błędy, spowodowane refleksami lub zakłóceniami, widocznymi



Rysunek 3.16: Model siatki sfery oraz drewniane kule oklejone materiałem IF-6. Wymiary modelu siatki wynoszą 42,98 mm × 21,99 mm. Miejsca łączeń nie były widoczne w systemie przechwytywania ruchu z uwagi na poświatę materiału retrorefleksyjnego.

przez jedną lub kilka kamer jako fałszywe znaczniki. Rozwiązanie to może działać w czasie rzeczywistym i poinformować badacza o anomaliach tego typu. Uwagę zwrócono także na składowe środowiskowe, a w szczególności na temperaturę pracy kamer, wpływającą na widoczność markerów oraz dokładność ich pozycjonowania. Badania tego typu nie zostały odnalezione w literaturze, co stanowiło motywację do wypełniania tej luki. Wykazano, że pole powierzchni znacznika może zmienić się nawet o 8%-11%, zależnie od stopnia nagrzania kamer oraz że temperatura pracy kamer ma znaczący wpływ na fluktuację pola powierzchni markerów. Udowodniono, że temperatura kamer może mieć również wpływ na dokładność pozycjonowania obiektu, wprowadzając błąd mierzony nawet w milimetrach. Rozpatrzone zostały różne scenariusze użycia systemu, tak aby badaniami pokryć jak najwięcej aspektów praktycznego użycia systemów przechwytywania ruchu.

Główny nurt badań skupiał się wokół konfiguracji kamer oraz technik materiałowych, odnoszących się do markerów pasywnych. Przedstawiony został algorytm automatycznego doboru ustawień kamer, takich jak czas ekspozycji oraz próg detekcji. W ramach poczynionych analiz, wykazano wpływ ekspozycji na proces pozycjonowania obiektu, w tym jego widoczność oraz dokładność. Opisano także zależność pomiędzy czasem ekspozycji, a polem powierzchni znacznika i warunki jego stabilizacji. Pokazano również, w jaki sposób użyć wskaźniki jakości do weryfikacji poprawności doboru czasu ekspozycji. Zagadnienie odnoszące się do technik materiałowych obejmowało analizę materiałów powszechnie dostępnych na rynku, w kontekście ich użycia jako markery pasywne. Uwzględniono materiały nierefleksyjne, refleksyjne oraz retrorefleksyjne. Rozpatrzono zarówno taśmy jak i sfery. Spośród nich wybrano 20 materiałów retrorefleksyjnych (taśmy), które posłużyły do budowy markerów płaskich. Ich charakterystyka została zbadana z użyciem autorskiego narzędzia pomiarowego, które pozwoliło na sprawdzenie widoczności znaczników. Widoczność ta

Rozwój metod śledzenia markerów pasywnych dedykowanych dla lekkich jednostek latających z wykorzystaniem optycznych systemów przechwytywania ruchu

została przeanalizowana w kontekście pola powierzchni markerów i jego zmienności, zależnie od kąta usytuowania materiału względem kamery. Znaleziono zostały dwie taśmy (IF-5 oraz IF-6), które spełniają wymagania stawiane materiałom retro refleksyjnym, używanym w przypadku systemów przechwytywania ruchu — niewielka poświata oraz stałość pola powierzchni w szerokim zakresie kątowym. Stanowią one punkt wyjścia do dalszych badań.

Wyniki eksperymentów

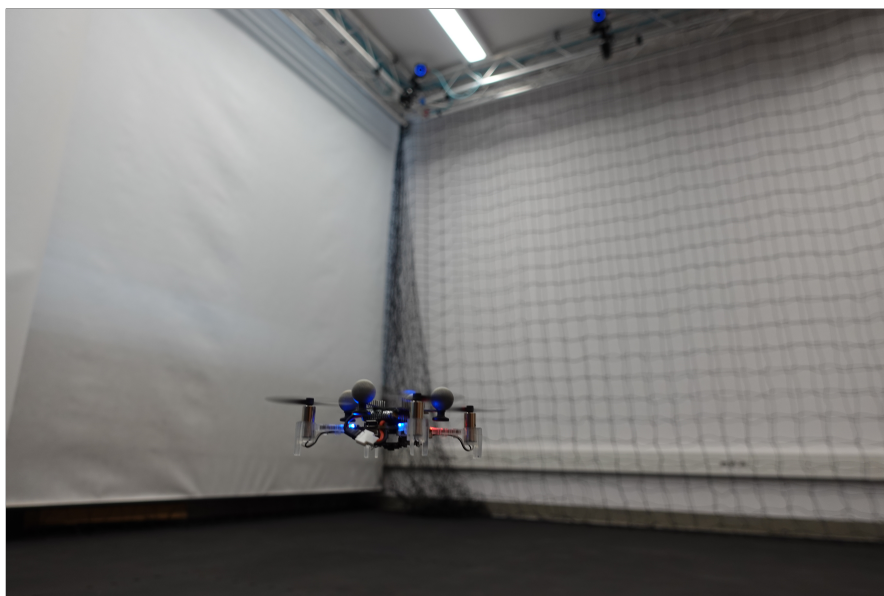
Realna ocena wartości poczynionych prac badawczych oraz możliwości ich zastosowania, wymaga przeprowadzenia weryfikacji w sposób empiryczny. Ma to na celu określenie w jaki sposób wyniki badań mogą zostać użyte w praktyce i jakie niosą za sobą korzyści dla potencjalnego użytkownika.

Tematyka pracy odnosi się do lekkich jednostek latających, stąd zarówno badania jak i platformy walidacyjne powinny zostać odpowiednio dobrane. Sensownym wydaje się być wybór jednostek o ograniczonej nośności oraz o odmiennej specyfice lotu. Jako, że lot zawsze obarczony jest pewnym dryfem, konieczne jest uzupełnienie listy platform walidacyjnych o jednostkę, cechującą się dużą powtarzalnością ruchu. Pozwoli to zminimalizować prawdopodobieństwo pojawienia się błędów oraz ich propagacji na kolejnych etapach badań.

Kluczowymi aspektami, związanymi z lekkimi jednostkami latającymi w ujęciu niniejszej rozprawy, są czas trwania lotu oraz odtwarzalność trajektorii lotu. To bezpośrednio na nie negatywny wpływ będzie miała dodatkowa masa, szczególnie rozłożona nierównomiernie. Zaznaczyć należy, że aby uniknąć problemu z niejednoznacznością orientacji bryły sztywnej na etapie jej rekonstrukcji, konieczne jest umiejscowienie markerów w sposób asymetryczny. To może skutkować pojawieniem się problemów, o których mowa.

4.1 Platformy walidacyjne

Platformy walidacyjne zostały podzielone na trzy nieformalne grupy – klasycznych czterowirnikowych jednostek latających, do których zaliczyć można Bitcraze Crazyflie 2.1 oraz DJI Tello EDU, bioinspirowanych jednostek latających jak Flapper Nimble+ EDU oraz manipulatorów, pełniących rolę punktu odniesienia dla wyników uzyskanych na jednostkach latających. Wybrany został manipulator Kuka KR200/2 z uwagi na powtarzalność ruchu oraz duży obszar przestrzeni roboczej. Wszystkie wymienione platformy krótko scharakteryzowano poniżej.



Rysunek 4.1: Lekka jednostka latająca wykorzystana w testach walidacyjnych – Bitcraze Crazyflie 2.1. Zdjęcie wykonano podczas przeprowadzania eksperymentu.

4.1.1 Bitcraze Crazyflie 2.1

Jednostka latająca Bitcraze Crazyflie 2.1 (rys. 4.1) jest reprezentantem jednostek klasy NAV (ang. *Nano Aerial Vehicle*). Jej masa to zaledwie 27 gramów przy rozmiarze $92\text{ mm} \times 92\text{ mm}$. Konstrukcja pozwala na przenoszenie ładunku o masie do około 15 gramów. Fabrycznie dron został wyposażony w jednocelową baterię LiPo (ang. *Lithium Polymer*) o pojemności 250 mAh. Pozwala to na lot bez obciążenia do 7 minut (na nowej baterii).

Komunikacja z jednostką odbywa się za pośrednictwem dedykowanego modułu radiowego 2.4 GHz (Crazyradio PA lub Crazyradio 2.0). Sterowanie może zostać zrealizowane na dwa sposoby. Pierwszy z nich to kontrola przy użyciu dedykowanego interfejsu i programu przygotowanego w języku Python. Wymagana jest tutaj stacja robocza, która w czasie rzeczywistym komunikuje się z jednostką za pośrednictwem sieci bezprzewodowej oraz pobiera informacje o jej pozycji z systemu przechwytywania ruchu. Do dyspozycji użytkownika pozostawiono dwa algorytmy sterowania — prędkościowy oraz pozycyjny. Drugi z nich korzysta z zestawu wbudowanych regulatorów, działających w zamkniętej pętli sterowania. Ich wymuszeniami są odpowiednio aktualna pozycja jednostki oraz pozycja docelowa. Drugi sposób polega na przygotowaniu kodu w języku C/C++ i wgraniu go bezpośrednio do pamięci drona. Pozwala to na uzyskanie jednostki autonomicznej¹⁴.

Istotną cechą drona Bitcraze Crazyflie jest możliwość rozszerzania jego funkcjonalności za pośrednictwem zewnętrznych modułów, tak zwanych decków (ang. *decks*). Dzięki temu, platformę można dostosować do potrzeb danego ekspery-

¹⁴Dla celów zapewnienia bezpieczeństwa, komendy startu i awaryjnego lądowania powinny zostać wysłane ze stacji roboczej.

tu, na przykład dodając kamerę pokładową, czujniki odległości, kamerę przepływu i wiele innych. Moduły można łączyć ze sobą [6], co jeszcze bardziej podnosi atrakcyjność i uniwersalność platformy. Podstawowym ograniczeniem jest tutaj przede wszystkim niewielka nośność jednostki, która w połączeniu z koniecznością użycia dobrze widocznych markerów, albo znacząco skraca czas lotu, albo też całkowicie go uniemożliwia.

Producent oferuje dedykowany zestaw montażowy dla markerów pasywnych, opracowany wraz z firmą Qualisys. Dzięki temu, możliwe jest usytuowanie znaczników w sposób łatwy i jednoznaczny, bez konieczności ingerencji w konstrukcję jednostki, co przy jej niewielkich rozmiarach byłoby problematyczne.



Rysunek 4.2: Lekka jednostka latająca wykorzystana w testach walidacyjnych – DJI Tello EDU. Zdjęcie wykonano podczas przeprowadzania eksperymentu.

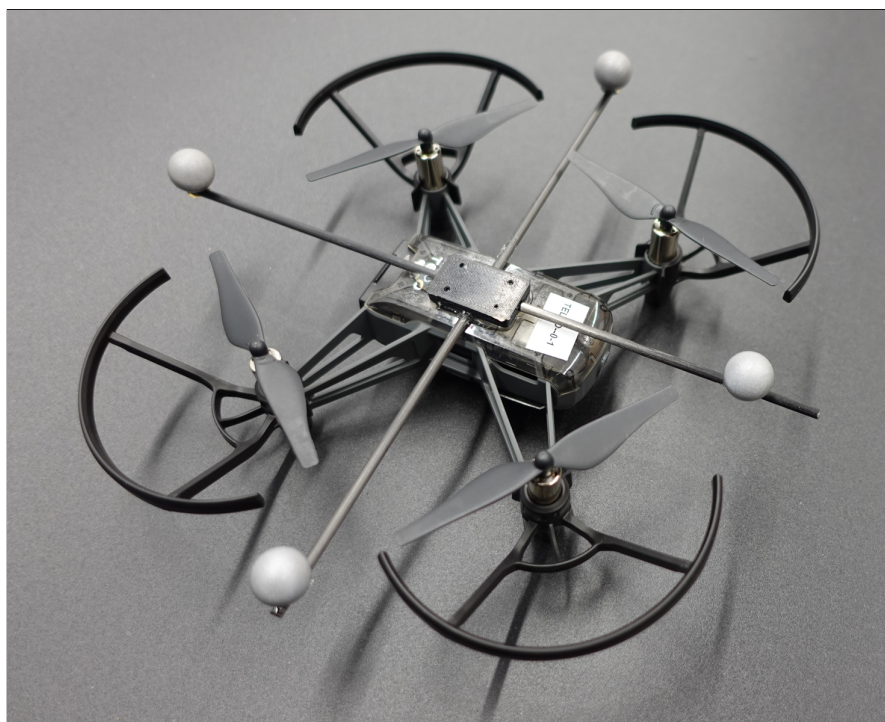
4.1.2 DJI Tello EDU

DJI Tello EDU (rys. 4.2) to jednostka klasy MAV, cechująca się masą na poziomie 87 gramów oraz możliwością udźwigu do 60 gramów¹⁵. Deklarowany czas lotu wynosi do 13 minut, przy zastosowaniu standardowej baterii litowo-polimerowej o pojemności 1100 mAh.

Jednostka ta została wyposażona w moduł łączności bezprzewodowej, zgodny ze standardem IEEE 802.11n 2.4 GHz. Pozwala to na jednoczesne sterowanie jednostką i akwizycję danych, w tym danych wizyjnych z kamery pokładowej. Firma DJI przygotowała specjalny interfejs programistyczny, który pozwala na wysokopoziomą komunikację z dronem, za pośrednictwem protokołu UDP (ang. *User Datagram Protocol*). Dzięki temu, istnieje możliwość sterowania jednostką w sposób prędkościowy oraz pozycyjny.

¹⁵Informacja nieoficjalna. Nie została potwierdzona przez producenta/dystrybutora.

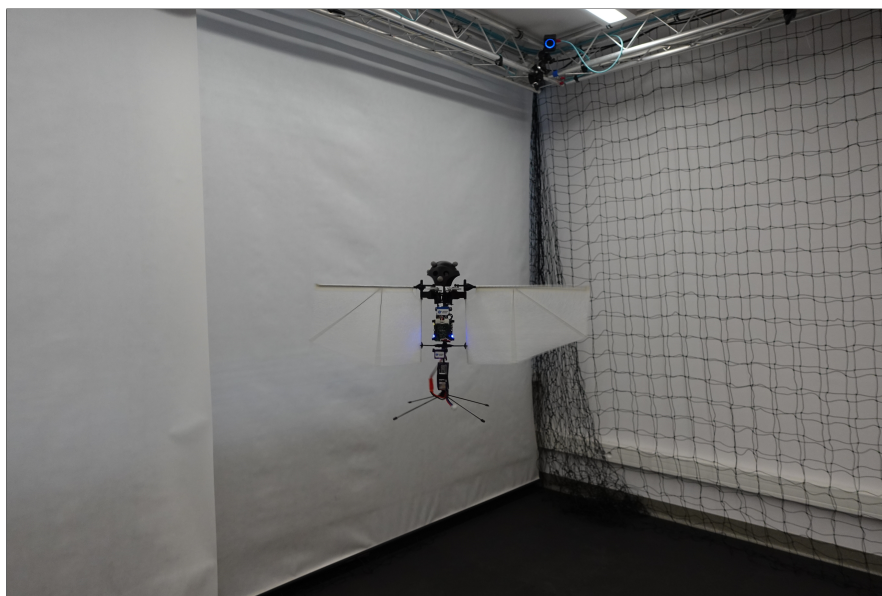
Istotnymi zaletami konstrukcji są wysoka stabilność lotu, łatwość sterowania oraz odporność na błędy operatora. Niestety platforma nie pozwala na rozbudowę podstawowej funkcjonalności, co ogranicza możliwości jej użycia w specyficznych zastosowaniach. Co więcej, znaczniki muszą zostać zamontowane na niewielkiej powierzchni, co utrudnia ich asymetryczne ułożenie w sposób zapewniający dobrą widoczność. Z tego powodu zaprojektowana została specjalna, lekka konstrukcja (4,68 grama) przygotowana z półokrągłych wałków z włókna węglowego ($\varnothing 3,0 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$) oraz elementów montażowych, wykonanych w technologii druku 3D z materiału ABS (rys. 4.3).



Rysunek 4.3: DJI Tello EDU z zamocowanymi markerami pasywnymi $\varnothing 12,7 \text{ mm}$ firmy OptiTrack. Ramka montażowa została przygotowana przy użyciu półokrągłych wałków z włókna węglowego ($\varnothing 3,0 \text{ mm}$) o długości 300 mm oraz elementów wykonanych techniką druku 3D z materiału ABS.

4.1.3 Flapper Nimble+ EDU

Wśród wybranych platform walidacyjnych, najciekawszą wydaje się być jednostka inspirowana naturą, a dokładniej rzecz ujmując ptakiem kolibrem. Flapper Nimble+ EDU (rys. 4.4), bo o nim mowa, cechuje się płatkami nośnymi typu nożycowego, które poruszają się z częstotliwością do 20 Hz. Rozpiętość standardowych skrzydeł wynosi 49 centymetrów. Jednostka waży 102 gramy i oferuje nośność na poziomie 25 gramów. Przy zastosowaniu standardowej, dwucelowej baterii LiPo o pojemności 300 mAh, dron może pozostać w powietrzu przez co najmniej 5 minut. Nie bez znaczenia



Rysunek 4.4: Lekka jednostka latająca wykorzystana w testach walidacyjnych – Flapper Nimble+ EDU. Zdjęcie wykonano podczas przeprowadzania eksperymentu.

jest tutaj także specyfika lotu, odmienna od klasycznych jednostek wirnikowych. W przypadku lotu do przodu lub do tyłu, jednostka ta przechyla się, zmieniając kąt ułożenia skrzydeł, co powoduje jednoczesne jej wznoszenie. Ma to wpływ zarówno na efektywność lotu jak i aspekt sterowania w kontekście utrzymania zadanej wysokości.

Cechą szczególną konstrukcji, pomijając zupełnie odmienny system poruszania się, jest wykorzystanie podzespołów z jednostki Bitcraze Crazyflie 2.1, co czyni oba drony względnie kompatybilne pod względem sterowania. Oznacza to, że możliwe jest zastosowanie bibliotek oferowanych przez firmę Bitcraze i użycie ich funkcjonalności wraz z tym dronem, stosując zaledwie kosmetyczne zmiany w kodzie. Co więcej, możliwe jest tutaj zastosowanie modułów (decków), znacząco rozszerzających możliwości jednostki. Należy jednak mieć na uwadze, że część z nich nie może zostać użytych wprost (np. moduły pozycjonujące) z uwagi na inną orientację płytki z wyprowadzeniami (Bitcraze Crazyflie – horyzontalna, Flapper Nimble+ EDU – wertykalna).

Pomimo zapewnienia wysokiej kompatybilności z płytkami rozszerzeń, niemożliwym jest zastosowanie tutaj tej, dedykowanej do montażu markerów pasywnych. Z tego też powodu zaadaptowano jedną z obudów („czapkę”), w której wywiercono otwory montażowe. Następnie wytoczono specjalne podstawki gwintowane (M3) z materiału ABS, co zapewniło pewne i trwałe połączenie znaczników z dronem.

4.1.4 Kuka KR200/2

Manipulator Kuka KR200/2 (rys. 4.5) stanowił pośrednią jednostkę walidacyjną, z uwagi na konieczność wykonania testów, charakteryzujących się wysoką powtarzalnością ruchu po zadanej trajektorii. Deklarowana przez producenta powtarzalność

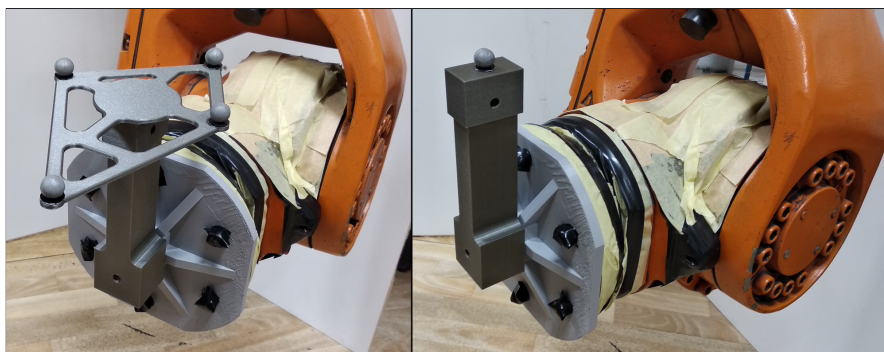
Rozwój metod śledzenia markerów pasywnych dedykowanych dla lekkich jednostek latających z wykorzystaniem optycznych systemów przechwytywania ruchu

na poziomie $\pm 0,3$ mm była tożsama z dokładnością posiadanych w podstawowym laboratorium kamer OptiTrack Prime^x 13W. Oznacza to, że maksymalna teoretyczna rozbieżność pomiaru mogła wynosić do $\pm 0,6$ mm, co w przypadku pozycjonowania jednostek latających, stanowi błąd całkowicie pomijalny.

Kuka KR200/2 cechuje się pokryciem przestrzeni na poziomie 39 m^3 . W praktyce pozwala to na wykreślenie trajektorii prostokątnych o wymiarach do $3\text{ m} \times 2\text{ m}$, przy zachowaniu możliwości śledzenia obiektu przez system przechwytywania ruchu, składający się z co najmniej 7 kamer. Na potrzeby walidacji przygotowano narzędzie, pozwalające na przeprowadzenie testów w sposób powtarzalny (rys. 4.6).



Rysunek 4.5: Manipulator Kuka KR200/2. Jednostka została wykorzystana z uwagi na wysoką powtarzalność ruchu, duży obszar przestrzeni roboczej oraz odtwarzalność zaprogramowanej trajektorii. Żółta taśma została użyta w celu zamaskowania powierzchni, która potencjalnie mogłaby zwiększać prawdopodobieństwo pojawienia się fałszywych markerów.



Rysunek 4.6: Zestawy testowe zamocowane do flanszy robota. Elementy zostały wykonane techniką druku 3D. Wykorzystany został materiał PLA.

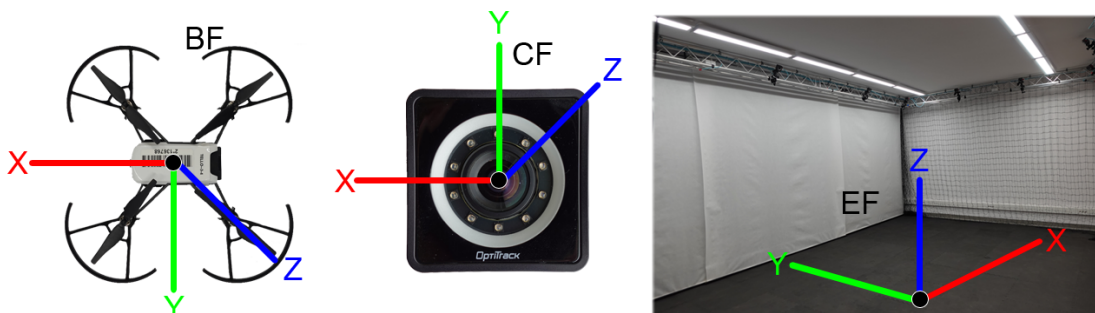
4.2 Warunki i scenariusze eksperymentów

Przeprowadzenie eksperymentów w sposób wiarygodny, powtarzalny i odtwarzalny wymagało rzetelnego określenia czynników środowiskowych, które mogą wpływać na proces walidacji (fałszując wyniki) oraz zdefiniowania scenariuszy testów. Walidacja została przeprowadzona w oparciu o trzy konfiguracje kamer firmy NaturalPoint OptiTrack, w trzech różnych laboratoriach. Dwa spośród nich ulokowane były w Politechnice Poznańskiej, jedno w Brandenburgische Technische Universität (BTU) w Cottbus (Niemcy). Z uwagi na rozpiętość czasową prowadzonych prac oraz ich szeroki zakres, niektóre spośród badań nie zostały sprawdzone na wszystkich konfiguracjach.

Jako, że użyte systemy przechwytywania ruchu są systemami referencyjnymi, konieczne jest przybliżenie czytelnikowi układów odniesienia, zarówno przestrzeni roboczej, kamer jak i platform walidacyjnych. Dla opisu laboratoriów przyjęto zasadę, że:

- oś X stanowi dłuższy wymiar laboratorium,
- oś Y stanowi krótszy wymiar laboratorium,
- oś Z stanowi wysokość laboratorium.

W przypadku jednostek latających, ich układy odniesienia były tożsame względem siebie. Wszystkie układy odniesienia zostały zaprezentowane na rysunku 4.7.



Rysunek 4.7: Układy odniesienia systemu przechwytywania ruchu, kamer oraz platform walidacyjnych. EF (ang. *Earth Frame*) oznacza układ odniesienia systemu przechwytywania ruchu. BF (ang. *Body Frame*) odnosi się do platformy walidacyjnej. CF (ang. *Camera Frame*) odnosi się do pojedynczej kamery.

4.2.1 Warunki eksperymentów

Eksperymenty zostały przeprowadzone łącznie w ramach trzech różnych laboratoriów. Choć warunki środowiskowe w nich panujące były nieco odmienne, to możliwe jest nakreślenie części wspólnej (programowej), odnoszącej się do wszystkich testów. Eksperymenty przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania Motive w wersji 2.3 lub 3.x wraz z kolejnymi jego wydaniem. Użycie obu wersji wynikało przede wszystkim z rozpiętości czasowej prowadzonych badań. Porównano ponadto

różnice w algorytmach detekcji markerów oraz rekonstrukcji bryły sztywnej pomiędzy Motive 2.x oraz Motive 3.x. Jako, że mieściły się one w granicach błędu pomiaru, zdecydowano się korzystać z nowszej wersji kiedy jest to tylko możliwe. Aby uzyskać bezpośredni dostęp do danych pomiarowych w czasie rzeczywistym, skorzystano z dedykowanych interfejsów programistycznych — wysokopoziomowego Motive API oraz niskopoziomowego Camera SDK. Przeważająca większość eksperymentów została przeprowadzona w oparciu o autorskie oprogramowanie, napisane w języku C/C++ (komunikacja oraz akwizycja danych z systemu przechwytywania ruchu) oraz w języku Python (komunikacja z jednostkami walidacyjnymi). Diagram przepływu danych w zaprojektowanym systemie został przedstawiony w dodatku A. Istotną cechą wspólną testów walidacyjnych, było wyłączenie mechanizmów systemu przechwytywania ruchu, które mogłyby mieć wpływ na uzyskane dane, w tym AEC (ang. *Automatic Exposure Control*) oraz AGC (ang. *Automatic Gain Control*). Pierwszy z nich odpowiada za autoadaptację ustawień ekspozycji kamer do aktualnego oświetlenia, drugi z nich to automatyczna kontrola wzmocnienia kamer. Ustawienia systemu były dobierane w zależności od potrzeb aktualnie przeprowadzanego eksperymentu. Jeśli w opisie testu nie wskazano inaczej, system pracował z częstotliwością 250 Hz (lub 240 Hz w przypadku Motive 2.3), czas ekspozycji kamer wynosił 250 μ s, próg detekcji wynosił 200, a wzmocnienie oświetlacza zostało ustawione na minimum. Stanowi to standardową konfigurację systemu OptiTrack.

Na potrzeby weryfikacji poprawności oraz możliwości powszechnego zastosowania wyników badań, eksperymenty zostały przeprowadzone w oparciu o systemy przechwytywania ruchu firmy NaturalPoint OptiTrack. Wykorzystane zostały następujące zestawy, dostępne w wizytowanych laboratoriach:

1. Politechnika Poznańska (1) — 12 kamer OptiTrack Prime^x 13W,
2. Politechnika Poznańska (2) — 7 kamer OptiTrack Prime 13W,
3. Brandenburgische Technische Universität — 4 kamery OptiTrack Prime^x 13.

Pomimo tego, że wszystkie zestawy bazowały na kamerach z serii Prime 13, to różniły się one między sobą wykonaniem, w tym optyką oraz zastosowanym oświetlaczem podczerwieni (tab. 4.1). Wersja z literą „W” została wyposażona w soczewkę szerokokątną, co pozwala na pokrycie większego obszaru (widoczność kątowa), ale jednocześnie zmniejsza maksymalną odległość śledzenia oraz pogarsza dokładność pozycjonowania. Wersja z literą „X” oznacza nowszą generację kamer. Różnice odnoszą się zarówno do sposobu przetwarzania danych jak i zastosowanego oświetlacza LED IR. Wersja „X” pozwala na akwizycję danych z częstotliwością do 1000 Hz, podczas gdy starsza wersja, ogranicza ją do 240 Hz. Zmieniona została także liczba oraz moc diod LED IR. Analiza wpływu tej zmiany na widoczność markerów pasywnych nie została zbadana w ramach niniejszej pracy.

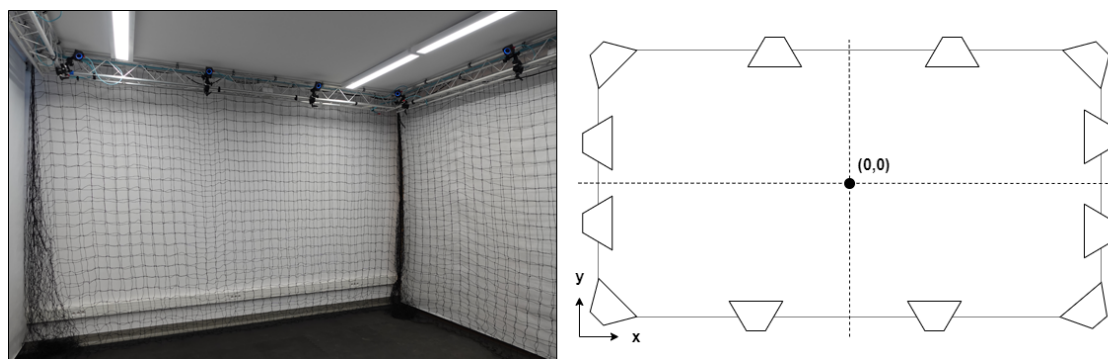
Każdorazowo, przed rozpoczęciem eksperymentów, kamery były rozgrzewane do temperatury roboczej (50°C, przy temperaturze otoczenia wynoszącej 20°C i więcej), a następnie system był rekalirowany. Miało to wykluczyć ewentualny błąd związany ze zmianą usytuowania kamer. Zmiana tego typu może wynikać na przykład ze zmienności temperatury otoczenia lub drgań występujących w strukturze budynku.

Tabela 4.1: Porównanie parametrów i cech badanych kamer systemu NaturalPoint OptiTrack. Zestawienie sporządzono w oparciu o dane katalogowe producenta [48, 49, 50].

| Parametr/cecha kamery | Prime ^x 13W | Prime ^x 13 | Prime 13W |
|--|------------------------|-----------------------|-----------|
| Rozdzielczość [MP] | 1,3 | 1,3 | 1,3 |
| Liczba klatek [FPS] | 240 | 240 | 240 |
| Opóźnienie [ms] | 4,2 | 4,2 | 4,2 |
| Dokładność 3D [mm] | ±0,3 | ±0,2 | - |
| Soczewka [FOV] | 82° × 70° | 56° × 46° | 82° × 70° |
| Ogniskowa [mm] | 3,5 | 5,5 | 3,5 |
| Prysłona | F/2,4 | F/1,8 | F/2,4 |
| Odległość śledzenia [m] ⁽¹⁾ | 9 | 16 | - |
| Liczba diod LED IR | 10 | 10 | 62 |
| Szerokość [mm] | 69 | 69 | 69 |
| Wysokość [mm] | 69 | 69 | 69 |
| Głębokość [mm] | 53 | 53 | 53 |
| Masa [kg] | 0,32 | 0,32 | 0,32 |

⁽¹⁾W przypadku zastosowania markerów pasywnych o średnicy 12 mm-16 mm.

Podstawowe miejsce przeprowadzania eksperymentów stanowiło laboratorium znajdujące się w Politechnice Poznańskiej, wyposażone w 12 kamer systemu przechwytywania ruchu NaturalPoint OptiTrack Prime^x 13W. Wymiary laboratorium badawczego wynosiły 3,67 m × 5,98 m. Jego wysokość to 2,90 metra. Układ kamer został przedstawiony na rysunku 4.8. Kamery zostały umieszczone w taki sposób, aby ich oświetlacze podczerwieni nie były wzajemnie widziane. W celu ograniczenia dostępu światła słonecznego, zastosowane zostały przysłony okienne oraz sztuczne oświetlenie. Średnia jasność w laboratorium wynosiła 1070 luksów. Ograniczony został także przepływ powietrza, poprzez zamknięcie drzwi oraz okien.

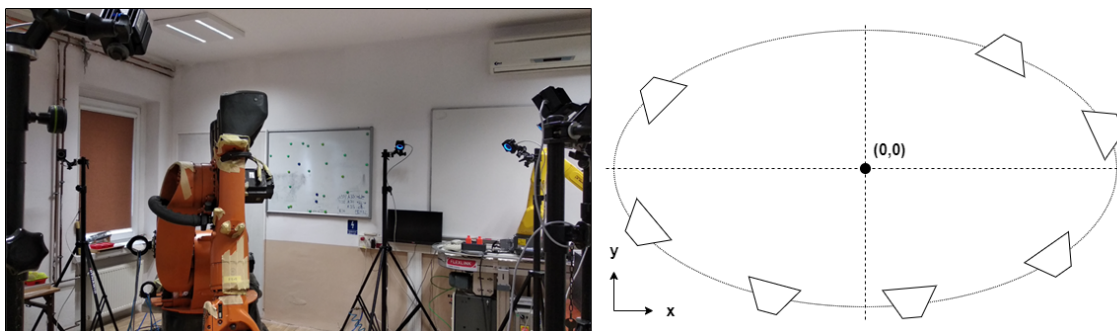


Rysunek 4.8: Wizualizacja układu kamer w laboratorium Politechniki Poznańskiej (1). System został zbudowany w oparciu o 12 kamer OptiTrack Prime^x 13W.

Na wyposażeniu Instytutu znajdował się także mobilny system przechwytywania ruchu, złożony z kamer NaturalPoint OptiTrack Prime 13W. Cały zestaw liczył 10 kamer. W przypadku niniejszych badań, wykorzystano tylko 7 kamer. Zostały one

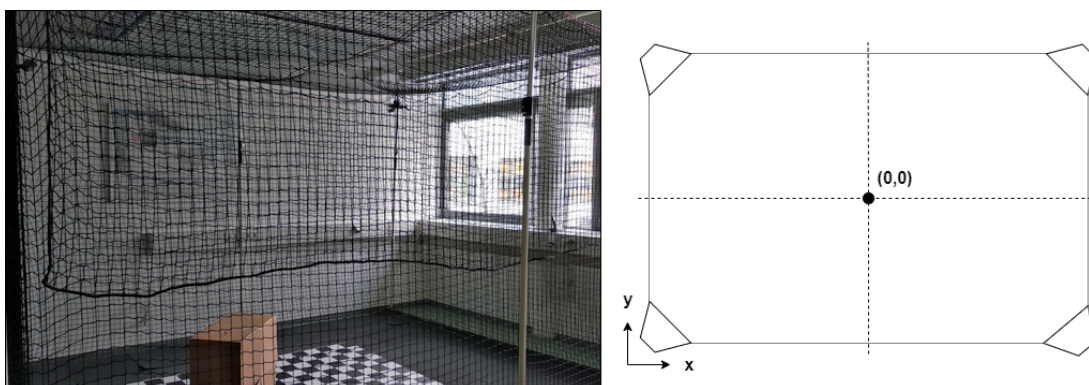
Rozwój metod śledzenia markerów pasywnych dedykowanych dla lekkich jednostek latających z wykorzystaniem optycznych systemów przechwytywania ruchu

usytuowane w laboratorium, w którym znajdował się manipulator Kuka KR200/2 (rys. 4.9). Kamery zostały umiejscowione na krzywej, przypominającej kształtem obwód elipsy. Wynikało to z ograniczonej przestrzeni w pomieszczeniu oraz konieczności zapewnienia widoczności markerom, zamocowanym w okolicach flanszy manipulatora. Kamery zostały zamontowane na statywach, na wysokości około 1,84 metra. Teoretyczne wymiary przestrzeni utworzonej z kamer to $2,56\text{ m} \times 3,52\text{ m}$. Z uwagi na zastosowany układ kamer, wartość ta jest tylko przybliżona. W pomieszczeniu zamknięto okna oraz opuszczono przysłony okienne. Zastosowane zostało sztuczne oświetlenie. Średnia jasność w laboratorium wynosiła 950 luksów.



Rysunek 4.9: Wizualizacja układu kamer w laboratorium Politechniki Poznańskiej (2). System został zbudowany w oparciu o 7 kamer OptiTrack Prime 13W. Układ kamer wynika z dostępnej przestrzeni w laboratorium oraz konieczności zapewnienia dobrej widoczności obiektu, przenoszonego przez manipulator Kuka.

Trzecie miejsce badań stanowiło laboratorium umiejscowione w Brandenburgische Technische Universität. Zostało ono wyposażone w 4 kamery NaturalPoint OptiTrack Prime^x 13 (rys. 4.10). Powstała przestrzeń robocza wynosiła $3,91\text{ m} \times 2,78\text{ m}$. Kamery zostały umieszczone na wysokości około 2,31 metra. Na czas prowadzenia eksperymentów, okna w laboratorium były zamykane i stosowano sztuczne oświetlenie. Z uwagi na specyfikę budynku i automatyczne sterowanie roletami, stałe ograniczenie dostępu światła słonecznego było możliwe tylko częściowo.



Rysunek 4.10: Wizualizacja układu kamer w laboratorium Brandenburgische Technische Universität. System został zbudowany w oparciu o 4 kamery OptiTrack Prime^x 13.

4.2.2 Scenariusze eksperymentów

Przeprowadzenie eksperymentów w sposób wiarygodny i powtarzalny wymusiło zdefiniowanie szczegółowych scenariuszy testów. Z uwagi na wielopłaszczyznowość prowadzonych prac, eksperymenty zostały podzielone na trzy grupy testowe. Pierwsza z nich odnosiła się do widoczności markerów. Eksperymenty zostały przeprowadzone zarówno w ujęciu doboru ustawień kamer jak i technik materiałowych. Pozostałe grupy odnosiły się odpowiednio do czasu trwania lotu oraz do odtwarzalności trajektorii.

Widoczność markerów

Eksperymenty odnoszące się do widoczności markerów pasywnych stanowiły przeważającą część wszystkich wykonanych testów. Pod tym pojęciem ujęte zostały zarówno eksperymenty związane z doбором ustawień kamer, jak i technikami materiałowymi, jako że obie te grupy dotyczyły poprawy widoczności znaczników.

Proces doboru ustawień kamer obejmował eksperymenty statyczne oraz dynamiczne. Część statyczna była związana z usytuowaniem pojedynczego, nowego markera firmy OptiTrack o średnicy 12,7 mm naprzeciwko pojedynczej kamery. Znacznik ten był umieszczany w taki sposób, aby znajdował się bardzo blisko środka obszaru śledzenia kamery. Było to podyktowane przede wszystkim cechą testowanych systemów, odnoszącą się do ograniczania obszaru śledzenia wraz ze wzrostem częstotliwości, powyżej wartości natywnej (tutaj: 240 Hz)¹⁶. Oświetlacze podczerwieni innych kamer zostały wyłączone. Eksperymenty zostały przeprowadzone w pierwszej kolejności dla czasu ekspozycji dla wybranych częstotliwości pracy systemu, a później — w oparciu o zebrane wartości ekspozycji — dla progu detekcji. Proces ten został powtórzony indywidualnie dla każdej z kamer. Przyjęto następujące częstotliwości pracy systemu: 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, 250 Hz, 300 Hz, 350 Hz, 400 Hz, 450 Hz, 500 Hz, 600 Hz, 700 Hz, 800 Hz, 900 Hz, 1000 Hz.

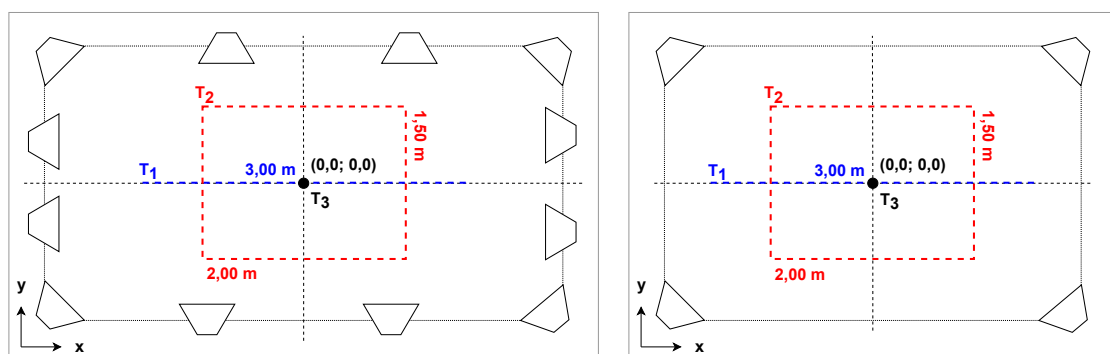
W oparciu o zebrane dane, zdefiniowane zostały cztery scenariusze, które pozwoliły na porównanie domyślnych ustawień systemu, z ustawieniami wyznaczonymi przez algorytmy oraz tymi, wskazanymi przez użytkownika z wiedzą ekspercką. Ograniczono się tutaj do częstotliwości 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz oraz 250 Hz. Scenariusze zdefiniowano w następujący sposób:

- A) domyślne wartości systemu OptiTrack (czas ekspozycji: 250 μ s; próg detekcji: 200),
- B) średnia wartość wyników zwróconych przez algorytmy,
- C) indywidualne wartości dla każdej z kamer, zwrócone przez algorytmy,
- D) średnia wartość ustawień wskazana przez użytkownika posiadającego wiedzę ekspercką.

Eksperymenty przeprowadzono z użyciem DJI Tello EDU. Prędkość jednostki została ograniczona do 2 m/s. Markery zostały zamocowane na dedykowanym stelażu.

¹⁶Rozdzielczość obrazu dla częstotliwości 240 Hz to 1280 px \times 1024 px. Rozdzielczość obrazu dla częstotliwości 1000 Hz to 576 px \times 480 px.

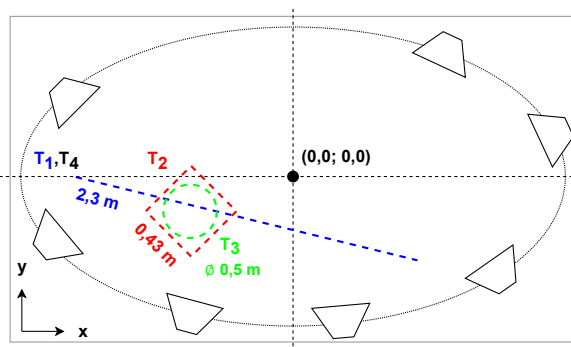
Użyto po cztery markery firmy OptiTrack o średnicach 12,7 mm oraz 7,9 mm. Testy obejmowały przelot po dwóch trajektoriach — linii prostej o długości 3,0 metrów (T1) oraz prostokąta o wymiarach 1,5 m × 2,0 m (T2). Ponadto, wykonana została rotacja względem osi Z o 360° na środku laboratorium (R1). Każdy lot został powtórzony trzykrotnie, aby zminimalizować ryzyko wpływu dryfu jednostki na pomiar. Eksperymenty zostały przeprowadzone w laboratorium Politechniki Poznańskiej oraz w laboratorium Brandenburgische Technische Universität. Z uwagi na ograniczenia związane z czasem trwania wyjazdu, testy w zagranicznym ośrodku przeprowadzono tylko dla markerów o średnicy 7,9 mm i częstotliwości 250 Hz. Pominięto także aspekt porównania uzyskanych wyników z wartościami dobranymi przez użytkownika z wiedzą ekspercką. Układ trajektorii przedstawiono na rysunku 4.11.



Rysunek 4.11: Wizualizacja trajektorii eksperymentów odnoszących się do widoczności znaczników. Testy zostały przeprowadzone w laboratorium Politechniki Poznańskiej oraz w laboratorium Brandenburgische Technische Universität.

Zagadnienie odnoszące się do technik materiałowych, obejmowało walidację użyteczności materiałów retro refleksyjnych w ujęciu systemów przechwytywania ruchu. Badania rozpoczęto od przeprowadzenia eksperymentów na manipulatorze Kuka KR200/2. Prace walidacyjne obejmowały użycie markerów płaskich o średnicy 12,7 mm, wykonanych z materiałów IF-3, IF-5, IF-6, IF-7 oraz IF-10 (tab. 3.4-3.5). Celem było przede wszystkim sprawdzenie ich widoczności kątowej. Zdefiniowane zostały cztery trajektorie — linia prosta o długości 2,3 metra (T1), romb o boku długości 0,43 metra (T2), okrąg o średnicy 0,5 metra (T3) oraz linia prosta o długości 2,1 metra (T4). Ostatnia trajektoria zakładała zmianę orientacji narzędzia w osiach X oraz Y podczas wykonywania ruchu. Trajektorie przedstawiono na rysunku 4.12. Markery zostały zamontowane na zestawach testowych, przytwierdzonych do flanszy robota (rys. 4.6, na stronie 74). Robot działał w trybie testowym, a prędkość ruchu ramienia — mierzona na narzędziu — wynosiła do 0,25 m/s.

Drugi etap eksperymentów zakładał użycie jednostki DJI Tello EDU. Zdefiniowano trzy grupy testów. Pierwsza grupa odnosiła się do markerów płaskich, umieszczonych bezpośrednio na korpusie jednostki latającej. Druga grupa odnosiła się do markerów płaskich umieszczonych na stelażu. Ostatnia grupa obejmowała testy widoczności markerów sferycznych, wykonanych przez autora. W eksperymentach uwzględniono markery płaskie o średnicach 12,7 mm, 10,5 mm, 8,0 mm i 5,5 mm, wykonane

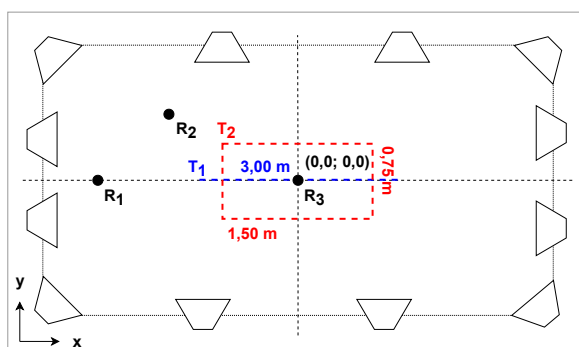


Rysunek 4.12: Wizualizacja trajektorii eksperymentów odnoszących się do widoczności znaczników z udziałem manipulatora Kuka KR200/2. Testy zostały przeprowadzone w laboratorium Politechniki Poznańskiej. Manipulator znajdował się w okolicach środka obszaru śledzenia (punkt $(0,0; 0,0)$).

z materiałów IF-3, IF-5, IF-6, IF-7 oraz IF-10 (tab. 3.4-3.5). Oprócz tego, ujęto nowe markery firm Vicon ($\varnothing 14,0$ mm), OptiTrack ($\varnothing 12,7$ mm) oraz Qualisys ($\varnothing 12,5$ mm). Na potrzeby walidacji przyjęto 5 trajektorii, spośród których 3 odnosiły się do rotacji w określony miejscu laboratorium (rys. 4.13). Są to kolejno:

- linia prosta o długości 2,0 metrów (T1),
- prostokąt o wymiarach $0,75$ m \times $1,50$ m (T2),
- rotacja blisko kamer, zgodnie ze wskazówkami zegara (R1),
- rotacja na środku jednej z ćwiartek laboratorium, zgodnie ze wskazówkami zegara (R2),
- rotacja na środku laboratorium, zgodnie ze wskazówkami zegara (R3).

Loty zostały przeprowadzone w laboratorium Politechniki Poznańskiej.



Rysunek 4.13: Wizualizacja trajektorii eksperymentów odnoszących się do widoczności znaczników. Testy zostały przeprowadzone w laboratorium Politechniki Poznańskiej.

Czas trwania lotu

Weryfikacja wpływu masy znaczników pasywnych na lekkie jednostki latające, została zrealizowana za pomocą dwóch dronów — Bitcraze Crazyflie 2.1 oraz Flapper

Nimble+ EDU. Dla każdej jednostki przygotowano zestaw 4 markerów wraz z elementami montażowymi. Rozpatrzone zostały różne średnice oraz typy markerów. Ich dokładna charakterystyka została zawarta w tabeli 4.2.

Tabela 4.2: Zestawienie mas znaczników użytych podczas testów. Zestaw składał się z 4 znaczników i elementów montażowych, dedykowanych dla danej platformy. „MR/Flat” wskazuje na znacznik płaski przygotowany przez autora rozprawy. Wartości zostały wyrażone w gramach.

| Producent znacznika | Masa [g] | | |
|----------------------------------|---------------------|--------------------|------------------|
| | Pojedynczy znacznik | Zestaw (Crazyflie) | Zestaw (Flapper) |
| Vicon ($\varnothing 14,0$) | 1,99 | 11,26 | 12,57 |
| OptiTrack ($\varnothing 12,7$) | 0,99 | 6,54 | 7,25 |
| OptiTrack ($\varnothing 7,9$) | 0,31 | 3,54 | 4,21 |
| MR/Flat ($\varnothing 12,7$) | 0,07 | 2,06 | 3,15 |

Każdy eksperyment zrealizowano w oparciu o 4 baterie o różnym stopniu zużycia. Pojedyncza bateria miała przypisaną do siebie ładowarkę i była ładowana tylko za jej pomocą. Cykl testów obejmował naprzemienne używanie baterii, tak, aby ich postępujące zużycie nie miało wpływu na pomiary. Z uwagi na powyższe, testy zostały skonstruowane w następujący sposób:

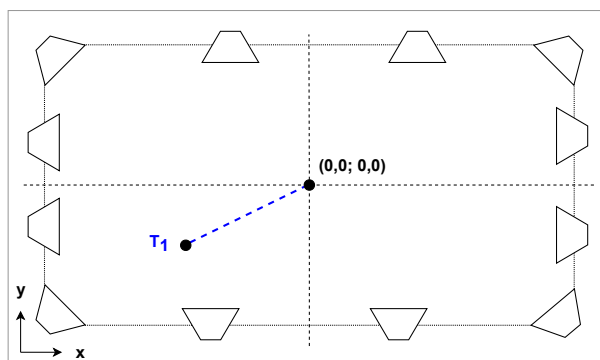
1. weryfikacja czasu lotu na każdej baterii dla markerów $\varnothing 14,0$ (Vicon),
2. weryfikacja czasu lotu na każdej baterii dla markerów $\varnothing 12,7$ (OptiTrack),
3. weryfikacja czasu lotu na każdej baterii dla markerów $\varnothing 7,9$ (OptiTrack),
4. weryfikacja czasu lotu na każdej baterii dla markerów $\varnothing 12,7$ (MR/Flat),
5. powrót do punktu (1) i powtórzenie całej sekwencji testowej.

W ujęciu danego typu markera, przeprowadzono po 3 testy. Testowany był czas zawisu jednostki, przy jednoczesnej jej stabilizacji na środku laboratorium (punkt (0,0; 0,0)). Dla zapewnienia wiarygodności pomiarów oraz automatyzacji procedury testowej, przyjęto wartości graniczne napięcia baterii, dla których jednostka ma zakończyć zawis. Wartość ta stanowiła średnią z ostatnich 2 sekund pomiarów. Przyjęto 3,10 V dla jednostki Bitcraze Crazyflie 2.1 oraz 7,05 V dla jednostki Flapper Nimble+ EDU. Poniżej tych wartości, szczególnie w ujęciu zastosowania markerów firmy Vicon, zawis stawał się bardzo niestabilny i jednostki miały problem z utrzymaniem zadanej wysokości. Aby uniknąć ich rozbicia oraz ograniczyć wpływ gwałtownej zmiany ciągu na skoki napięcia, zdecydowano się przyjąć powyższe wartości graniczne.

Odtwarzanie trajektorii

Eksperymenty odnoszące się do odtwarzalności trajektorii, zostały przeprowadzone z udziałem jednostek Bitcraze Crazyflie 2.1 oraz Flapper Nimble+ EDU. Użyto tych samych markerów, co w przypadku czasu trwania lotu. Testy zostały wykonane

na w pełni naładowanej baterii. Wyznaczona została jedna trajektoria, poprowadzona do środka laboratorium $(0,0;0,0)$ (rys. 4.14). Wykonane zostały po 3 przeloty, celem zapewnienia wiarygodności zebranych danych. Punkt startowy był zależny od jednostki latającej: $(-1,05; -0,70)$ dla Bitcraze Crazyflie 2.1 i około $(-2,15; -1,35)$ dla Flapper Nimble+ EDU. Różnica wynikała z charakteru lotu jednostek i wiązała się ze względami bezpieczeństwa.



Rysunek 4.14: Wizualizacja trajektorii eksperymentów odnoszących się do odtwarzalności trajektorii. Testy zostały przeprowadzone w laboratorium Politechniki Poznańskiej.

4.3 Walidacja i analiza zebranych danych

Eksperymenty stanowiły kluczowy element, pozwalający na ocenę zaproponowanych rozwiązań pod kątem ich użyteczności w systemach przechwytywania ruchu. Odnoszą się one do poprawy widoczności markerów pasywnych zarówno w kontekście doboru ustawień kamer jak i technik materiałowych oraz analizy wpływu uzyskanych wyników na lekkie jednostki latające. Ocenie podlega realny wpływ wypracowanych rozwiązań na czas trwania lotu oraz jego charakterystykę.

4.3.1 Widoczność markerów

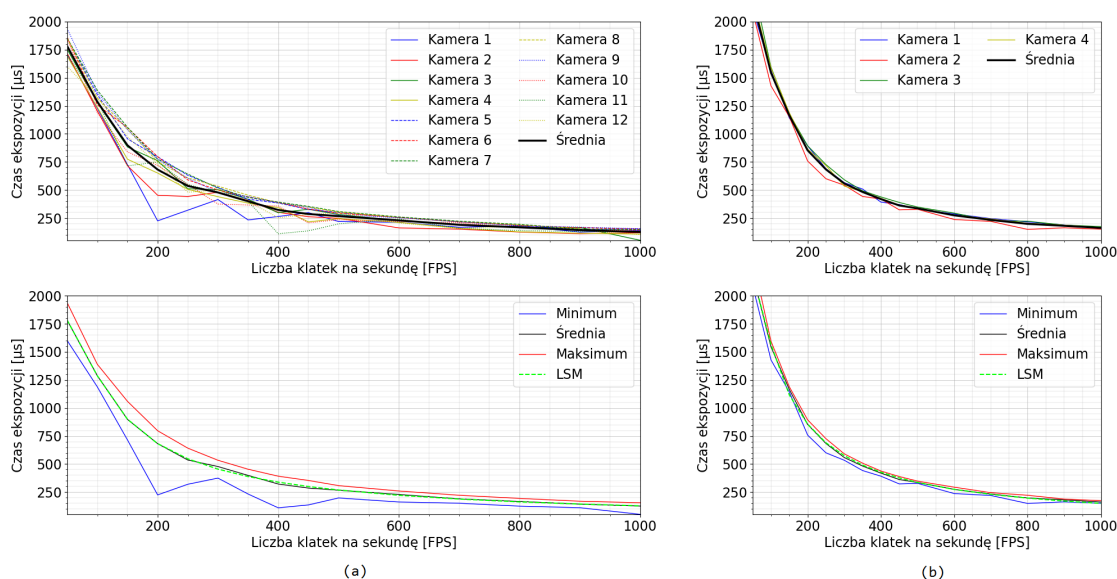
Dobór ustawień kamer

Przeprowadzone eksperymenty obejmowały programowe wyznaczenie wartości czasu ekspozycji oraz progu detekcji dla każdej z kamer systemu oraz walidację uzyskanych wyników przy użyciu jednostki latającej. Wyznaczone czasy ekspozycji przedstawiono na rysunku 4.15. Zostały one uzyskane odpowiednio w laboratorium Politechniki Poznańskiej oraz Brandenburgische Technische Universität. Charakterystyki, oprócz pojedynczych przypadków, są do siebie bardzo zbliżone w ramach tej samej częstotliwości pracy systemu. Daje to możliwość ich uśrednienia. Do tego celu idealnie nadaje się metoda najmniejszych kwadratów (LSM, ang. *Least Squares Method*) [97]. Za jej pomocą, możliwe jest wyznaczenie zbioru współczynników dla

funkcji wymiernej opisanej równaniem regresji (4.1)

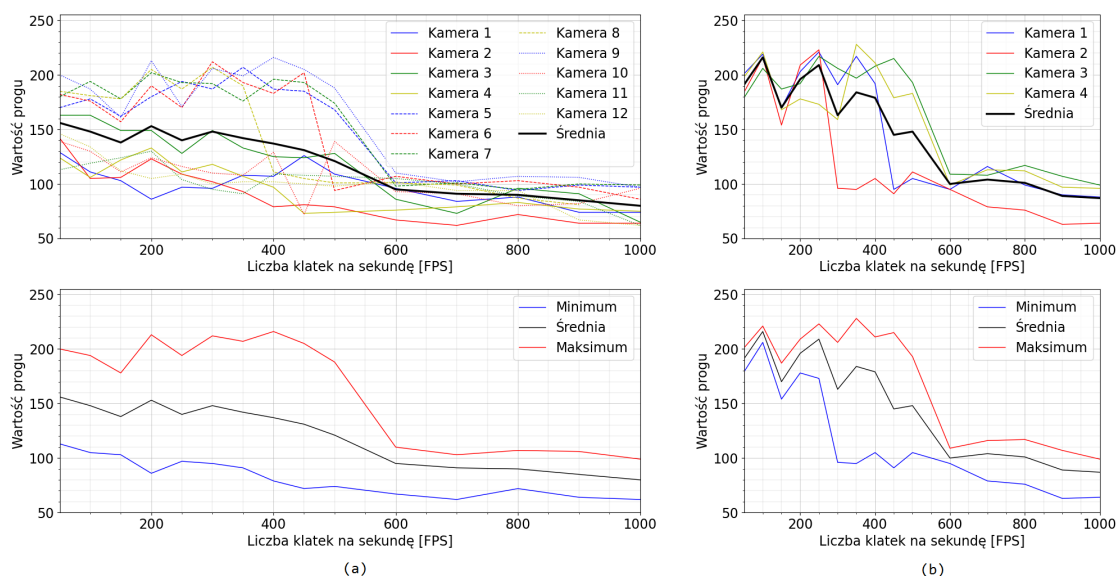
$$y(t) = \varphi^T(t)\mathbf{p}, \quad (4.1)$$

gdzie $y(t)$ stanowi funkcję wyjścia (czasu ekspozycji) dla zadanej próbki t , $\varphi(t) = [1 \ u^{-1}(t) \ u^{-2}(t) \ u^{-3}(t)]^T$ oznacza wektor regresji, $\mathbf{p} = [p_0 \ p_1 \ p_2 \ p_3]^T$ oznacza wektor parametrów, $u(t)$ to funkcja wejścia (częstotliwość pracy kamery). Zastosowanie takiego podejścia, pozwala na uzyskanie czasu ekspozycji dla dowolnej kamery, przy dowolnej częstotliwości pracy systemu ze złożonością czasową $O(1)$. Standardowo, średni czas potrzebny do uzyskania charakterystyki dla pojedynczej kamery wynosił około 4 minuty.



Rysunek 4.15: Wynik działania algorytmu wyznaczania wartości ekspozycji bliskiej minimum. *LSM* oznacza metodę najmniejszych kwadratów (ang. *Least Squares Method*). Charakterystyki odnoszą się do laboratorium Politechniki Poznańskiej (a) oraz Brandenburgische Technische Universität (b). Diagramy w drugiej linii zostały załączone dla czytelności. Wartość minimum odnosi się do zbioru najniższych wartości w ramach systemu. Wartość maksimum odnosi się do wartości najwyższych.

Proces wyznaczania wartości progu detekcji przebiegał podobnie jak proces wyznaczania czasu ekspozycji, przy czym algorytm bazował na wartościach czasu ekspozycji uzyskanych uprzednio. Otrzymane charakterystyki kamer znacząco różniły się między sobą (rys. 4.16). Na taki stan rzeczy mogło wpływać wiele składowych, w tym czynniki środowiskowe, ustawienia ostrości, różnice w procesie produkcyjnym, czy też specyfika wewnętrznego algorytmu przetwarzania obrazu. Z tego powodu, opisanie krzywych formułami matematycznymi okazało się być niemożliwe. Możliwe jest natomiast tutaj jedynie uśrednienie wszystkie wartości, jednak w przypadku niektórych kamer, może się to wiązać z jednoczesnym zwiększeniem prawdopodobieństwa pojawiania się fałszywych znaczników. Czas potrzebny na wyznaczenie charakterystyki dla pojedynczej kamery wynosił około 5 minut.



Rysunek 4.16: Wynik działania algorytmu wyznaczania wartości progu detekcji bliskiej minimum. Różnica pomiędzy uzyskanymi wartościami może być spowodowana czynnikami środowiskowymi, ostrością, różnicami w procesie produkcyjnym lub wewnętrznym algorytmem przetwarzania obrazu. Charakterystyki odnoszą się do laboratorium Politechniki Poznańskiej (a) oraz Brandenburgische Technische Universität (b). Diagramy w drugiej linii zostały załączone dla czytelności. Wartość minimum odnosi się do zbioru najniższych wartości w ramach systemu. Wartość maksimum odnosi się do wartości najwyższych.

Wyniki testów, przeprowadzonych na rzeczywistym obiekcie, zostały przedstawione w tabeli 4.3. Litery w kolumnach oznaczają konkretny dobór ustawień, opisany w rozdziale 4.2.2. Jako, że we wszystkich przypadkach obiekt był prawidłowo śledzony przez cały czas trwania eksperymentu, wskaźnik I_{track} został pominięty. Drugi najważniejszy wskaźnik, to średnia wartość $I_{\text{vis-all}}$. Przeprowadzone dotychczas badania wykazały, że wskaźnik ten stanowi wyznacznik, informujący kiedy mogą pojawić się problemy w procesie rekonstrukcji bryły sztywnej. W przypadku, gdy jego wartość spadnie poniżej 35%, rekonstrukcja jest utrudniona lub niemożliwa. Należy zaznaczyć, że w przypadku występowania w przestrzeni roboczej przeszkód, wskaźnik ten może nie być wiarygodny (np. gdy obiekt znajdzie się w tunelu).

Eksperymenty wykazały, że we wszystkich przypadkach wartości uzyskane przez algorytm lub wskazane przez użytkownika z wiedzą ekspercką, oferowały lepszą widoczność markerów, niż ustawienia domyślne. Różnica jest znacząca i wyniosła aż do 16 punktów procentowych na korzyść algorytmów w stosunku do ustawień domyślnych. Ustawienia uśrednione (B) oraz indywidualne (C) kamer były porównywalne. Oba przypadki oferowały podobną widoczność. W praktyce, wartość uśredniona jest łatwiejsza do zastosowania, gdyż te same wartości są zadawane dla każdej z kamer. Powyższe odnosi się tylko i wyłącznie do rozważanego tutaj przypadku. W szerszym kontekście, ustawienia indywidualne są bardziej pożądane, jako że lepiej odpowiadają

Tabela 4.3: Wyniki eksperymentów przeprowadzonych z udziałem markerów pasywnych ($\varnothing 12,7$ mm). Litery w kolumnach odnoszą się do zdefiniowanych scenariuszy, opisanych na stronie 79. Bryła sztywna była prawidłowo śledzona podczas wszystkich eksperymentów, co oznacza że wskaźnik I_{track} zawsze wynosił 100%. Drugim najbardziej istotnym parametrem była wartość średnia wskaźnika $I_{\text{vis-all}}$. Wartości $I_{\text{vis-all}}$ (avg) zostały zaznaczone kolorem szarym — wyższa wartość oznacza wyższe prawdopodobieństwo prawidłowej rekonstrukcji bryły.

| Częstotliwość [Hz] | Scenariusze testów | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|--------------------------|-------|------|--------------------------|-------|-------|--------------------------|-------|-------|--------------------------|-------|-------|
| | A | | | B | | | C | | | D | | |
| | $I_{\text{vis-all}}$ [%] | | | $I_{\text{vis-all}}$ [%] | | | $I_{\text{vis-all}}$ [%] | | | $I_{\text{vis-all}}$ [%] | | |
| | Min. | Maks. | Śr. | Min. | Maks. | Śr. | Min. | Maks. | Śr. | Min. | Maks. | Śr. |
| Trajektoria I | | | | | | | | | | | | |
| 50 | 75,1 | 96,7 | 83,5 | 89,3 | 100,0 | 94,6 | 93,7 | 100,0 | 96,8 | 93,4 | 100,0 | 96,6 |
| 100 | 95,5 | 99,4 | 95,5 | 99,9 | 100,0 | 100,0 | 99,9 | 100,0 | 100,0 | 99,9 | 100,0 | 100,0 |
| 150 | 73,3 | 91,7 | 80,6 | 86,7 | 99,9 | 92,9 | 86,3 | 99,7 | 92,2 | 90,0 | 100,0 | 95,0 |
| 200 | 84,9 | 87,3 | 84,9 | 99,1 | 100,0 | 99,1 | 94,5 | 97,5 | 94,5 | 99,8 | 100,0 | 99,9 |
| 250 | 54,2 | 75,2 | 63,8 | 72,5 | 94,9 | 72,5 | 74,2 | 92,8 | 74,2 | 81,5 | 96,1 | 82,0 |
| Trajektoria II | | | | | | | | | | | | |
| 50 | 74,4 | 94,1 | 74,7 | 86,2 | 99,8 | 86,2 | 86,8 | 99,7 | 86,8 | 89,7 | 99,9 | 89,7 |
| 100 | 70,6 | 93,8 | 70,6 | 87,2 | 99,4 | 87,2 | 86,6 | 98,5 | 86,6 | 87,6 | 99,6 | 87,6 |
| 150 | 66,6 | 86,9 | 71,5 | 87,8 | 98,7 | 87,8 | 86,0 | 98,2 | 86,1 | 89,1 | 99,5 | 89,1 |
| 200 | 63,3 | 81,4 | 66,4 | 78,7 | 96,9 | 78,7 | 78,5 | 94,8 | 78,5 | 79,9 | 97,8 | 79,9 |
| 250 | 60,9 | 74,8 | 66,6 | 72,3 | 97,6 | 82,2 | 79,6 | 93,8 | 84,7 | 83,4 | 97,8 | 89,0 |
| Trajektoria III | | | | | | | | | | | | |
| 50 | 95,5 | 99,6 | 95,5 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 100 | 77,6 | 96,5 | 85,6 | 87,6 | 99,7 | 93,3 | 92,2 | 100,0 | 94,7 | 90,2 | 100,0 | 95,2 |
| 150 | 92,5 | 96,2 | 92,5 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 99,9 | 100,0 | 99,9 | 99,9 | 100,0 | 99,9 |
| 200 | 64,6 | 86,2 | 73,4 | 79,2 | 98,6 | 87,3 | 82,4 | 96,9 | 88,3 | 81,4 | 98,9 | 89,4 |
| 250 | 79,6 | 83,3 | 79,6 | 96,0 | 99,8 | 96,0 | 91,5 | 94,0 | 91,7 | 98,0 | 100,0 | 98,0 |

warunkom otoczenia, w których pracuje dana kamera. Użycie wartości uśrednionych może niekiedy prowadzić do efektu rozmycia obrazu (rzadziej) lub do występowania fałszywych markerów w otoczeniu, z powodu zbyt niskiej wartości progu detekcji (częściej). Zgodnie z oczekiwaniami, wartości wyznaczone przez użytkownika z wiedzą ekspercką dawały najlepsze rezultaty, choć w wielu przypadkach były one niewiele lepsze od tych, uzyskanych przez algorytmy. Świadczy to o tym, że korzystając z zaproponowanych rozwiązań, przeciętny użytkownik systemu jest w stanie uzyskać bardzo dobrą widoczność markerów pasywnych.

Powyższe wyniki są bardzo istotne z punktu widzenia maksymalnego wykorzystania potencjału kamer w procesie śledzenia oraz zapewnienia pełnego czasu śledzenia obiektu. Jako, że uzyskane wartości wskaźników są bardzo wysokie, rozważono przypadek kiedy to do budowy bryły użyte zostały mniejsze (a tym samym lżejsze¹⁷)

¹⁷Markery $\varnothing 7,9$ mm są blisko trzykrotnie lżejsze od markerów $\varnothing 12,7$ mm.

markery pasywne o średnicy $\varnothing 7,9$ mm. Redukcja masy przy zachowaniu ciągłości śledzenia jest istotna, szczególnie w przypadku lekkich jednostek latających, o ograniczonej nośności. Testy zostały przeprowadzone dla częstotliwości 250 Hz w dwóch laboratoriach. Wyniki zostały zamieszczone w tabeli 4.4. W przypadku laboratorium Politechniki Poznańskiej, w 2 z 3 przypadków, domyślne ustawienia skutkowały brakiem możliwości uzyskania pełnego czasu śledzenia obiektu. Oznacza to, że przez odpowiednio 8% oraz 28% czasu trwania eksperymentu, nie było informacji na temat położenia oraz orientacji śledzonego obiektu. Taka sytuacja jest nieakceptowalna w przypadku testów walidacyjnych. W konsekwencji, badacze często wybierają większe i cięższe znaczniki, które mogą negatywnie wpływać na jednostkę. Wyniki uzyskane przez algorytmy oraz eksperta były znacznie lepsze. Opierając się na wartościach wskaźnika $I_{vis-all}$ można wnioskować, że możliwe byłoby zastosowanie jeszcze lżejszych znaczników, przy zachowaniu ciągłości śledzenia. Wyniki uzyskane w Brandenburgische Technische Universität były nieco odmienne. Domyślne ustawienia gwarantowały widoczność obiektu. Jak się jednak okazuje, nie były one odpowiednie dla wszystkich kamer. Skutkowało to brakiem możliwości przeprowadzenia testu dla trajektorii 3. Podjęto kilkanaście prób przeprowadzenia eksperymentów, jednak wszystkie z nich kończyły się wykryciem fałszywych markerów przez jedną lub dwie kamery, co uniemożliwiło zaliczenie tej grupy testów. Jak się jednak okazuje, algorytmy pozwoliły nie tylko uniknąć tego typu sytuacji, ale także poprawić widoczność markerów, co widać w przypadku wartości wskaźnika $I_{vis-all}$.

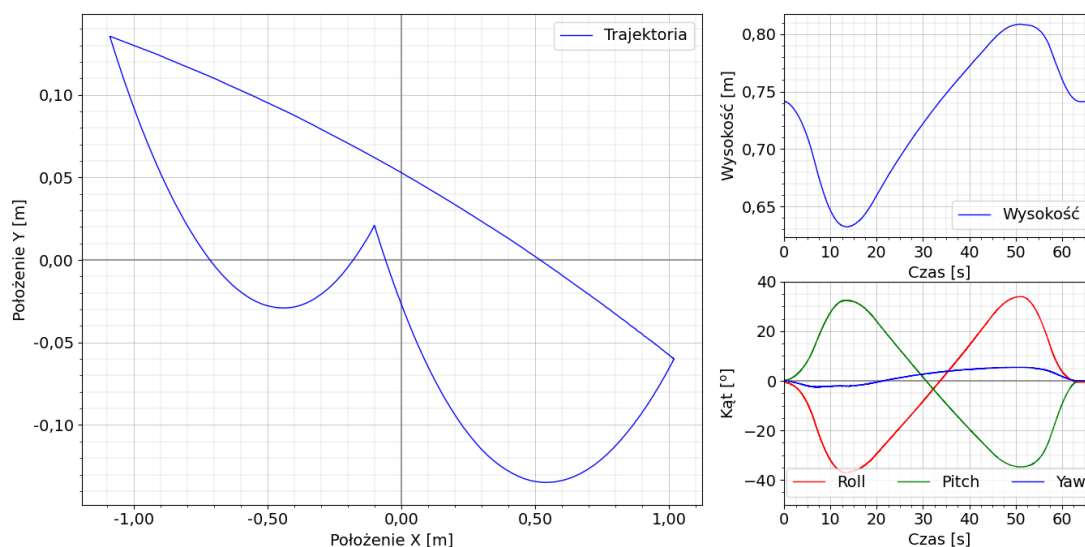
Tabela 4.4: Wyniki eksperymentów przeprowadzonych dla markerów pasywnych ($\varnothing 7,9$ mm) przy częstotliwości rejestrowania obrazu równej 250 Hz. Litery w kolumnach odnoszą się do zdefiniowanych scenariuszy, opisanych na stronie 79. Przypadki, w których bryła nie była prawidłowo śledzona, zostały zaznaczone na czerwono. Minimalna i maksymalna wartość wskaźnika $I_{vis-all}$ została pominięta.

| Trajektorja | Scenariusze testów | | | | | | | |
|---|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|
| | A | | B | | C | | D | |
| | I_{track} [%] | $I_{vis-all}$ (śr.) [%] | I_{track} [%] | $I_{vis-all}$ (śr.) [%] | I_{track} [%] | $I_{vis-all}$ (śr.) [%] | I_{track} [%] | $I_{vis-all}$ (śr.) [%] |
| Politechnika Poznańska | | | | | | | | |
| 1 | 100,0 | 32,1 | 100,0 | 57,4 | 100,0 | 56,1 | 100,0 | 57,9 |
| 2 | 91,7 | 29,8 | 100,0 | 58,6 | 100,0 | 59,0 | 100,0 | 64,0 |
| 3 | 71,7 | 24,0 | 100,0 | 70,9 | 100,0 | 70,6 | 100,0 | 76,8 |
| Brandenburgische Technische Universität | | | | | | | | |
| 1 | 85,6 | 83,7 | 88,3 | 85,8 | 89,6 | 88,0 | | |
| 2 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | | |
| 3 | | | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | | |

Podczas eksperymentów monitorowano przestrzeń roboczą pod kątem występowania fałszywych markerów. Takie sytuacje nie miały miejsca w przypadku ustawień B, C oraz D, co potwierdza prawidłowość doboru ustawień oraz skuteczność algorytmów.

Techniki materiałowe

Eksperymenty i analizy w ujęciu technik materiałowych zostały rozpoczęte od przeprowadzenia walidacji na manipulatorze Kuka KR200/2. Taka kolejność była podyktowana przede wszystkim wysoką powtarzalnością ruchu, obciążoną minimalnym błędem pozycjonowania, nieosiągalnym dla jednostek latających. Do testów wybrano materiały IF-3, IF-5, IF-6, IF-7 oraz IF-10. Zostały one wybrane w oparciu o kryterium koloru (szary) oraz wyniki analiz z rozdziału 3.5.2. W trakcie eksperymentów na manipulatorze, wykazały się one bardzo dobrą widocznością w ramach trajektorii T1-T3, co pozwoliło na zapewnienie ciągłości śledzenia obiektu. Jedyną istotną różnicą odnosiła się do wskaźnika $I_{\text{vis-all}}$, który w przypadku materiału IF-3 oscylował w granicach 85%. Zdecydowano się przeprowadzić jeden, dodatkowy test, odnoszący się do trajektorii T4. Wybrany został materiał IF-6, z uwagi na uprzednio uzyskane wyniki. Testy obejmowały jego widoczność podczas ruchu, gdy następuje zmiana wartości kątów Roll oraz Pitch. Zarejestrowane dane, odnoszące się do trajektorii, zostały przedstawione na rysunku 4.17. Wykreślona trajektoria znacząco odbiega od zdefiniowanej trajektorii T4. Analiza danych wykazała, że TCP (ang. *Tool Center Point*) narzędzia manipulatora Kuka, względem którego wykonywany był ruch, nie pokrywał się z początkiem układu współrzędnych zestawu testowego, zaprezentowanego w sekcji 4.1.4. Owe przesunięcie wpłynęło na współrzędne rejestrowane przez system przechwytywania ruchu w osiach X oraz Y . Nie miało to jednak wpływu na ostateczny wynik i formę eksperymentu. Zmiana wysokości jak i rotacja względem osi X oraz Y zostały zarejestrowane prawidłowo.



Rysunek 4.17: Charakterystyka trajektorii wykreślonej przez narzędzie manipulatora. Zmiany są widoczne zarówno w osiach X , Y , Z jak i kątach Roll oraz Pitch. Położenie oraz orientacja były rejestrowane w globalnym układzie odniesienia.

Obiekt był śledzony przez cały czas trwania eksperymentu, o czym świadczyły zarówno wskaźniki jakości jak i komplet danych pomiarowych. Potwierdziło to

możliwość użycia markerów płaskich w pewnych zastosowaniach robotycznych oraz konieczność przeprowadzenia dalszych analiz w tym zakresie.

Kolejny etap badań został zrealizowany z udziałem jednostki latającej. Aby zredukować liczbę eksperymentów, przyjęto pewne założenia dodatkowe. Materiały, których pole powierzchni wynosiło poniżej 65 pikseli, zostały odrzucone (tab. 3.7). Wykluczyło to materiały IF-4, IF-14, IF-15 oraz IF-17–IF20. Pozostałe zostały podzielone na grupy względem producenta oraz serii produktu. Z każdej z grup wybrano reprezentanta — materiał najjaśniejszy lub koloru szarego. Do eksperymentów zakwalifikowały się materiały IF-3, IF-5–IF-7, IF-10, IF-13 oraz IF-16. Podczas prac przygotowawczych okazało się, że widoczność materiałów IF-13 oraz IF-16 na jednostce latającej jest bardzo ograniczona, co w praktyce uniemożliwia prawidłowe śledzenie obiektu.

Tabela 4.5: Wyniki testów materiałowych — materiał płaski montowany bezpośrednio na jednostce latającej. Dane zostały pogrupowane względem średnicy znacznika. Wyniki stanowią wartości wskaźnika I_{track} . Zielony kolor wskazuje wartości powyżej 90%. Czerwony kolor wskazuje wartości poniżej 20%. Wyższe wartości oznaczają lepszy wynik.

| Trajektoria | I_{track} [%] | | | | |
|-----------------------------|------------------------|------|------|------|-------|
| | IF-3 | IF-5 | IF-6 | IF-7 | IF-10 |
| Średnica znacznika: 12,7 mm | | | | | |
| T1 | 66,7 | 99,8 | 99,8 | 95,0 | 95,8 |
| T2 | 78,2 | 99,8 | 99,7 | 97,3 | 98,4 |
| R1 | 38,4 | 89,7 | 94,4 | 73,9 | 63,5 |
| R2 | 19,6 | 93,0 | 86,2 | 44,8 | 39,7 |
| R3 | 61,3 | 95,3 | 97,7 | 84,7 | 80,5 |
| Średnica znacznika: 10,5 mm | | | | | |
| T1 | 49,0 | 96,8 | 97,2 | 78,9 | 77,6 |
| T2 | 67,1 | 96,0 | 98,8 | 63,7 | 60,7 |
| R1 | 22,7 | 53,0 | 89,8 | 41,8 | 35,2 |
| R2 | 3,8 | 21,3 | 87,6 | 27,8 | 33,0 |
| R3 | 36,9 | 68,0 | 97,0 | 64,1 | 59,4 |
| Średnica znacznika: 8,0 mm | | | | | |
| T1 | 39,4 | 86,4 | 94,7 | 74,3 | 62,7 |
| T2 | 45,6 | 93,4 | 99,9 | 57,1 | 40,2 |
| R1 | 9,0 | 47,4 | 82,2 | 26,0 | 10,1 |
| R2 | 0,8 | 14,9 | 87,1 | 0,1 | 0,1 |
| R3 | 1,9 | 68,5 | 97,9 | 49,3 | 19,6 |
| Średnica znacznika: 5,5 mm | | | | | |
| T1 | | 13,1 | 76,0 | | |
| T2 | | 15,0 | 84,6 | | |
| R1 | | 0,5 | 21,1 | | |
| R2 | | 0,0 | 5,0 | | |
| R3 | | 1,5 | 50,8 | | |

Wyselekcjonowane materiały zostały użyte do wykonania markerów płaskich. Znaczniki te każdorazowo były rozmieszczane bezpośrednio na korpusie jednostki latającej, w tych samych miejscach (taki sam układ markerów bryły sztywnej). Wyniki eksperymentów zostały przedstawione w tabeli 4.5. Prezentują one wartości wskaźnika I_{track} . Wartości wskaźnika $I_{\text{vis-all}}$ zostały umieszczone w dodatku B. Jak można zauważyć, tylko materiały IF-5 oraz IF-6 zapewniały widoczność powyżej 90% dla markerów o średnicach 12,7 mm oraz 10,5 mm, w ramach co najmniej jednej trajektorii. Co więcej, materiał IF-6 oferował dużo lepszą widoczność w przypadku markerów 8,0 mm i możliwość jakiegokolwiek śledzenia w przypadku markerów 5,5 mm. Granicą widoczności i użyteczności był jednak rozmiar 8,0 mm. Poniżej tej średnicy markerów, ich widoczność gwałtownie malała. Interesujący jest natomiast fakt, że materiał IF-3, który w ramach analiz wstępnych wykazywał doskonałą widoczność w kontekście rozmiaru pola powierzchni znacznika, w eksperymentach na jednostce latającej uzyskał wyniki najgorsze.

Analiza wyników jasno wykazała, że tylko dwa spośród materiałów — IF-5 oraz IF-6 — klasyfikowały się do zestawienia z fabrycznymi markerami sferycznymi firm Vicon, OptiTrack oraz Qualisys. Wybrano markery płaskie o średnicy 12,7 mm. W ra-

Tabela 4.6: Porównanie jakości śledzenia między wybranymi markerami płaskimi a markerami sferycznymi. Testy zostały przeprowadzone dla znaczników płaskich o średnicy 12,7 milimetra. Średnice markerów sferycznych to odpowiednio 14,0 mm, 12,7 mm i 12,5 mm. Znaczniki zostały zamocowane na końcach stelaża. Wyższe wartości oznaczają lepszy wynik.

| Trajektorja | I_{track} [%] | $I_{\text{vis-all}}$ [%] | | | I_{track} [%] | $I_{\text{vis-all}}$ [%] | | |
|-------------|------------------------|--------------------------|-------|------|------------------------|--------------------------|-------|------|
| | | Min. | Maks. | Śr. | | Min. | Maks. | Śr. |
| | | IF-5 | | | | IF-6 | | |
| T1 | 100,0 | 43,8 | 54,5 | 54,5 | 100,0 | 49,9 | 69,6 | 64,1 |
| T2 | 100,0 | 43,8 | 57,8 | 54,9 | 100,0 | 62,2 | 77,2 | 70,4 |
| R1 | 100,0 | 48,2 | 49,5 | 49,3 | 100,0 | 50,0 | 50,0 | 50,0 |
| R2 | 100,0 | 41,6 | 45,4 | 44,9 | 100,0 | 46,7 | 52,4 | 52,4 |
| R3 | 100,0 | 57,8 | 62,0 | 60,9 | 100,0 | 74,1 | 78,3 | 75,9 |
| | | IB-1 | | | | IB-2 | | |
| T1 | 100,0 | 88,6 | 99,3 | 88,6 | 100,0 | 71,7 | 86,0 | 75,7 |
| T2 | 100,0 | 88,8 | 100,0 | 93,7 | 100,0 | 78,2 | 88,0 | 80,7 |
| R1 | 100,0 | 70,1 | 75,2 | 73,7 | 100,0 | 50,1 | 51,7 | 50,4 |
| R2 | 100,0 | 87,5 | 92,6 | 89,4 | 100,0 | 70,2 | 77,0 | 71,7 |
| R3 | 100,0 | 99,4 | 100,0 | 99,4 | 100,0 | 84,0 | 88,2 | 84,0 |
| | | IB-3 | | | | | | |
| T1 | 100,0 | 74,9 | 87,6 | 74,9 | | | | |
| T2 | 100,0 | 77,7 | 90,3 | 81,2 | | | | |
| R1 | 100,0 | 50,1 | 51,2 | 50,3 | | | | |
| R2 | 100,0 | 73,0 | 78,4 | 73,3 | | | | |
| R3 | 100,0 | 84,6 | 88,4 | 84,6 | | | | |

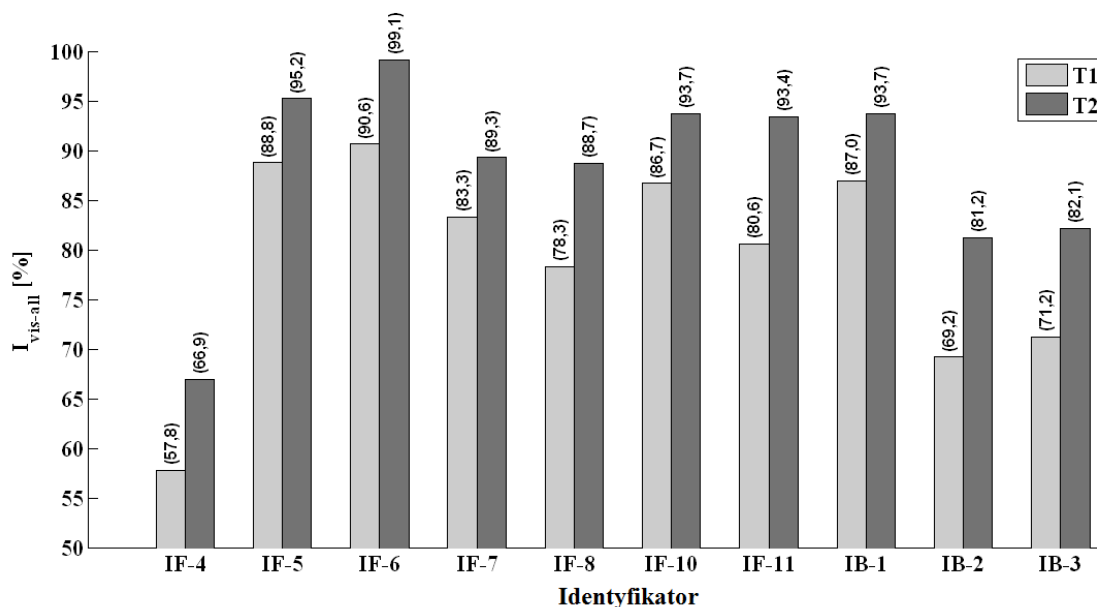
mach tego eksperymentu, wszystkie markery były montowane na autorskim stelażu. Materiały IB „korzystały” ze specjalnych podstawek montażowych. Materiały IF były przyklejane na stelaż, stroną retro refleksyjną ku górze. Wyniki przeprowadzonych testów walidacyjnych pokazują (tab. 4.6), że możliwe jest uzyskanie pełnego czasu śledzenia obiektu w przypadku zastosowania znaczników płaskich, przy jednoczesnym ograniczeniu ich wpływu na nośność jednostki. Warto zwrócić uwagę na wartości wskaźnika $I_{vis-all}$, który to w przypadku materiału IF-6 jest względnie bliski wartościom, uzyskanym dla znaczników IB-2 oraz IB-3. Lepsza widoczność znacznika IB-1 jest związana przede wszystkim z jego większą średnicą. Eksperymenty potwierdziły, że możliwe jest użycie markerów płaskich, jako alternatywy dla markerów sferycznych. Kluczowa jest tutaj wyraźna redukcja masy przy zachowaniu dobrej widoczności. Masa zestawu czterech markerów płaskich ($\varnothing 12,7$ mm) to zaledwie 0,3 grama. Dla porównania, masa zestawu markerów sferycznych firmy OptiTrack o tej średnicy to 3,96 grama (bez elementów montażowych).

Ostatnia grupa eksperymentów odnosiła się do budowy znaczników sferycznych w oparciu o materiały z grupy IF. Tutaj ponownie wzięto pod uwagę wszystkie z nich. Należało zweryfikować czy materiały, które nie sprawdziły się jako markery

Tabela 4.7: Lista materiałów zakwalifikowanych do testów uzupełniających. Wyniki odnoszą się do obu zdefiniowanych trajektorii (T1 oraz T2). Wartość wskaźnika I_{track} wynosiła 100% w przypadku każdego znacznika. Najlepsze uzyskane wyniki zostały pogrubione.

| Identyfikator | Masa [g] (Śr.) | $I_{vis-all}$ [%] | | | | | | Komentarz |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|---------------------------------|
| | | Trajektorja T1 | | | Trajektorja T2 | | | |
| | | Min. | Maks. | Śr. | Min. | Maks. | Śr. | |
| IF-4 | 0,89 | 34,2 | 58,5 | 57,8 | 47,9 | 76,8 | 66,9 | Trudny do cięcia. Rozciągliwy. |
| IF-5 | 1,07 | 75,0 | 88,8 | 88,8 | 83,3 | 96,8 | 95,2 | Wymaga kleju. |
| IF-6 | 0,99 | 83,2 | 90,6 | 90,6 | 93,7 | 99,5 | 99,1 | Trudny do cięcia. Wymaga kleju. |
| IF-7 | 0,87 | 60,4 | 83,3 | 83,3 | 83,3 | 91,8 | 89,3 | Rozciągliwy. Łatwy w aplikacji. |
| IF-8 | 1,16 | 50,0 | 78,3 | 78,3 | 81,3 | 90,3 | 88,7 | Rozciągliwy. Łatwy w aplikacji. |
| IF-10 | 0,95 | 70,3 | 86,7 | 86,7 | 83,3 | 96,2 | 93,7 | Łatwy do cięcia i w aplikacji. |
| IF-11 | 0,85 | 56,3 | 80,6 | 80,6 | 83,2 | 95,9 | 93,4 | Łatwy do cięcia i w aplikacji. |
| IB-1 | 1,99 | 69,4 | 87,0 | 87,0 | 83,3 | 96,3 | 93,7 | Średnica: 14,0 mm. |
| IB-2 | 0,99 | 44,0 | 69,2 | 69,2 | 66,9 | 85,0 | 81,2 | Średnica: 12,7 mm. |
| IB-3 | 0,93 | 49,5 | 71,2 | 71,2 | 70,7 | 85,0 | 82,1 | Średnica: 12,5 mm. |

płaskie, mogłyby zostać użyte jako markery sferyczne. Materiały koloru czerwonego (IF-2, IF-9 i IF-12) zostały pominięte, gdyż ich widoczność, po aplikacji na kulę była zredukowana. Materiały IF-1, IF-3, IF-12, IF-16, IF-18 oraz IF-20 okazały się być zbyt sztywne, aby móc okleić nimi kulę lub odklejały się, wracając do pierwotnego kształtu. Materiały IF-14, IF-15, IF-17 oraz IF-19 zostały pominięte z uwagi na bardzo słabe wyniki, uzyskane na etapie prac przygotowawczych, odnoszące się do rozmiaru pola powierzchni. Testy walidacyjne przeprowadzono dla trajektorii T1 oraz T2. Wyniki zostały przedstawione w tabeli 4.7 oraz na rysunku 4.18. Zawierają one dane odnoszące się do wskaźników jakości, głównie do wartości średniej $I_{\text{vis-all}}$. Wyniki w tabeli zaprezentowano w formie dwóch wierszy, odpowiadających kolejno trajektorii T1 oraz T2. Ponadto, załączono masy znaczników oraz komentarze odnoszące się do procesu oklejania. W przypadku każdego z markerów, wartość wskaźnika I_{track} była równa 100%. Oznacza to, że każdy z materiałów może posłużyć do budowy znaczników sferycznych. Szczególną uwagę należy jednak zwrócić na średnią wartość drugiego ze wskaźników. W praktyce to on wskazuje, na widoczność markerów, a nie samego obiektu. Dla trajektorii T1 zauważyć można, że wyniki średnie i maksymalne są do siebie bardzo zbliżone lub niekiedy równe. Jest to spowodowane nieskomplikowaną trajektorią, usytuowaną blisko środka obszaru śledzenia, o widoczności ograniczonej tylko w momencie startu i lądowania (większa odległość od kamer), czyli co najwyżej przez kilka sekund.



Rysunek 4.18: Porównanie wyników dla materiałów zakwalifikowanych do testów uzupełniających. Porównanie obejmowało markery płaskie (IF) oraz markery sferyczne (IB). Wskaźnik $I_{\text{vis-all}}$ został wyznaczony dla trajektorii T1 oraz T2 (wartość średnia). Średnice znaczników sferycznych to odpowiednio 14,0 mm, 12,7 mm oraz 12,5 mm. Wyższe wartości oznaczają lepszy wynik.

Najgorsze wyniki zanotował materiał IF-4, natomiast zgodnie z przewidywaniami, wyniki uzyskane przez materiały IB były dobre lub bardzo dobre. Zaskoczenie stanowiły natomiast wartości wskaźników dla materiałów IF-5 oraz IF-6. Ich widoczność nie tylko była lepsza niż pozostałych testowanych materiałów IF, ale także markerów, dedykowanych dla systemów przechwytywania ruchu. Ich masa jest porównywalna z masą mniejszych znaczników IB, przy czym należy uwzględnić fakt, że nie posiadają one otworu montażowego i ich bazę stanowiła drewniana kula. Co więcej, średnica tych markerów — z uwagi na bardzo dobre wyniki — mogłaby zostać zmniejszona bez negatywnego wpływu na ich widoczność, co pozwoliłoby uczynić je jeszcze lżejszymi.

Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że możliwe jest uzyskanie bardzo dobrej widoczności markerów przy znacznej redukcji ich masy. Mowa tu przede wszystkim o markerach płaskich, które są lżejsze od 3,42 grama (IB-3) do aż 7,66 grama (IB-1) w przypadku zastosowania 4 znaczników. Porównanie to nie uwzględnia masy elementów mocujących markery sferyczne, co jeszcze bardziej uwypukliłoby przewagę markerów płaskich w ujęciu lekkich jednostek latających.

4.3.2 Czas trwania lotu

Kluczowy etap eksperymentów, stanowiły testy odnoszące się do czasu trwania lotu. To one miały potwierdzić przydatność wypracowanych rozwiązań oraz ich realną wartość dla środowiska badawczego. Wykorzystano tutaj dwie lekkie jednostki latającej — Bitcraze Crazyflie 2.1 oraz Flapper Nimble+ EDU. Wyniki dla pierwszej z jednostek przedstawiono w tabeli 4.8. Wartości zostały wyrażone w sekundach oraz w procentach. Za 100% przyjęto najdłuższy czas uzyskany w ramach danej grupy testowej.

Wyraźnie widać, że najlepsze czasy zostały uzyskane dla znaczników płaskich. Tylko w przypadku baterii 1, najdłuższy czas zawisu został zanotowany dla markerów sferycznych $\varnothing 7,9$ mm. Różnica to zaledwie 1,14 sekundy, co można potraktować jako błąd pomiaru. W przypadku pozostałych baterii, markery płaskie zdecydowanie wydłużały czas trwania zawisu, nawet do ponad 60 sekund w stosunku do kolejnego najlepszego wyniku. Co istotne, ich zestawienie z markerami $\varnothing 12,7$ mm wykazało nawet dwukrotne wydłużenie czasu zawisu. W niniejszej analizie pominięto porówna-

Tabela 4.8: Czas trwania zawisu jednostki Bitcraze Crazyflie 2.1 przy zastosowaniu markerów o różnej masie. Maksymalna zalecana nośność jednostki to 15 gramów.

| Indeks baterii | Czas zawisu [s] | | | | Czas zawisu [%] | | | |
|----------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| | Vicon $\varnothing 14,0$ | OptiTrack $\varnothing 12,7$ | OptiTrack $\varnothing 7,9$ | MR/Flat $\varnothing 12,7$ | Vicon $\varnothing 14,0$ | OptiTrack $\varnothing 12,7$ | OptiTrack $\varnothing 7,9$ | MR/Flat $\varnothing 12,7$ |
| 1 | 129,66 | 155,57 | 291,29 | 290,15 | 44,5 | 53,4 | 100,0 | 99,6 |
| 2 | 95,44 | 123,41 | 201,52 | 267,62 | 35,7 | 46,1 | 75,3 | 100,0 |
| 3 | 119,33 | 126,89 | 241,88 | 261,10 | 45,7 | 48,6 | 92,6 | 100,0 |
| 4 | 71,95 | 158,44 | 191,35 | 255,0 | 28,2 | 62,1 | 75,0 | 100,0 |

nia do markerów $\varnothing 14,0$ mm z uwagi na ich znaczną masę. Zostały one uwzględnione w testach tylko jako punkt odniesienia. Ponadto, należy zaznaczyć, że aby możliwe było przeprowadzenie testów z udziałem znaczników OptiTrack $\varnothing 7,9$ mm, konieczne okazało się wprowadzenie zmian ustawień kamer, gdyż widoczność markerów o tym rozmiarze była ograniczona. Zmiany odnosiły się do wydłużenia czasu ekspozycji oraz zmniejszenia wartości progu detekcji. Skorzystano z wyników, stanowiących wyjście algorytmów, opisanych w rozdziale 3.4.

Tabela 4.9: Czas trwania zawisu jednostki Flapper Nimble+ EDU przy zastosowaniu markerów o różnej masie. Maksymalna zalecana nośność jednostki to 25 gramów.

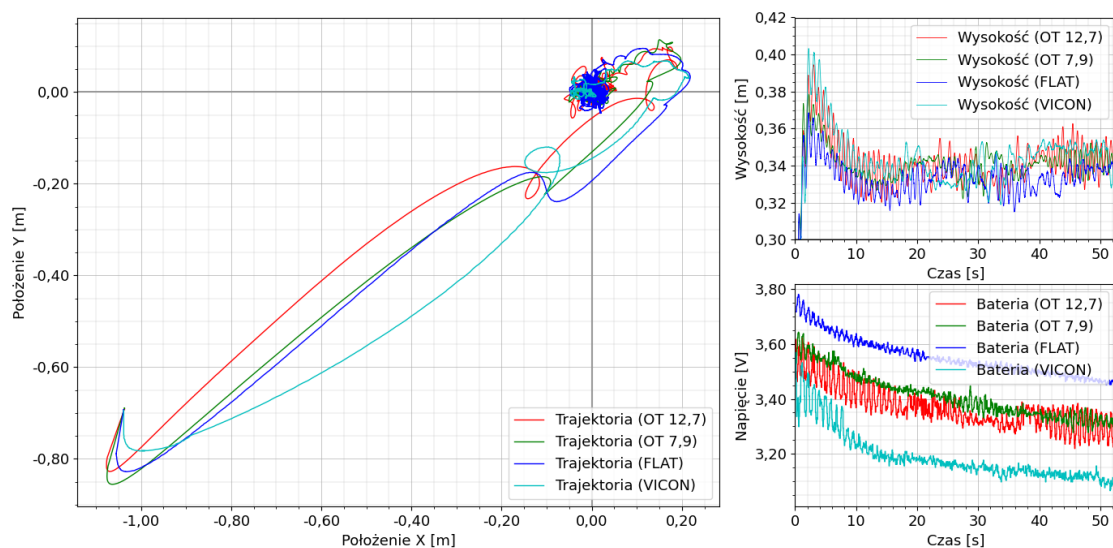
| Indeks baterii | Czas zawisu [s] | | | | Czas zawisu [%] | | | |
|----------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| | Vicon $\varnothing 14,0$ | OptiTrack $\varnothing 12,7$ | OptiTrack $\varnothing 7,9$ | MR/Flat $\varnothing 12,7$ | Vicon $\varnothing 14,0$ | OptiTrack $\varnothing 12,7$ | OptiTrack $\varnothing 7,9$ | MR/Flat $\varnothing 12,7$ |
| 1 | 118,02 | 135,17 | 159,34 | 159,85 | 73,8 | 84,6 | 99,7 | 100,0 |
| 2 | 221,85 | 225,51 | 239,99 | 255,24 | 86,9 | 88,7 | 94,0 | 100,0 |
| 3 | 159,35 | 168,46 | 218,87 | 225,43 | 70,7 | 74,7 | 97,1 | 100,0 |
| 4 | 182,59 | 188,61 | 219,85 | 233,02 | 78,4 | 80,9 | 94,4 | 100,0 |

Wyniki eksperymentów odnoszących się do drugiej lekkiej jednostki zawarto w tabeli 4.9. Dysproporcje w pomiarach były tutaj nieco mniejsze, choć w dalszym ciągu najdłuższy czas zawisu, gwarantowały markery płaskie. Wynikało to przede wszystkim ze znacznie większej nośności jednostki (prawie dwukrotnie). Czas zawisu w ujęciu markerów płaskich był do około 15 sekund dłuższy w porównaniu z markerami $\varnothing 7,9$ mm oraz do nieco ponad 55 sekund dłuższy w odniesieniu do markerów $\varnothing 12,7$ mm. Tutaj, podobnie jak poprzednio, konieczna była zmiana ustawień kamer, aby markery $\varnothing 7,9$ mm mogłyby być prawidłowo śledzone.

4.3.3 Odtwarzalność trajektorii

Ostatnia grupa eksperymentów odnosiła się do odtwarzalności trajektorii. Analizie poddany został wpływ masy markerów na lot jednostki. Sterowanie odbywało się za pośrednictwem wbudowanego regulatora, do którego przesyłane były informacje o położeniu jednostki oraz o punkcie docelowym. Podczas lotu rejestrowana była pozycja obiektu oraz napięcie baterii.

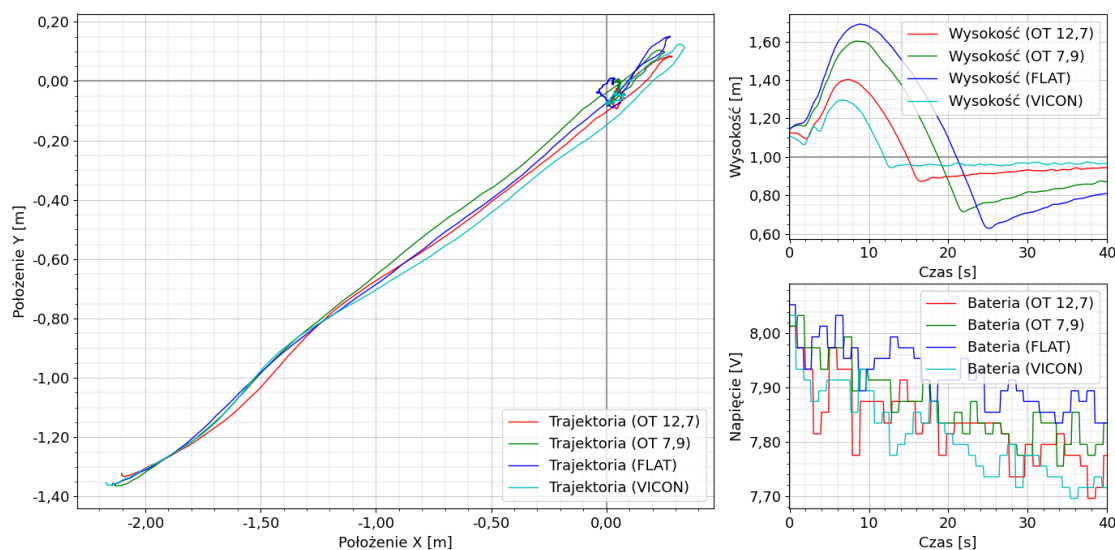
Trajektoria uzyskana przez Bitcraze Crazyflie 2.1 została przedstawiona na rysunku 4.19. Wykreślone trajektorie (osie X oraz Y), pomimo identycznego punktu początkowego oraz końcowego, są dość zróżnicowane i nie da się jednoznacznie wykazać tutaj wpływu znaczników na odtwarzalność trajektorii. Analizując natomiast przebiegi odnoszące się do wysokości, wyraźnie widać, że start jednostki jak i utrzymanie zadanej wysokości, są bardziej zróżnicowane w przypadku markerów sferycznych $\varnothing 14,0$ mm oraz $\varnothing 12,7$ mm, niż w ujęciu pozostałych, lżejszych znaczników. Koreluje to także z dynamiką spadku napięcia w trakcie trwania lotu — początkowe napięcie baterii zawsze wynosiło 4,15 V.



Rysunek 4.19: Trajektoria uzyskana dla lekkiej jednostki latającej Bitcraze Crazyflie 2.1. Podczas lotu rejestrowane było położenie jednostki w przestrzeni trójwymiarowej oraz wartość napięcia baterii.

W przypadku jednostki Flapper Nimble+ EDU różnice były bardziej znaczące. Choć sama trajektoria w osiach X oraz Y nie wykazywała znaczących rozbieżności pomiędzy testowanymi markerami, o tyle w przypadku osi Z , różnica w wysokości osiągała dziesiątki centymetrów. Uwypukła się tutaj cecha szczególna jednostki skrzydlatej, która przemieszczając się do przodu, zwiększa swoją wysokość „ślizgając” się po powietrzu. Efekt ten — zależnie od obciążenia — jest mniej lub bardziej widoczny. W przypadku najcięższych markerów (Vicon), najwyższy osiągnięty pułap to 130 centymetrów. Dla porównania, użycie najlżejszych znaczników (płaskich) skutkowało osiągnięciem wysokości aż 170 centymetrów. Podobna sytuacja miała miejsce w przypadku opadania jednostki i próby ustabilizowania się na wysokości 100 centymetrów. Obserwacja ta jest szczególnie krytyczna w ujęciu eksperymentalnego doboru nastaw regulatorów. W przypadku przeprowadzania testów z ciężkimi znacznikami, ich zmiana na lżejsze lub całkowity ich demontaż, będzie skutkowała zachowaniem się jednostki niezgodnym z oczekiwaniami. W tym kontekście wyraźnie widać przewagę znaczników płaskich, które pozwalają na uzyskanie warunków eksperymentu bliskich warunkom rzeczywistym, nie wprowadzając znaczącej rozbieżności między modelem matematycznym jednostki, a zachowaniem fizycznego robota. Oznacza to, że zachowanie jednostki po demontażu markerów płaskich, powinno być prawie identyczne jak z ich zastosowaniem¹⁸. Cecha ta jest również kluczowa z punktu widzenia przyszłych badań autora oraz badań społeczności akademickiej. Dotychczas zależność ta nie była szeroko poddawana pod rozwagę.

¹⁸Zakładając techniczną możliwość sterowania jednostką bez użycia systemu przechwytywania ruchu.



Rysunek 4.20: Trajektoria uzyskana dla lekkiej jednostki latającej Flapper Nimble+ EDU. Podczas lotu rejestrowane było położenie jednostki w przestrzeni trójwymiarowej oraz wartość napięcia baterii.

4.4 Podsumowanie

Niniejszy rozdział został poświęcony empirycznej weryfikacji poczynionych badań oraz analizie i ocenie wyników. Zaprezentowano platformy walidacyjne, przy użyciu których przeprowadzono eksperymenty. Scharakteryzowano dwie klasyczne konstrukcje lekkich wirnikowców (Bitcraze Crazyflie 2.1 oraz DJI Tello EDU), jedną konstrukcję skrzydlatą (Flapper Nimble+ EDU) oraz manipulator Kuka KR200/2. Przed rozpoczęciem eksperymentów, zdefiniowano warunki oraz scenariusze testów, co miało na celu zapewnienie spójności, powtarzalności i odtwarzalności badań. Zostały one określone dla wszystkich trzech laboratoriów oraz systemów przechwytywania ruchu, użytych w ramach prowadzonych prac badawczych. Są to dwa laboratoria w ramach Politechniki Poznańskiej oraz jedno laboratorium w Brandenburgische Technische Universität.

Właściwa część eksperymentów została podzielona na 3 zasadnicze etapy, nawiązujące do nakreślonych zagadnień — widoczności markerów, czasu trwania lotu oraz odtwarzalności trajektorii. Widoczność markerów obejmowała prace ukierunkowane na dobór ustawień kamer oraz na techniki materiałowe. Pierwsze z nich odnosiły się do zebrania charakterystyk systemów pomiarowych. W toku prac wykazano, że wynikowe wartości czasu ekspozycji są bardzo zbliżone w ramach pojedynczego systemu i mogą zostać uogólnione na wszystkie kamery, co zapewnia redukcję czasu potrzebnego na ich uzyskanie. Wartość progu detekcji nie wykazuje takiej zależności. Potencjalnie jest to związane z czynnikami środowiskowymi, ustawieniem ostrości, różnicami w procesie produkcyjnym lub specyfiką działania wbudowanego algorytmu przetwarzania obrazu po stronie kamer. W oparciu o zebrane dane, prze-

prowadzono testy walidacyjne z udziałem jednostki latającej w ramach 4 scenariuszy. Wyniki wykazały, że wartości czasu ekspozycji oraz progu detekcji proponowane przez algorytmy, pozwalają na polepszenie procesu śledzenia w stosunku do ustawień domyślnych. Co więcej, wykazano, że wartości te dużo lepiej odpowiadają warunkom danego laboratorium, niż ustawienia standardowe. Skutkuje to możliwością redukcji rozmiaru znacznika (a tym samym jego masy) lub zminimalizowaniem ryzyka wystąpienia fałszywych markerów w obszarze śledzenia. W ramach przeprowadzonych eksperymentów, możliwe było zredukowanie masy znaczników blisko trzykrotnie.

W ujęciu technik materiałowych, przeprowadzono ponad 1500 eksperymentów, które miały potwierdzić użyteczność alternatywnych materiałów w kontekście systemów przechwytywania ruchu jak i pozwolić na zredukowanie rozmiaru i masy znaczników. Eksperymenty rozpoczęto od walidacji na manipulatorze Kuka KR200/2. Taka kolejność była podyktowana przede wszystkim wysoką powtarzalnością ruchu oraz minimalnym błędem pozycjonowania. Testy przeprowadzono z udziałem 5 materiałów. Wykazano, że materiały IF mogą zostać wykorzystane do budowy znaczników płaskich, że ich widoczność kątowna jest wystarczająca do zastosowania na lekkich jednostkach latających oraz że możliwe jest uzyskanie wysokiej wartości kolistości tak wykonanych znaczników. Właściwe testy na jednostce latającej miały na celu sprawdzenie faktycznej użyteczności materiałów. Niektóre spośród nich zostały wykluczone z testów z uwagi na swoją charakterystykę, zarówno w ujęciu widoczności jak i braku fizycznej możliwości aplikacji na kulę. Eksperymenty obejmowały 3 scenariusze — umiejscowienie markerów płaskich bezpośrednio na korpusie robota latającego, umiejscowienie markerów płaskich oraz komercyjnych markerów sferycznych na specjalnym stelażu oraz wykonanie własnych markerów sferycznych i umieszczenie ich na stelażu. W ramach każdego z nich, sprawdzono widoczność znaczników oraz zebrano dane odnoszące się do wskaźników jakości. Wyniki prac walidacyjnych wykazały, że materiał IF-6 (VizLite 201HA) idealnie nadaje się zarówno do budowy markerów płaskich jak i sferycznych. Co bardzo ważne, po aplikacji na kulę, oferował on lepszą widoczność niż markery firm Vicon, OptiTrack, czy Qualisys. To w konsekwencji pozwala na redukcję rozmiaru oraz masy przy zachowaniu parametrów porównywalnych z produktami komercyjnymi.

Analiza czasu trwania lotu i odtwarzalności trajektorii stanowiły etap, mający na celu końcową ocenę wypracowanych rozwiązań. Testy przeprowadzono na dwóch lekkich jednostkach latających — Bitcraze Crazyflie 2.1 oraz Flapper Nimble+ EDU. Wykorzystano zarówno komercyjne markery sferyczne jak i markery płaskie, przygotowane przez autora rozprawy. Wykazano, że przy zastosowaniu markerów płaskich, możliwe jest wydłużenie czasu trwania lotu nawet dwukrotnie. Co więcej, przy zadaniu odpowiednich ustawień kamer, możliwe jest także użycie mniejszych, komercyjnych markerów (tu $\varnothing 7,9$ mm). Wpływ masy markerów na lekkie jednostki latające również został wykazany. Choć w przypadku osi X oraz Y różnice są trudno dostrzegalne, to zmiany w osi Z są widoczne. W przypadku jednostki wirnikowej, zmiana była zauważalna w trakcie startu oraz w początkowej fazie lotu. Sytuacja wyglądała odmiennie w ujęciu jednostki skrzydlatej. Tutaj, w przypadku płaskich markerów, widać znaczną zmianę wysokości w momencie lotu oraz stabilizacji w za-

danym punkcie. Choć przebieg dla markerów firmy Vicon (najcięższych spośród testowanych) wydaje się być bardziej pożądanym, to należy pamiętać, że to trajektoria wykreślona z markerami płaskimi była najbliższa naturalnej trajektorii drona (bez żadnego dodatkowego obciążenia). Ta rozbieżność wynikała ze sposobu doboru nastaw dla wewnętrznego regulatora przez producenta sprzętu. Niemniej jednak, wpływ masy markerów na lekkie jednostki latające jest tutaj wyraźnie widoczny, a konieczność jego minimalizacji wydaje się być w pełni uzasadniona.

Podsumowanie

Prowadzenie prac badawczych, odnoszących się do konstrukcji i sterowania lekkich jednostek latających, wymaga zastosowania systemów przechwytywania ruchu, które nie będą w znaczący sposób wpływać na zwiększenie masy jednostki oraz na odtwarzalność trajektorii lotu. Muszą one ponadto umożliwić śledzenie ruchu tak lekkich i delikatnych elementów, jak na przykład skrzydła. Podstawą dokładnego śledzenia ruchu jest użycie wysokiej jakości znaczników pasywnych, w które jednostki tego typu są wyposażane. Dostępne na rynku sferyczne markery retro refleksyjne, mają zbyt dużą masę lub są zbyt słabo widoczne, co znacząco ogranicza ich zastosowanie w ujęciu śledzenia ruchu lekkich jednostek latających. Stąd istotnym problemem badawczym, obecnym w literaturze tylko w niewielkim zakresie, jest taki dobór materiałów i kształtu znaczników oraz parametrów akwizycji obrazów, aby dokładność śledzenia lekkich robotów latających przez systemy optyczne, była porównywalna lub lepsza niż przy zastosowaniu markerów oferowanych przez producentów tychże systemów.

Naturalny krok stanowiło rozwiązanie, polegające na zastosowaniu markerów płaskich, których masa jest wielokrotnie mniejsza niż znaczników sferycznych. Skuteczne śledzenie takich markerów, wymagało zastosowania odpowiedniego materiału i precyzyjnego doboru parametrów kamer. Autor pracy rozwiązał powyższe problemy, stwarzając środowisku akademickiemu dogodne warunki do prowadzenia prac nad sterowaniem lekkich jednostek latających pod kontrolą systemów przechwytywania ruchu, minimalizując negatywny wpływ markerów pasywnych na czas trwania lotu oraz odtwarzalność trajektorii. Istota problemu została zauważona przez autora podczas uczestnictwa w międzynarodowym grantie The European Robotics Research Infrastructure Network TERRINet w ramach Horizon 2020 European Union funding for Research & Innovation w ośrodku Imperial College of London, którym to kierował.

Przygotowawcze prace badawcze obejmowały wprowadzenie wskaźników jakości, pozwalających na ocenę jakości śledzenia obiektu i markerów oraz mechanizmu wykrywania fałszywych znaczników. Mechanizm ten został zaproponowany w celu uodpornienia wskaźników na anomalie związane z pojawianiem się fałszywych markerów w przestrzeni roboczej. Kolejny etap stanowiły prace badawcze. Te odnosiły się do analizy wpływu temperatury kamer na widoczność markerów i dokładność pozycjonowania znaczników. Nakreślonych zostało kilka scenariuszy, silnie korelujących

z rzeczywistym użyciem systemów, tak aby uzyskane wyniki były jak najbardziej miarodajne. Zebrane dane jasno pokazały, że wraz ze wzrostem temperatury, pole powierzchni znacznika może zwiększyć się nawet o 8%-11%, zależnie od stopnia nagrzania jednostki rejestrującej obraz. Wykazano ponadto, że temperatura kamer ma znaczący wpływ na fluktuację pola powierzchni znacznika oraz wpływa na dokładność pomiaru. Błąd pomiaru może sięgać w niektórych przypadkach nawet milimetrów.

Identyfikacja czynników środowiskowych — w tym temperatury — pozwoliła rozpocząć badania nad zapewnieniem wysokiej widoczności markerów pasywnych. Badania obejmowały analizę wpływu wybranych ustawień kamer na widoczność znaczników oraz na proces śledzenia. Motywację stanowił fakt, że oprogramowanie dostarczane przez producenta systemu przechwytywania ruchu (NaturalPoint), oferuje tylko kilka ogólnych, predefiniowanych ustawień kamer, które nie zawsze odpowiadają charakterystyce danego laboratorium. Z tego powodu, przeanalizowano zależności związane z czasem ekspozycji oraz progiem detekcji, a rozmiarem pola powierzchni znacznika i dokładnością pozycjonowania obiektu. Wykazano, że możliwy jest taki dobór ustawień, aby zapewniona została lepsza widoczność markerów, bez negatywnego oddziaływania na dokładność systemu. Proces ten wymagał wiedzy eksperckiej, stąd dalsze badania ukierunkowano na wypracowanie rozwiązania, pozwalającego na automatyczny dobór wartości ustawień. Celem takiego podejścia było dotarcie do szerokiego grona badaczy, w tym tych, nieposiadających odpowiedniej wiedzy i doświadczenia w zakresie systemów przechwytywania ruchu. Algorytmy zostały zbudowane w oparciu o metodę dziel i zwyciężaj, co pozwoliło ograniczyć złożoność czasową i obliczeniową rozwiązania. Przeprowadzone testy wykazały, że możliwe jest uzyskanie lepszej widoczności markerów pasywnych przez osoby nieposiadające wiedzy eksperckiej, dokonując zmian ustawień tylko i wyłącznie na poziomie programowym. Co istotne, zmiany w widoczności markerów są na tyle znaczące, że możliwe jest zastosowanie znaczników o średnicy prawie dwukrotnie mniejszej, przy zachowaniu pełnej widoczności bryły. Markery te są trzykrotnie lżejsze, co znacząco redukuje narzut masy w ujęciu lekkiej jednostki latającej.

Dalsza redukcja narzutu systemów przechwytywania ruchu, odnosiła się do zastosowanych technik materiałowych. Przeprowadzony został kompleksowy przegląd materiałów dostępnych na rynku, zarówno nierefleksyjnych, refleksyjnych jak i retro refleksyjnych. Zbadano zarówno ich widoczność w kontekście rozmiaru pola powierzchni, generowanej poświaty jak i widoczności kątowej. Ta ostatnia cecha była szczególnie istotna z punktu widzenia budowy bardzo lekkich markerów płaskich. Eksperymenty wstępne przeprowadzono przy użyciu dedykowanego narzędzia, co pozwoliło na ograniczenie listy materiałów, tylko do tych widocznych. Eksperymenty kontynuowano na manipulatorze Kuka oraz na lekkiej jednostce latającej. Sprawdzono zarówno możliwość budowy znaczników płaskich jak i lekkich znaczników sferycznych. Łącznie przeprowadzono ponad 1500 eksperymentów. Wykazano, że na rynku znaleźć można materiał o charakterystyce pozwalającej na budowę lekkich, płaskich markerów pasywnych (cztery markery o średnicy 13,0 mm ważą zaledwie 0,3 grama), który to materiał jest powszechnie dostępny i wydaje się być doskonałym

wyborem także z ekonomicznego¹⁹ punktu widzenia. Materiał ten (VizLite 201HA, symbol: IF-6) może zostać z powodzeniem użyty również do budowy markerów sferycznych. Pozwala on na zapewnienie ciągłości śledzenia, redukując jednocześnie masę znaczników pasywnych, wpływającą negatywnie na jednostkę latającą.

Synteza wszystkich przedstawionych wyników badań, uzyskanych zarówno na Politechnice Poznańskiej jak i w Brandenburgische Technische Universität, pozwala na realne zmniejszenie narzutu systemów przechwytywania ruchu na lekkie jednostki latające. Bazując na wynikach w ujęciu doboru ustawień kamer, możliwe jest zapewnienie doskonałej widoczności markerów lub nawet zmniejszenie ich średnicy, a co za tym idzie ich masy. Zmiany te można dokonać praktycznie natychmiast, bez konieczności fizycznej ingerencji w sprzęt. Dzięki analizom odnoszącym się do technik materiałowych, możliwa jest budowa lekkich, dobrze widocznych znaczników. Efekty zmian są widoczne przede wszystkim w wydłużeniu czasu trwania lotu oraz odtwarzalności trajektorii. Wykazano, że czas ten może zostać wydłużony nawet dwukrotnie, a odtwarzanie trajektorii — szczególnie w ujęciu osi Z — potrafi zmienić się nawet o kilkadziesiąt centymetrów. Pokazuje to, że użycie dobrze widocznych, lecz ciężkich markerów, może zafałszować obraz charakterystyki danej jednostki latającej, a co za tym idzie doprowadzić do znaczących rozbieżności między modelem matematycznym, a zachowaniem fizycznego robota. Jest to szczególnie istotne w odniesieniu do lekkich jednostek latających, w przypadku których już same znaczniki pasywne wykorzystują znaczny procent ich nośności.

5.1 Ocena stopnia realizacji przyjętych celów

Ocenę stopnia realizacji założeń początkowych dokonać można w odniesieniu do hipotez oraz celów pracy, sformułowanych w rozdziale 1.2 niniejszej rozprawy.

Zaproponowane zostały wskaźniki jakości, pozwalające na ocenę jakości śledzenia obiektu oraz pojedynczych markerów pasywnych, składających się na niego. Ich walidacja została przeprowadzona w różnych laboratoriach, o różnej konfiguracji kamer, w ramach eksperymentów o odmiennej charakterystyce. Ich przydatność i poprawność zostały potwierdzone zarówno w analizie charakterystyk materiałów retrorefleksyjnych jak i automatycznego doboru ustawień kamer. Co więcej, wskaźniki te okazały się mieć także zastosowanie w przypadku wykrywania efektów rozmycia znaczników, czy też nieujętych w niniejszej rozprawie prac nad poprawą usytuowania kamer.

Analizy widoczności markerów, wpływu czynników środowiskowych na proces śledzenia oraz dobór ustawień kamer ukierunkowany na lekkie jednostki latające, poskutkowały zaproponowaniem algorytmów automatycznego doboru ustawień czasu ekspozycji oraz progu detekcji, dla optycznych systemów przechwytywania ruchu, działających w paśmie podczerwonym światła. Istotną cechą jest tutaj maksymalizacja widoczności znaczników, przy zachowaniu wysokiej dokładności śledzenia obiektu.

¹⁹Koszt wykonania pojedynczego markera płaskiego jest od 70 do 129 razy niższy od jednego znacznika sferycznego takich firm jak OptiTrack, Qualisys, czy Vicon. Cena to około 0,40 zł/sztuka.

Rozwiązanie zostało zaproponowane w taki sposób, aby nawet osoby niemające na co dzień styczności z systemami przechwytywania ruchu, mogły z niego skorzystać.

Zbadane zostały charakterystyki powszechnie dostępnych na rynku materiałów retro refleksyjnych, pod kątem możliwości ich zastosowania jako bardziej uniwersalne zamienniki dla markerów pasywnych, oferowanych przez producentów systemów przechwytywania ruchu. Analizy wykazały, że możliwe jest zastosowanie alternatywnych, tańszych materiałów oraz zmniejszenie masy markerów pasywnych. Znaleziony został materiał o parametrach widoczności lepszych, niż fabryczne markery. Co istotne, charakterystyka materiału pozwala na budowę markerów płaskich o bardzo dobrej widoczności kątowej. Znaczniki takie nie wymagają zestawów montażowych, nie wystają poza obrys jednostki oraz praktycznie nie wpływają na jej wyważenie. Badania nad możliwością ich użycia jako lekkich znaczników wpisują się w nurt trendów aktualnie obecnych na rynku.

Przeprowadzono także eksperymenty mające na celu określenie wpływu znaczników na lekkie jednostki latające, w kontekście czasu trwania lotu oraz odtwarzalności trajektorii. Do tego celu wykorzystano dwa typy jednostek, znaczniki fabryczne o różnych średnicach i masie, oraz markery płaskie, przygotowane przez autora niniejszej rozprawy. Wykazano, że markery płaskie oferują doskonałą widoczność, dzięki czemu nie jest wymagana ingerencja w ustawienia systemu, celem zapewnienia prawidłowej rekonstrukcji bryły. Co więcej, zapewniają niekiedy czas zawisu nawet o 50% dłuższy, niż w przypadku dobrze widocznych markerów sferycznych. Charakterystyka lotu, choć w przypadku osi X oraz Y wydawała się być bardzo zbliżona, znacznie różniła się w ujęciu osi Z . Różnica ta była szczególnie widoczna w przypadku jednostki skrzydlatej, której lot charakteryzuje się efektem wznoszenia. Zastosowanie markerów płaskich ukazało pełne spektrum tej zależności i uświadomiło jak hipotetycznie mogłaby wyglądać rozbieżność w odtwarzalności trajektorii w przypadku pominięcia markerów sferycznych na rzecz użycia wbudowanych sensorów pokładowych.

Niniejszym można stwierdzić, że postawione hipotezy zostały udowodnione, a cele pracy w pełni zrealizowane.

5.2 Oryginalność prac oraz wkład w rozwój nauki i oprogramowania

Prace przedstawione w niniejszej rozprawie, zostały poczynione zarówno na płaszczyźnie badawczej jak i inżynierskiej. Wynikało to przede wszystkim z chęci uzupełnienia braków dostrzeżonych w literaturze, jak i chęci dostarczenia społeczności rozwiązań, które mogą zostać wdrożone szybko i niskim kosztem. Stąd, wśród badań odnaleźć można analizę odnoszącą się do wpływu temperatury kamer na widoczność znaczników oraz na dokładność ich pozycjonowania. Dotychczas taka analiza nie była publicznie dostępna w literaturze. Inne przykłady to zbadanie zależności widoczności znaczników i dokładności ich pozycjonowania od ustawień kamer oraz badania nad wprowadzeniem uniwersalnych wskaźników jakości. Prace natury inżynierskiej odnosiły się do zagadnień, które pozwalają na realną poprawę użyteczności systemu

i mogą zostać zastosowane przez innych badaczy, nieposiadających wiedzy eksperckiej. Są to kompleksowy przegląd odnoszący się do materiałów retro refleksyjne o cechach pożądanых w ujęciu systemów przechwytywania ruchu oraz algorytmy pozwalające na automatyczny dobór ustawień kamer. Te ostatnie, umożliwiają istotne zwiększenie widoczności markerów. Mogą one zostać użyte praktycznie wprost przez czytelnika, co stanowi o potencjale nie tylko badawczym, ale także aplikacyjnym.

W ramach prowadzonych prac, istotny element stanowiły prace programistyczne. To one pozwoliły na zebranie niestandardowych danych z systemu oraz przeprowadzenie eksperymentów w sposób powtarzalny. Interfejsy programistyczne oferowane przez producenta systemu OptiTrack były testowane na wielu różnych płaszczyznach, od wysokopoziomowego pobierania danych o pozycji obiektu, po niskopoziomowe informacje odnoszące się do usytuowania kamer. Z uwagi na rozpiętość czasową prac, operowano na oprogramowaniu Motive zarówno w wersji 2.x jak i 3.x. Znalezione wiele problemów i zgłoszono wiele uwag, odnoszących się do braków w plikach źródłowych, nietypowych zależności w konfiguracji środowiska programistycznego, a także błędów. W Camera SDK w wersji 3.1.1, znaleziono błąd związany z niewłaściwym wyznaczaniem pola powierzchni pojedynczego znacznika. Został on potwierdzony przez dział wsparcia i nadano mu wewnętrzny numer referencyjny **SM3-580**. Potwierdzony został także krytyczny błąd odnoszący się do braku możliwości integracji Motive API z Camera SDK, czyli jednoczesnego wykorzystywania funkcji niski- i wysokopoziomowych. Z uwagi na złożoność problemu, błąd miał zostać naprawiony w wersji 3.2. Ostatecznie producent zdecydował o rezygnacji z tej funkcjonalności w kolejnych wydaniach oprogramowania.

5.3 Możliwe kierunki rozwoju

Pomimo tego, że poczynione prace pozwalają na znaczące ograniczenie wpływu masy markerów pasywnych na lekkie jednostki latające, możliwe są dalsze badania na rzecz uzyskania jeszcze lepszych rezultatów.

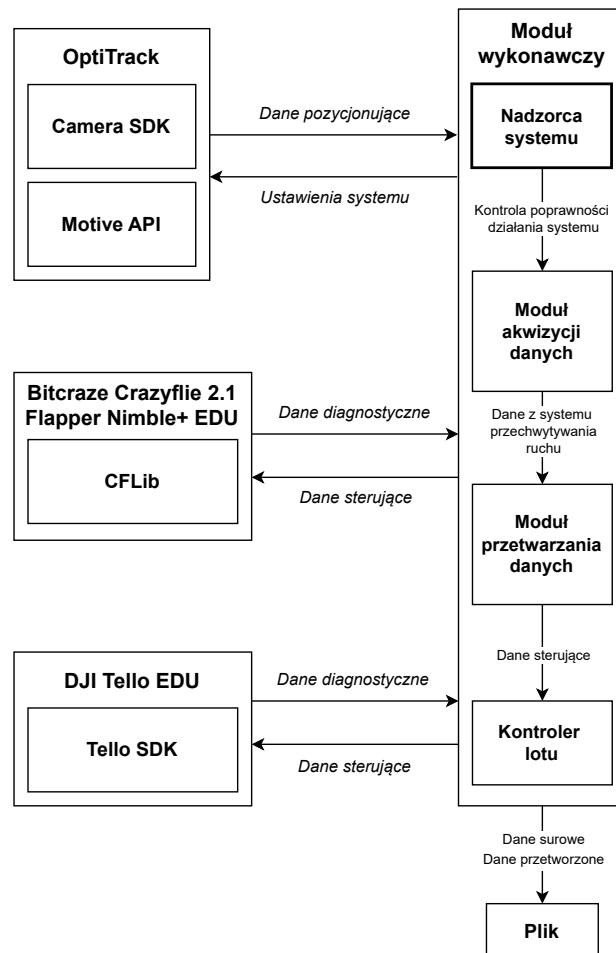
Zaprezentowane algorytmy doboru czasu ekspozycji oraz progu detekcji dla kamer, choć zwracają wyniki umożliwiające uzyskanie bardzo dobrej jakości śledzenia, to ich użycie może być czasochłonne. Zależnie od liczby próbkowanych częstotliwości oraz liczby użytych kamer, potrzebne może być nawet kilka godzin, aby uzyskać wszystkie parametry systemu. Proces ten może zostać zoptymalizowany poprzez przeprowadzenie badań nad minimalną liczbą kamer i częstotliwości, aby wyznaczyć globalną średnią wartość czasu ekspozycji przy użyciu algorytmu LMS. Wartość progu detekcji jest zdecydowanie trudniejsza do globalnego oszacowania, choć tutaj można rozważyć przebudowę algorytmu w taki sposób, aby proces doboru wartości przeprowadzać równocześnie dla kilku kamer.

Ciekawą mogłaby być także koncepcja usprawniająca automatyczny dobór ustawień kamer w sposób automatyczny i trwający zaledwie kilkanaście minut, niezależnie od liczby kamer składających się na system. Rozwiązanie takie mogłoby zostać zrealizowane w oparciu o jednostkę latającą, która miałaby przytwierdzone tylko jeden znacznik. Znając macierze dystorsji soczewek kamer oraz ich położenie, a także poło-

żenie znacznika, możliwe jest wyznaczenie odległości pomiędzy kamerą a markerem. To w konsekwencji może pozwolić na próbkowanie danych i dobór ustawień w czasie rzeczywistym, bazując na prostej zależności — zachowując te same ustawienia kamer, czym marker będzie znajdował się dalej od kamery, tym jego pole powierzchni będzie mniejsze.

Wątek odnoszący się do technik materiałowych również nie został wyczerpany. Choć z powodzeniem zbadane zostały markery płaskie i sferyczne, to nie przeprowadzono weryfikacji dla markerów pośrednich (czaszk kulistych), które mogłyby stanowić swego rodzaju kompromis pomiędzy masą, a dokładnością pozycjonowania. Dotyczy to głównie przypadków, kiedy śledzony marker płaski zaczyna tracić swoją kolistość i staje się elipsą. Zbadanie tego typu znaczników może być szczególnie istotne w przypadku jednostek, których pochylenie w wyniku lotu jest zauważalne (np. jednostki latające inspirowane naturą).

Model komunikacyjny



Rysunek A.1: Diagram przepływu danych w systemie. Przetwarzanie odbywało się w czasie rzeczywistym. W zależności od typu jednostki latającej, aktywowany był odpowiedni blok kontrolera lotu.

Rozszerzona tabela wyników

Tabela B.1: Wyniki testów materiałowych — uzupełnienie tabeli 4.5 ze strony 89. Wyniki odnoszą się tylko do materiałów IF-5 oraz IF-6 jako, że tylko one były widoczne we wszystkich przeprowadzonych eksperymentach.

| Trajektoria | $I_{\text{vis-all}}$ [%] | | | | | |
|-----------------------------|--------------------------|-------|------|------|-------|------|
| | IF-5 | | | IF-6 | | |
| | Min. | Maks. | Śr. | Min. | Maks. | Śr. |
| Średnica znacznika: 12,7 mm | | | | | | |
| T1 | 35,4 | 41,8 | 39,1 | 33,1 | 38,9 | 33,1 |
| T2 | 35,5 | 40,8 | 39,8 | 32,8 | 40,8 | 35,5 |
| R1 | 28,4 | 32,8 | 28,4 | 27,1 | 34,0 | 28,0 |
| R2 | 28,0 | 35,5 | 29,6 | 26,8 | 37,1 | 30,6 |
| R3 | 35,5 | 45,2 | 38,6 | 33,4 | 36,2 | 33,7 |
| Średnica znacznika: 10,5 mm | | | | | | |
| T1 | 23,6 | 32,4 | 31,2 | 33,7 | 40,1 | 37,2 |
| T2 | 22,2 | 31,9 | 29,3 | 34,6 | 39,5 | 38,4 |
| R1 | 26,2 | 28,6 | 27,4 | 30,2 | 33,8 | 31,4 |
| R2 | 19,1 | 25,8 | 22,5 | 26,9 | 34,2 | 31,2 |
| R3 | 30,2 | 37,5 | 33,1 | 37,2 | 45,8 | 39,7 |
| Średnica znacznika: 8,0 mm | | | | | | |
| T1 | 17,8 | 27,1 | 26,9 | 27,9 | 37,5 | 36,3 |
| T2 | 16,9 | 29,3 | 25,6 | 29,8 | 37,6 | 35,8 |
| R1 | 25,0 | 29,2 | 25,4 | 27,4 | 31,1 | 28,7 |
| R2 | 18,5 | 22,2 | 18,7 | 21,9 | 27,6 | 25,2 |
| R3 | 21,8 | 31,3 | 24,0 | 33,0 | 43,3 | 36,8 |
| Średnica znacznika: 5,5 mm | | | | | | |
| T1 | 8,2 | 13,6 | 13,2 | 14,9 | 24,1 | 23,7 |
| T2 | 5,5 | 15,1 | 11,2 | 12,7 | 25,5 | 22,7 |
| R1 | 8,2 | 13,7 | 10,2 | 20,7 | 24,5 | 20,8 |
| R2 | 4,4 | 7,5 | 5,3 | 10,6 | 16,0 | 12,5 |
| R3 | 6,6 | 10,7 | 6,8 | 15,8 | 25,2 | 16,9 |

Wykaz dorobku naukowego

Pogrubioną czcionką zaznaczono pozycje bezpośrednio związane z niniejszą rozprawą.

1. Michał Frąckowiak, Jakub Dutkiewicz, Czesław Jędrzejek, Marek Retinger, Paweł Werda, *Query Answering to IQ Test Questions Using Word Embedding*, Multimedia and Network Information Systems: Proceedings of the 10th International Conference MISSI 2016 (2017), pp. 283-294.
2. Grocholewska-Czuryło Anna, Retinger Marek, *Biometrics as an authentication method in a public key infrastructure*, Przegląd Elektrotechniczny R.93 (2017): pp. 60-64.
3. Grocholewska-Czuryło Anna, Retinger Marek, *Secure cloud services - extended cryptographic model of data storage*, Przegląd Elektrotechniczny R.94 (2018): pp. 162-167.
4. Retinger Marek, *A client-based encryption model for secure data storing in publicly available storage systems*, Computer Science (2019): pp. 179-194.
5. Koziński Piotr, Michalski Jacek, Ziętkiewicz Joanna, Retinger Marek, *A new network for particle filtering of multivariable nonlinear objects*, Energies (2020): art. no. 1355 (**140 pkt., IF = 3,2**).
6. Giernacki Wojciech, Koziński Piotr, Michalski Jacek, Retinger Marek, Madoński Rafał, Campoy Pascal, *Bebop 2 quadrotor as a platform for research and education in robotics and control engineering*, 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE, 2020, pp. 1733-1741.
7. Michalski Jacek, Koziński Piotr, Ziętkiewicz Joanna, Giernacki Wojciech, Retinger Marek, *MultiPDF particle filtering in state estimation of nonlinear objects*, Nonlinear Dynamics, (2021): 2165-2182 (**140 pkt., IF = 5,6**).
8. Michalski Jacek, Retinger Marek, Koziński Piotr, Puchalski Radosław, *Algorytm regulacji odpornej ADRC-dobór nastaw i sposób dyskretnej implementacji*, Pomiar Automatyka Robotyka (2022): pp. 5-13.

9. Giernacki Wojciech, Rao Jinjun, Sladic Sasa, Bondyra Adam, Retinger Marek, *DJI Tello Quadrotor as a Platform for Research and Education in Mobile Robotics and Control Engineering*, 2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE, 2022, pp. 735-744.
10. Michalski Jacek, Koziński Piotr, Retinger Marek, Ziętkiewicz Joanna, *Temperature Control Unit-Modeling and Implementation of a Particle Filter on a Microcontroller*, Applied Sciences (2022): art. no. 7631 (100 pkt., IF = 2,9).
11. Retinger Marek, Michalski Jacek, Koziński Piotr, Giernacki Wojciech, *Toward improving tracking precision in motion capture systems*, 2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), IEEE, 2023, pp. 919-925.
12. Michalski Jacek, Retinger Marek, Koziński Piotr, Giernacki Wojciech, *Position Control of Crazyflie 2.1 Quadrotor UAV Based on Active Disturbance Rejection Control*, 2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), IEEE, 2023, pp. 1106-1113.
13. Michalski Jacek, Mrotek Mikołaj, Retinger Marek, Koziński Piotr, *Adaptive Active Disturbance Rejection Control with Recursive Parameter Identification*, Electronics (2024), vol. 13, iss. 16, pp. 3114-1 - 3114-25 (100 pkt., IF = 2,6).
14. Retinger Marek, Michalski Jacek, Koziński Piotr, Drapikowski Paweł, *Ensuring High Visibility of Passive Markers at Fixed Camera Gain Using Divide and Conquer Method*, IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 9, no. 11, pp. 9741-9748, Nov. 2024 (200 pkt., IF = 4,6).
15. Retinger Marek, Michalski Jacek, Koziński Piotr, *Flat Marker: Reducing the weight of motion capture markers for micro flying robots*, Robotics and Autonomous Systems, vol. 184, Feb. 2025 (140 pkt., IF = 4,3).
16. Mrotek Mikołaj, Michalski Jacek, Madoński Rafał, Pazderski Dariusz, Retinger Marek, *Towards backward compatibility of ADRC: revisiting classical state-feedback control with integral compensator*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences (przyjęty, 100 pkt., IF = 1,2).

Spis tabel

| | | |
|-----|--|-----|
| 1.1 | Zestawienie najważniejszych akronimów użytych w rozprawie. | 16 |
| 2.1 | Zestawienie wybranych prac nad poprawą jakości śledzenia systemów przechwytywania ruchu. | 37 |
| 3.1 | Ilość danych transmitowanych przez pojedynczą kamerę | 47 |
| 3.2 | Wpływ ekspozycji na widoczność markerów | 57 |
| 3.3 | Lista uśrednionych wartości ekspozycji oraz progu detekcji | 57 |
| 3.4 | Porównanie testowanych materiałów 2D (część I). | 60 |
| 3.5 | Porównanie testowanych materiałów 2D (część II). | 61 |
| 3.6 | Porównanie testowanych materiałów 3D. | 61 |
| 3.7 | Lista przetestowanych materiałów retro refleksyjnych | 63 |
| 4.1 | Porównanie parametrów i cech badanych kamer systemu NaturalPoint OptiTrack | 77 |
| 4.2 | Zestawienie mas znaczników użytych podczas testów | 82 |
| 4.3 | Wyniki eksperymentów przeprowadzonych z udziałem markerów pasywnych ($\varnothing 12,7$ mm) | 86 |
| 4.4 | Wyniki eksperymentów przeprowadzonych dla markerów pasywnych ($\varnothing 7,9$ mm) | 87 |
| 4.5 | Wyniki testów materiałowych — materiał płaski montowany bezpośrednio na jednostce latającej | 89 |
| 4.6 | Porównanie jakości śledzenia między wybranymi markerami płaskimi a markerami sferycznymi | 90 |
| 4.7 | Lista materiałów zakwalifikowanych do testów uzupełniających | 91 |
| 4.8 | Czas trwania zawisu jednostki Bitcraze Crazyflie 2.1 przy zastosowaniu markerów o różnej masie | 93 |
| 4.9 | Czas trwania zawisu jednostki Flapper Nimble+ EDU przy zastosowaniu markerów o różnej masie | 94 |
| B.1 | Wyniki testów materiałowych — uzupełnienie tabeli 4.5 | 107 |

Spis rysunków

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Wybrane jednostki latające, na których prowadzono dotychczasowe badania | 13 |
| 1.2 | Graficzne porównanie pojęć dokładność i precyzja | 16 |
| 2.1 | Graficzne porównanie faz składających się na śledzenie i przechwytywanie ruchu. | 19 |
| 2.2 | Podstawowa klasyfikacja systemów przechwytywania ruchu | 20 |
| 2.3 | Uproszczony przykład działania systemu akustycznego | 21 |
| 2.4 | Uproszczony przykład działania systemu magnetycznego. | 22 |
| 2.5 | Uproszczony przykład działania systemu mechanicznego. | 23 |
| 2.6 | Uproszczony przykład działania systemu inercyjnego. | 23 |
| 2.7 | Uproszczona budowa kamery systemu przechwytywania ruchu. | 26 |
| 2.8 | Zestawienie różnych markerów pasywnych, używanych w ramach badań | 27 |
| 2.9 | Narzędzia kalibracyjne dedykowane dla systemów firmy NaturalPoint OptiTrack oraz przykładowy wynik kalibracji | 28 |
| 2.10 | Uproszczona procedura wyznaczania położenia znacznika w przestrzeni trójwymiarowej | 29 |
| 2.11 | Uproszczony schemat przetwarzania danych przez system przechwytywania ruchu. | 30 |
| 2.12 | Porównanie odbicia światła od powierzchni refleksyjnej i retro refleksyjnej | 30 |
| 2.13 | Struktura wybranych materiałów retro refleksyjnych | 31 |
| 2.14 | Porównanie skupienia wiązki odbitego światła w odniesieniu do technik szklanych kul oraz pryzmatycznych | 32 |
| 2.15 | Kierunki rozwoju systemów przechwytywania ruchu | 32 |
| 3.1 | Diagram przepływu algorytmu detekcji fałszywych znaczników. | 43 |
| 3.2 | Zmiana temperatury w czasie gdy system był podłączony do zasilania i rejestracja danych nie była aktywna | 46 |
| 3.3 | Zmiana temperatury w czasie gdy system był podłączony do zasilania i rejestracja danych była aktywna. | 46 |
| 3.4 | Zmiana pola powierzchni markera w trakcie testu | 47 |
| 3.5 | Zmiana temperatury w czasie gdy system był podłączony do zasilania i rejestracja danych nie była aktywna. | 48 |
| 3.6 | Narzędzie pozwalające na pomiar dokładności pozycjonowania | 49 |
| 3.7 | Dryf pomiarowy w osi X | 50 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.8 | Dryf pomiarowy w osi Y | 50 |
| 3.9 | Dryf pomiarowy w osi Z | 50 |
| 3.10 | Zależność pomiędzy czasem ekspozycji a polem powierzchni znacznika | 52 |
| 3.11 | Wpływ ekspozycji na widoczność markera | 56 |
| 3.12 | Porównanie struktury materiałów retro refleksyjnych wykonanych w różnych technikach | 59 |
| 3.13 | Narzędzie pomiarowe umieszczone w laboratorium wyposażonym w kamery OptiTrack Prime ^x 13W | 62 |
| 3.14 | Wizualizacja zależności rozmiaru pola powierzchni znacznika od kąta obrotu narzędzia pomiarowego | 65 |
| 3.15 | Wizualizacja zależności rozmiaru pola powierzchni znacznika od kąta obrotu narzędzia pomiarowego | 66 |
| 3.16 | Model siatki sfery oraz drewniane kule oklejone materiałem IF-6 | 67 |
| 4.1 | Lekka jednostka latająca wykorzystana w testach walidacyjnych – Bitcraze Crazyflie 2.1 | 70 |
| 4.2 | Lekka jednostka latająca wykorzystana w testach walidacyjnych – DJI Tello EDU | 71 |
| 4.3 | DJI Tello EDU z zamocowanymi markerami pasywnymi $\varnothing 12,7$ mm firmy OptiTrack | 72 |
| 4.4 | Lekka jednostka latająca wykorzystana w testach walidacyjnych – Flapper Nimble+ EDU | 73 |
| 4.5 | Manipulator Kuka KR200/2 | 74 |
| 4.6 | Zestawy testowe zamocowane do flanszy robota | 74 |
| 4.7 | Układy odniesienia systemu przechwytywania ruchu, kamer oraz platform walidacyjnych | 75 |
| 4.8 | Wizualizacja układu kamer w laboratorium Politechniki Poznańskiej (1) | 77 |
| 4.9 | Wizualizacja układu kamer w laboratorium Politechniki Poznańskiej (2) | 78 |
| 4.10 | Wizualizacja układu kamer w laboratorium Brandenburgische Technische Universität | 78 |
| 4.11 | Wizualizacja trajektorii eksperymentów odnoszących się do widoczności znaczników (1) | 80 |
| 4.12 | Wizualizacja trajektorii eksperymentów odnoszących się do widoczności znaczników (2) | 81 |
| 4.13 | Wizualizacja trajektorii eksperymentów odnoszących się do widoczności znaczników (3) | 81 |
| 4.14 | Wizualizacja trajektorii eksperymentów odnoszących się do odtwarzalności trajektorii | 83 |
| 4.15 | Wynik działania algorytmu wyznaczania wartości ekspozycji bliskiej minimum | 84 |
| 4.16 | Wynik działania algorytmu wyznaczania wartości progów detekcji bliskiej minimum | 85 |
| 4.17 | Charakterystyka trajektorii wykreślonej przez narzędzie manipulatora | 88 |
| 4.18 | Porównanie wyników dla materiałów zakwalifikowanych do testów uzupełniających | 92 |

| | |
|--|-----|
| 4.19 Trajektoria uzyskana dla lekkiej jednostki latającej Bitcraze Crazyflie | |
| 2.1 | 95 |
| 4.20 Trajektoria uzyskana dla lekkiej jednostki latającej Flapper Nimble+ | |
| EDU | 96 |
| A.1 Diagram przepływu danych w systemie | 105 |

Bibliografia

- [1] P. Acevedo, B. Rekabdar, and C. Mousas. Optimizing retroreflective marker set for motion capturing props. *Computers & Graphics*, 115:181–190, Oct. 2023. doi:10.1016/j.cag.2023.07.021.
- [2] A. Aissaoui, A. Ouafi, P. Pudlo, C. Gillet, Z.-E. Baarir, and A. Taleb-Ahmed. Designing a camera placement assistance system for human motion capture based on a guided genetic algorithm. *Virtual Reality*, 22(1):13–23, 2017. doi:10.1007/s10055-017-0310-7.
- [3] B. Allen, G. Bishop, and G. Welch. Tracking: Beyond 15 Minutes of Thought: SIGGRAPH 2001 Course 11. In *Computer Graphics, Annual Conference on Computer Graphics & Interactive Techniques*. ACM Press, Jan. 2001.
- [4] A. M. Aurand, J. S. Dufour, and W. S. Marras. Accuracy map of an optical motion capture system with 42 or 21 cameras in a large measurement volume. *Journal of Biomechanics*, 58:237–240, June 2017. doi:10.1016/j.jbiomech.2017.05.006.
- [5] Bitcraze AB. Crazyflie 2.1 - product information, 2024. Dostęp: 22.09.2024. URL: <https://www.bitcraze.io/products/old-products/crazyflie-2-1/>.
- [6] Bitcraze AB. Expansion decks of the Crazyflie 2.X, 2024. Dostęp: 22.09.2024. URL: <https://www.bitcraze.io/documentation/system/platform/cf2-expansiondecks/>.
- [7] S. Budholiya, A. Bhat, S. A. Raj, M. T. Hameed Sultan, A. U. Md Shah, and A. A. Basri. State of the Art Review about Bio-Inspired Design and Applications: An Aerospace Perspective. *Applied Sciences*, 11(11):5054, May 2021. doi:10.3390/app11115054.
- [8] V. Chamola, P. Kotesch, A. Agarwal, Naren, N. Gupta, and M. Guizani. A Comprehensive Review of Unmanned Aerial Vehicle Attacks and Neutralization Techniques. *Ad Hoc Networks*, 111:102324, Feb. 2021. doi:10.1016/j.adhoc.2020.102324.
- [9] X. Chen and J. Davis. Camera Placement Considering Occlusion for Robust Motion Capture. Technical report, Computer Graphics Laboratory, Stanford University, 2000. URL: https://graphics.stanford.edu/papers/OcclusionMetric/occlusion_metric.pdf.

- [10] S. Cole. All about reflective tape, 2023. Dostęp: 25.09.2024. URL: <https://reflectivetape.info/>.
- [11] S. L. Colyer, M. Evans, D. P. Cosker, and A. I. T. Salo. A Review of the Evolution of Vision-Based Motion Analysis and the Integration of Advanced Computer Vision Methods Towards Developing a Markerless System. *Sports Medicine - Open*, 4(1), June 2018. doi:10.1186/s40798-018-0139-y.
- [12] S. Darvishpoor, J. Roshanian, A. Raissi, and M. Hassanalian. Configurations, flight mechanisms, and applications of unmanned aerial systems: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, 121:100694, Feb. 2020. doi:10.1016/j.paerosci.2020.100694.
- [13] S. Dinakar, J. Suway, J. Muttart, D. Edewaard, and S. G. Macha. Systematic Degradation of Retroreflective Materials for Testing and Research. In *SAE Technical Paper Series*, pages 3044–3051. SAE International, Apr. 2021. doi:10.4271/2021-01-0853.
- [14] M. Field, D. Stirling, F. Naghdy, and Z. Pan. Motion capture in robotics review. In *2009 IEEE International Conference on Control and Automation*. IEEE, Dec. 2009. doi:10.1109/icca.2009.5410185.
- [15] Flapper s.r.o. Flapper Drones - Bioinspired flying robots, 2024. Dostęp: 22.09.2024. URL: <https://flapper-drones.com/>.
- [16] M. Folsom, P. Hausladen, J. Hayward, J. Nattress, and K. Ziock. Characterization of retroreflective tape optical properties for use with position-sensitive scintillator detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1005:165365, July 2021. doi:10.1016/j.nima.2021.165365.
- [17] P. Fotowicz. *Polska Administracja Miar Vademecum*. Główny Urząd Miar, 2015. Dostęp: 05.09.2024. URL: <https://www.gum.gov.pl/pl/wiedza/publikacje/polska-administracja-mi/515,Polska-administracja-miar-Vademecum.html>.
- [18] Z. Franjic, P. W. Woźniak, G. Kasparavičiūtė, and M. Fjeld. WAVI: improving motion capture calibration using haptic and visual feedback. In *Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, pages 254–265, Florence, Italy, 2016. doi:10.1145/2935334.2935374.
- [19] A. M. Franz, T. Haidegger, W. Birkfellner, K. Cleary, T. M. Peters, and L. Maier-Hein. Electromagnetic Tracking in Medicine—A Review of Technology, Validation, and Applications. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 33(8):1702–1725, Aug. 2014. doi:10.1109/tmi.2014.2321777.

- [20] J. S. Furtado, H. H. T. Liu, G. Lai, H. Lacheray, and J. Desouza-Coelho. Comparative Analysis of OptiTrack Motion Capture Systems. In *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pages 15–31. Springer International Publishing, 2019. doi:10.1007/978-3-030-17369-2_2.
- [21] P. Ganesh, K. Volle, P. Buzaud, K. Brink, and A. Willis. Extrinsic Calibration of Camera and Motion Capture Systems. In *SoutheastCon 2021*. IEEE, Mar. 2021. doi:10.1109/southeastcon45413.2021.9401911.
- [22] W. Giernacki, P. Koziński, J. Michalski, M. Retinger, R. Madonski, and P. Campoy. Bebop 2 Quadrotor as a Platform for Research and Education in Robotics and Control Engineering. In *2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. IEEE, Sept. 2020. doi:10.1109/icuas48674.2020.9213872.
- [23] W. Giernacki, J. Rao, S. Sladic, A. Bondyra, M. Retinger, and T. Espinoza-Fraire. DJI Tello Quadrotor as a Platform for Research and Education in Mobile Robotics and Control Engineering. In *2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. IEEE, June 2022. doi:10.1109/icuas54217.2022.9836168.
- [24] G. Giovannetti, S. Buscaglione, A. Nocco, and D. Formica. Design and validation of 3D printed hand interfaces for wrist stiffness assessment. In *2023 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*. IEEE, June 2023. doi:10.1109/memea57477.2023.10171924.
- [25] P. J. Green. Reversible jump Markov chain Monte Carlo computation and Bayesian model determination. *Biometrika*, 82(4):711–732, 1995. doi:10.1093/biomet/82.4.711.
- [26] X. Gu, Y. Zhang, W. Sun, Y. Bian, D. Zhou, and P. O. Kristensson. Dexmo: An Inexpensive and Lightweight Mechanical Exoskeleton for Motion Capture and Force Feedback in VR. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI’16. ACM, May 2016. doi:10.1145/2858036.2858487.
- [27] Y. Guo and C. Zhong. Motion Capture Technology and Its Applications in Film and Television Animation. *Advances in Multimedia*, pages 1–10, 2022. doi:10.1155/2022/6392168.
- [28] J. Han, Z. Hui, F. Tian, and G. Chen. Review on bio-inspired flight systems and bionic aerodynamics. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(7):170–186, July 2021. doi:10.1016/j.cja.2020.03.036.
- [29] R. Haratian. Motion Capture Sensing Technologies and Techniques: A Sensor Agnostic Approach to Address Wearability Challenges. *Sensing and Imaging*, 23(1), July 2022. doi:10.1007/s11220-022-00394-2.

- [30] M. Hassanalain and A. Abdelkefi. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, 91:99–131, May 2017. doi:10.1016/j.paerosci.2017.04.003.
- [31] T. J. Hoermann, S. Mills, M. Paulin, and S. Reusenzehn. The design and calibration of a 3D motion capture system for arthropods. In *2013 28th International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ 2013)*, pages 265–269. IEEE, 2013. doi:10.1109/ivcnz.2013.6727027.
- [32] S. I. Ismail, R. Adnan, and N. Sulaiman. *Reflection Rate Index of Markers for Motion Capture Application*, page 21–28. Springer Singapore, 2014. doi:10.1007/978-981-287-107-7_3.
- [33] Statistics - Vocabulary and symbols (ISO 3534-2:2006). Standard, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, Sept. 2006.
- [34] Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results (ISO 5725-1:2023). Standard, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, July 2023.
- [35] B. Janowska and A. Nowak. *Podstawy metrologii i techniki eksperymentu*. Politechnika Wrocławska, 2017. Dostęp: 05.09.2024. URL: <https://azon.e-science.pl/zasoby/podstawy-metrologii-i-techniki-eksperymentu,1602/>.
- [36] R. Kalman. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, 1960.
- [37] M. Kitagawa and B. Windsor. *MoCap for Artists*. Focal Press, Boston, 2008. doi:10.1016/B978-0-240-81000-3.50012-7.
- [38] W. W. T. Lam, Y. M. Tang, and K. N. K. Fong. A systematic review of the applications of markerless motion capture (MMC) technology for clinical measurement in rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 20(1), May 2023. doi:10.1186/s12984-023-01186-9.
- [39] T. T. Lan, K. Kanitpong, K. Tomiyama, A. Kawamura, and T. Nakatsuji. Effectiveness of retro-reflective tape at the rear of heavy trucks to increase visibility and reduce rear-end collisions. *IATSS Research*, 43(3):176–184, Oct. 2019. doi:10.1016/j.iatssr.2019.01.002.
- [40] C. J. Lee and J. K. Lee. Inertial Motion Capture-Based Wearable Systems for Estimation of Joint Kinetics: A Systematic Review. *Sensors*, 22(7):2507, Mar. 2022. doi:10.3390/s22072507.
- [41] M. Manns, M. Otto, and M. Mauer. Measuring Motion Capture Data Quality for Data Driven Human Motion Synthesis. *Procedia CIRP*, 41:945–950, 2016. doi:10.1016/j.procir.2015.12.068.

- [42] T. Mańkowski, J. Tomczyński, K. Walas, and D. Belter. PUT-Hand—Hybrid Industrial and Biomimetic Gripper for Elastic Object Manipulation. *Electronics*, 9(7):1147, July 2020. doi:10.3390/electronics9071147.
- [43] K. Mendes, F. Lemic, and J. Famaey. Small UAVs-supported Autonomous Generation of Fine-grained 3D Indoor Radio Environmental Maps. In *2022 IEEE 42nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW)*. IEEE, July 2022. doi:10.1109/icdcs56584.2022.00062.
- [44] M. Menolotto, D.-S. Komaris, S. Tedesco, B. O’Flynn, and M. Walsh. Motion Capture Technology in Industrial Applications: A Systematic Review. *Sensors*, 20(19):5687, 2020. doi:10.3390/s20195687.
- [45] J. Michalski, M. Retinger, P. Koziński, and W. Giernacki. Position Control of Crazyflie 2.1 Quadrotor UAV Based on Active Disturbance Rejection Control. In *2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. IEEE, June 2023. doi:10.1109/icuas57906.2023.10156505.
- [46] S. A. H. Mohsan, N. Q. H. Othman, Y. Li, M. H. Alsharif, and M. A. Khan. Unmanned aerial vehicles (UAVs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends. *Intelligent Service Robotics*, Jan. 2023. doi:10.1007/s11370-022-00452-4.
- [47] G. Nagymáté, T. Tuchband, and R. M. Kiss. A novel validation and calibration method for motion capture systems based on micro-triangulation. *Journal of Biomechanics*, 74:16–22, June 2018. doi:10.1016/j.jbiomech.2018.04.009.
- [48] NaturalPoint Inc. Camera specification: Prime 13W, 2024. Dostęp: 25.10.2024. URL: <https://optitrack.com/cameras/prime-13w/>.
- [49] NaturalPoint Inc. Camera specification: PrimeX 13, 2024. Dostęp: 25.10.2024. URL: <https://optitrack.com/cameras/primex-13/>.
- [50] NaturalPoint Inc. Camera specification: PrimeX 13W, 2024. Dostęp: 25.10.2024. URL: <https://optitrack.com/cameras/primex-13w/>.
- [51] NaturalPoint Inc. Quick Start Guide: Camera Heat – OptiTrack Documentation, 2024. Dostęp: 22.09.2024. URL: <https://docs.optitrack.com/quick-start-guides/quick-start-guide-precision-capture#camera-heat>.
- [52] NaturalPoint Inc. Quick Start Guides – OptiTrack Documentation, 2024. Dostęp: 01.09.2024. URL: <https://docs.optitrack.com/v/v2.3/quick-start-guides>.

- [53] K. D. Nguyen, I.-M. Chen, S. H. Yeo, and B.-L. Duh. Motion Control of a Robotic Puppet through a Hybrid Motion Capture Device. In *2007 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. IEEE, Sept. 2007. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/COASE.2007.4341793>, doi:10.1109/coase.2007.4341793.
- [54] K. Nymoén. *Methods and Technologies for Analysing Links Between Musical Sound and Body Motion*. PhD thesis, University of Oslo, Jan. 2013. Dostęp: 12.08.2024. URL: <https://www.duo.uio.no/handle/10852/34354>.
- [55] J. O'Rourke. *Art Gallery Theorems and Algorithms*. Oxford University Press, Inc., USA, 1987.
- [56] L. Pichierri, A. Testa, and G. Notarstefano. CrazyChoir: Flying Swarms of Crazyflie Quadrotors in ROS 2. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(8):4713–4720, Aug. 2023. doi:10.1109/lra.2023.3286814.
- [57] M. Popescu, D. Mronga, I. Bergonzani, S. Kumar, and F. Kirchner. Experimental Investigations into Using Motion Capture State Feedback for Real-Time Control of a Humanoid Robot. *Sensors*, 22(24):9853, 2022. doi:10.3390/s22249853.
- [58] A. Poscik, J. Szkudlarek, and G. Owczarek. Photometric Properties of Retroreflective Materials in Dependence on their Structure and Angle of Illumination. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 27(3):58–64, June 2019. doi:10.5604/01.3001.0013.0743.
- [59] P. E. I. Pounds, D. R. Bersak, and A. M. Dollar. Stability of small-scale UAV helicopters and quadrotors with added payload mass under PID control. *Autonomous Robots*, 33(1–2):129–142, Feb. 2012. doi:10.1007/s10514-012-9280-5.
- [60] C. Prakash, K. Gupta, A. Mittal, R. Kumar, and V. Laxmi. Passive Marker Based Optical System for Gait Kinematics for Lower Extremity. *Procedia Computer Science*, 45:176–185, 2015. doi:10.1016/j.procs.2015.03.116.
- [61] B. Pueo. High speed cameras for motion analysis in sports science. *Journal of Human Sport and Exercise*, 11(1):53–73, 2016. doi:10.14198/jhse.2016.111.05.
- [62] B. Pueo and J. M. Jimenez-Olmedo. Application of motion capture technology for sport performance analysis. *Retos*, 32(32):241–247, 2017. doi:10.47197/retos.v0i32.56072.
- [63] Qualisys AB. Introduction – Qualisys, 2024. Dostęp: 01.09.2024. URL: https://docs.qualisys.com/getting-started/content/getting_started/introduction.htm.
- [64] S. L. Raghu, C. kwon Kang, P. Whitehead, A. Takeyama, and R. Connors. Static accuracy analysis of Vicon T40s motion capture cameras arranged externally for

- motion capture in constrained aquatic environments. *Journal of Biomechanics*, 89:139–142, May 2019. doi:10.1016/j.jbiomech.2019.04.029.
- [65] P. Rahimian and J. K. Kearney. Optimal camera placement for motion capture systems in the presence of dynamic occlusion. In *Proceedings of the 21st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pages 129–138, New York, United States of America, 2015. doi:10.1145/2821592.2821596.
- [66] J. Rao, B. Li, Z. Zhang, D. Chen, and W. Giernacki. Position Control of Quadrotor UAV Based on Cascade Fuzzy Neural Network. *Energies*, 15(5):1763, Feb. 2022. doi:10.3390/en15051763.
- [67] M. Retinger, J. Michalski, and P. Koziński. Flat marker: Reducing the weight of motion capture markers for micro flying robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 184, Feb. 2025. doi:10.1016/j.robot.2024.104858.
- [68] M. Retinger, J. Michalski, P. Koziński, and P. Drapikowski. Ensuring High Visibility of Passive Markers at Fixed Camera Gain using Divide and Conquer Method. *IEEE Robotics and Automation Letters*, page 1–8, 2024. doi:10.1109/lra.2024.3464368.
- [69] M. Retinger, J. Michalski, P. Koziński, and W. Giernacki. Toward improving tracking precision in motion capture systems. In *2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pages 919–925, June 2023. doi:10.1109/ICUAS57906.2023.10156538.
- [70] A. S. Reuter and M. Schindler. Motion Capture Systems and Their Use in Educational Research: Insights from a Systematic Literature Review. *Education Sciences*, 13(2):167, Feb. 2023. doi:10.3390/educsci13020167.
- [71] C. Reverdy, S. Gibet, and C. Larboulette. Optimal marker set for motion capture of dynamical facial expressions. In *Proceedings of the 8th ACM SIGGRAPH Conference on Motion in Games, MIG '15*. ACM, Nov. 2015. doi:10.1145/2822013.2822042.
- [72] J. Rue, K. Chang, P. Ifju, R. Haftka, T. Schmitz, J. McIntire, C. Tyler, V. Ganguly, and A. Chaudhuri. *Fabrication and Analysis of Small Flapping Wings*, page 337–344. Springer New York, Sept. 2012. doi:10.1007/978-1-4614-4235-6_47.
- [73] A. Sadeghi-Niaraki and S.-M. Choi. A Survey of Marker-Less Tracking and Registration Techniques for Health & Environmental Applications to Augmented Reality and Ubiquitous Geospatial Information Systems. *Sensors*, 20(10):2997, May 2020. doi:10.3390/s20102997.
- [74] N. Saeed, S. Guo, K.-H. Park, T. Y. Al-Naffouri, and M.-S. Alouini. Optical camera communications: Survey, use cases, challenges, and future trends. *Physical Communication*, 37:100900, Dec. 2019. doi:10.1016/j.phycom.2019.100900.

- [75] S. D. Schofield, M. J. Edwards, and R. D. Green. Calibration for Camera-Motion Capture Extrinsic. In *2018 International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ)*, page 1–6. IEEE, Nov. 2018. doi:10.1109/ivcnz.2018.8634770.
- [76] T. Setati, N. Botha, and J. M. Roux. Experimental approach to calculate the moments of inertia of a hexacopter unmanned aerial vehicle. *MATEC Web of Conferences*, 370:05001, 2022. doi:10.1051/mateconf/202237005001.
- [77] P. Skurowski and M. Pawlyta. On the Noise Complexity in an Optical Motion Capture Facility. *Sensors*, 19(20):4435, Oct. 2019. doi:10.3390/s19204435.
- [78] D. R. Smith. The design of divide and conquer algorithms. *Science of Computer Programming*, 5:37–58, 1985. doi:10.1016/0167-6423(85)90003-6.
- [79] J. Solis, C. Karlsson, S. Johansson, and K. Richardsson. Towards the Development of an Automatic UAV-Based Indoor Environmental Monitoring System: Distributed Off-Board Control System for a Micro Aerial Vehicle. *Applied Sciences*, 11(5):2347, Mar. 2021. doi:10.3390/app11052347.
- [80] M.-H. Song and R. I. Godøy. Sound recording using optical marker-based motion tracking system: Relation between various constraints. *Journal of the Acoustical Society of America*, 140:3035–3035, Oct. 2016. doi:10.1121/1.4969422.
- [81] I. Stancic, T. Grujic Supuk, and A. Panjkota. Design, development and evaluation of optical motion-tracking system based on active white light markers. *IET Science, Measurement & Technology*, 7(4):206–214, July 2013. doi:10.1049/iet-smt.2012.0157.
- [82] F. Steinicke, C. P. Jansen, K. H. Hinrichs, J. Vahrenhold, and B. Schwald. Generating optimized marker-based rigid bodies for optical tracking systems. In A. Ranchordas, H. Araújo, and J. Vitrià, editors, *VISAPP 2007: Proceedings of the Second International Conference on Computer Vision Theory and Applications, Barcelona, Spain, March 8-11, 2007 - Volume 2*, pages 387–395. INSTICC - Institute for Systems and Technologies of Information, Control and Communication, 2007.
- [83] K. Telli, O. Kraa, Y. Himeur, A. Ouamane, M. Boumehraz, S. Atalla, and W. Mansoor. A Comprehensive Review of Recent Research Trends on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Systems*, 11(8):400, Aug. 2023. doi:10.3390/systems11080400.
- [84] J. Tomasi, B. Wagstaff, S. L. Waslander, and J. Kelly. Learned Camera Gain and Exposure Control for Improved Visual Feature Detection and Matching. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(2):2028–2035, Apr. 2021. doi:10.1109/lra.2021.3058909.

- [85] M. Topley and J. G. Richards. A comparison of currently available optoelectronic motion capture systems. *Journal of Biomechanics*, 106:109820, June 2020. doi:10.1016/j.jbiomech.2020.109820.
- [86] T. Uslu, E. Gezgin, S. Ozbek, D. Guzin, F. C. Can, and L. Cetin. Utilization of low cost motion capture cameras for virtual navigation Procedures: Performance evaluation for surgical navigation. *Measurement*, 181:109624, Aug. 2021. doi:10.1016/j.measurement.2021.109624.
- [87] E. van der Kruk and M. M. Reijne. Accuracy of human motion capture systems for sport applications; state-of-the-art review. *European Journal of Sport Science*, 18(6):806–819, May 2018. doi:10.1080/17461391.2018.1463397.
- [88] J. E. van Schaik and N. Dominici. *Motion tracking in developmental research: Methods, considerations, and applications*, page 89–111. Elsevier, 2020. doi:10.1016/bs.pbr.2020.06.007.
- [89] Vicon Motion Systems Ltd. Setup and connectivity documentation – Vicon, 2024. Dostęp: 01.09.2024. URL: <https://help.vicon.com/space/Connect>.
- [90] A. C. Vincent, H. Furman, R. C. Slepian, K. R. Ammann, C. D. Maria, J. H. Chien, K.-C. Siu, and M. J. Slepian. Smart Phone-Based Motion Capture and Analysis: Importance of Operating Envelope Definition and Application to Clinical Use. *Applied Sciences*, 12(12):6173, 2022. doi:10.3390/app12126173.
- [91] R. V. Vitali and N. C. Perkins. Determining anatomical frames via inertial motion capture: A survey of methods. *Journal of Biomechanics*, 106:109832, June 2020. doi:10.1016/j.jbiomech.2020.109832.
- [92] D. Vlastic, R. Adelsberger, G. Vannucci, J. Barnwell, M. Gross, W. Matusik, and J. Popović. Practical motion capture in everyday surroundings. *ACM Transactions on Graphics*, 26(3):35, July 2007. doi:10.1145/1276377.1276421.
- [93] T. Waltemate, F. Hülsmann, T. Pfeiffer, S. Kopp, and M. Botsch. Realizing a low-latency virtual reality environment for motor learning. In *Proceedings of the 21st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '15*. ACM, Nov. 2015. doi:10.1145/2821592.2821607.
- [94] A. D. Will, J. M. D. Martino, and J. Bezerra. An Optimized Marker Layout for 3D Facial Motion Capture. *Smart Tools and Apps for Graphics - Eurographics Italian Chapter Conference*, 2018. doi:10.2312/STAG.20181303.
- [95] B. Yang, H. Dong, and A. E. Saddik. Development of a Self-Calibrated Motion Capture System by Nonlinear Trilateration of Multiple Kinects v2. *IEEE Sensors Journal*, 17(8):2481–2491, 2017. doi:10.1109/jsen.2017.2671420.
- [96] X. Yang, B. Song, W. Yang, D. Xue, Y. Pei, and X. Lang. Study of aerodynamic and inertial forces of a dovelike flapping-wing MAV by combining experimental

and numerical methods. *Chinese Journal of Aeronautics*, 35(6):63–76, June 2022. doi:10.1016/j.cja.2021.09.020.

- [97] Y. Zheng and N. Li. Non-Asymptotic Identification of Linear Dynamical Systems Using Multiple Trajectories. *IEEE Control Systems Letters*, 5(5):1693–1698, Nov. 2021. doi:10.1109/lcsys.2020.3042924.