



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
im. Stanisława Staszica w Krakowie

**Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Elektroniki**

Katedra Automatyki

Praca dyplomowa magisterska

Imię i nazwisko: Michał Dajda
Grzegorz Łojek

Kierunek studiów: Automatyka i Robotyka

Temat pracy dyplomowej: Zastosowanie stereowizji do odtwarzania trajektorii obiektów w przestrzeni 3D

(Application of stereovision for reconstruction of object trajectory in 3D space)

Ocena:

Promotor pracy:
dr inż. Paweł Rotter

Kraków 2010

Składamy serdeczne podziękowania Panu dr inż. Pawłowi Rotterowi
za pomoc i cenne rady udzielone w czasie realizacji pracy.

Michał Dajda i Grzegorz Łojek

Spis treści:

1 Cel i zakres pracy.....	4
2 Stanowisko laboratoryjne	5
2.1 Wybór kamer	6
2.2 Scena	8
2.3 Wzorce kalibracyjne	9
2.4 Modele obiektów	12
2.5 Zdjęcia stanowiska.....	17
2.6 Zdjęcia testowe	18
3 Algorytmy rozpoznające obraz.....	19
3.1 Algorytm identyfikujący duży i mały wzorzec.....	19
3.2 Algorytm identyfikujący obiekty	26
4 Algorytm stereowizyjny	32
4.1 Transformacja płaska	32
4.2 Zastosowany algorytm stereowizyjny.....	40
5 Analiza dokładności w zależności od użytego wzorca, rozstawienia aparatów oraz analiza błędu ze względu na poszczególne współrzędne.....	47
5.1 Wpływ wielkości oraz położenia wzorca na dokładność algorytmu	47
5.2 Wpływ ustawienia kamer na dokładność algorytmu	50
5.3 Analiza błędu ze względu na poszczególne współrzędne.....	56
6 Porównanie wyników działania zastosowanego algorytmu stereowizyjnego oraz algorytmu bazowego.....	58
6.1 Porównanie wyników działania algorytmów dla przypadku ogólnego	58
6.2 Analiza działania algorytmu dla przykładowej sytuacji wystąpienia błędu algorytmu bazowego	61
6.3 Porównanie algorytmów – podsumowanie	68
7 Podsumowanie.....	69
8 Literatura.....	75

1 Cel i zakres pracy.

Celem naszej pracy było stworzenie systemu stereowizyjnego mogącego odtwarzać położenie obiektów w przestrzeni trójwymiarowej oraz śledzić trajektorie szybko poruszających się obiektów. Docelowym zastosowaniem takiego systemu może być sterowanie robotem przemysłowym, nawigacja robota mobilnego, jak również analiza zjawisk fizycznych (na przykład analiza toru lotu piłeczki pingpongowej), czy analiza trajektorii elementu układu mechanicznego. Projekt stanowiska uwzględnia możliwość nagrywania sekwencji z szybkością 60 klatek na sekundę w wysokiej rozdzielczości (HD 1920×1080) oraz do 1200 klatek na sekundę, przy obniżonej rozdzielczości. W ramach stanowiska wykonane również zostały dokładne (dokładność rzędu 2 mm) modele, niezbędne do weryfikacji poprawności działania algorytmu i oszacowania jego dokładności. Wykonaliśmy 560 zdjęć testowych, z 810 punktami pomiarowymi, w celu zbadania dokładności oraz trzy sekundowe sekwencje, demonstrujące wyniki działania algorytmu oraz możliwości, jakie stwarza zbudowane stanowisko. Ponieważ do określenia precyzji pomiarów najlepiej nadają się nieruchome obiekty, o znanym położeniu, przyjęliśmy, że nasz algorytm operować będzie na zdjęciach. Obiekty na obrazie rozpoznawane są na podstawie koloru. Za podstawę matematyczną systemu stereowizyjnego przyjęliśmy złożenie transformacji płaskich. Dodatkowo, w czasie wstępnych eksperymentów wykryliśmy szczególną sytuację, w której przyjęta metoda nie działa, lub daje błędny rezultat. W ramach pracy przeanalizowaliśmy działanie metody, znaleźliśmy przyczynę błędnych rezultatów oraz zaproponowaliśmy rozwiązanie. Przeprowadzone testy obejmują porównanie implementacji metody bazowej oraz zmodyfikowanej. W ramach pracy przeanalizowaliśmy również wpływ układu kamer oraz wielkości wzorca na dokładność metody.

Michał Dajda jest autorem rozdziałów: 2.2 Scena, 2.3 Wzorce kalibracyjne, 2.4 Modele obiektów, 2.5 Zdjęcia stanowiska, 4 Algorytm stereowizyjny, 6 Porównanie wyników działania zastosowanego algorytmu stereowizyjnego oraz algorytmu bazowego. Był odpowiedzialny za implementację algorytmu stereowizyjnego, budowę modeli oraz porównanie wyników algorytmu bazowego z algorytmem zmodyfikowanym o nasze rozwiązanie.

Łojek Grzegorz jest autorem rozdziałów: 1 Wstęp, 2.1 Wybór kamer, 2.6 Zdjęcia testowe, 3 Algorytmy rozpoznające obraz, 5 Analiza dokładności w zależności od użytego wzorca, rozstawienia aparatów oraz analiza błędu ze względu na poszczególne współrzędne, 7 Podsumowanie. Był odpowiedzialny za implementację algorytmu rozpoznającego obraz, zaprojektowanie testów oraz porównanie wyników w zależności od ustawień kamer oraz wzorców.

Pozostałe czynności były wykonane wspólnie (jak wykonanie wzorców, wykonanie zdjęć testowych) lub przez obu autorów niezależnie, celem sprawdzenia wyników (jak matematyczna analiza metody).

2 Stanowisko laboratoryjne.

Jednym z celów, jaki przyjęliśmy było stworzenie stanowiska laboratoryjnego umożliwiającego odtworzenie trajektorii 3D szybko poruszających się obiektów. Wstępne eksperymenty pokazały, że standardowe 30 klatek na sekundę w większości przypadków nie wystarcza do analizy ruchu. Oczywiście wszystko zależy od szybkości obiektu i oczekiwanej rozdzielczości, pomiędzy kolejnymi położeniami obiektu. Jeżeli przyjmujemy, że wystarczy nam rozdzielczość rzędu 10mm, to mając sprzęt zdolny zarejestrować 1000 klatek na sekundę (fps) możemy obserwować obiekty poruszające się z prędkością 10 m/s. Dla porównania przenośniki taśmowe firmy AMSORT serii NT150 dla obciążenia do 35kg rozwijają maksymalną prędkość 31m/min, przenośniki rolkowe serii NT251 dla obciążenia do 50kg pracują przy prędkości 30m/min. Średnia prędkość piłeczki pingpongowej wynosi 7,78m/s, rekordowa 26,67m/s (Ernst K., Kołodziejczyk J.: „Fizyka ping-ponga”).

Do odtwarzania trajektorii potrzebujemy dwóch lub więcej kamer, lub jednej w układzie katadioptrycznym. Kamery muszą mieć możliwie jak największą rozdzielczość, bo od niej będzie zależała dokładność badań, oraz szybkość rejestracji obrazu. Układ powinien umożliwiać synchronizację nagrania z dwóch kamer oraz możliwość nagrywania normalnych sekwencji lub robienia zdjęć w celu rozszerzenia możliwości stanowiska w dziedzinie badań systemów wizyjnych.

W ramach stanowiska potrzebne są również ‘scena’, obiekty badane oraz wzorce. Pod pojęciem ‘scena’ rozumiemy przestrzeń dla wykonywanych doświadczeń, powinna być możliwie jednolita, stanowić neutralne tło, niewprowadzające zakłóceń. Obiekty badane muszą umożliwiać dowolne pozycjonowanie w obrębie sceny oraz wykonanie pojedynczego lub wielu pomiarów. Wzorce kalibracyjne muszą zostać wykonane możliwie precyzyjnie. Oprócz małego wzorca używanego podczas wstępnych testów wykonany został również duży wzorzec, który znacznie poprawił dokładność algorytmu.

2.1 Wybór kamer.

Szybkie kamery przemysłowe

Po korespondencji i negocjacjach z dystrybutorami, rozważone zostały następujące kamery przemysłowe:

Kamera zaproponowana przez firmę Vigo System
1280x1024 1000 fps ponad 7500 EUR

PointGrey Grasshopper
2448x2048 15 fps
640x480 200 fps ponad 2000 USD

PointGrey DrogonFly
648x488 60 fps ponad 1000 USD

Zaletą tych kamer jest możliwość synchronizacji, przystosowanie do budowy systemów wizyjnych, interfejs Gigabit Ethernet, możliwość zasilania sieciowego. Podstawową wadą, która przeważała o ich odrzuceniu jest cena, przy czym tańsze kamery nie spełniają naszych oczekiwań.

Szybki aparat fotograficzny



Rys. 2.1. Casio Exilim EX-F1.

Dla naszych zastosowań, jako alternatywa dla zbyt kosztownych kamer przemysłowych, znalezione zostały szybkie aparaty cyfrowe. Wybór padł na Casio Exilim EX-F1 (Rysunek 2.1, dokładna specyfikacja znajduje się w załączniku A) ponieważ to obecnie najszybszy aparat fotograficzny zdolny nagrywać filmy przy szybkości 1200 fps w rozdzielczości 336x96. Zostały zakupione dwa takie aparaty. Z punktu widzenia stanowiska takie rozwiązanie było optymalne, ze względu na niewielki koszt aparatów (rzędu 2.500PLN za sztukę) dających bardzo duże możliwości w zakresie robienia zdjęć w wysokiej rozdzielczości, nagrywania filmów w wysokiej rozdzielczości, oraz nagrywania filmów w zwiększonej szybkości przy obniżonej rozdzielczości. Dwa aparaty umożliwiają budowę systemu stereowizyjnego.

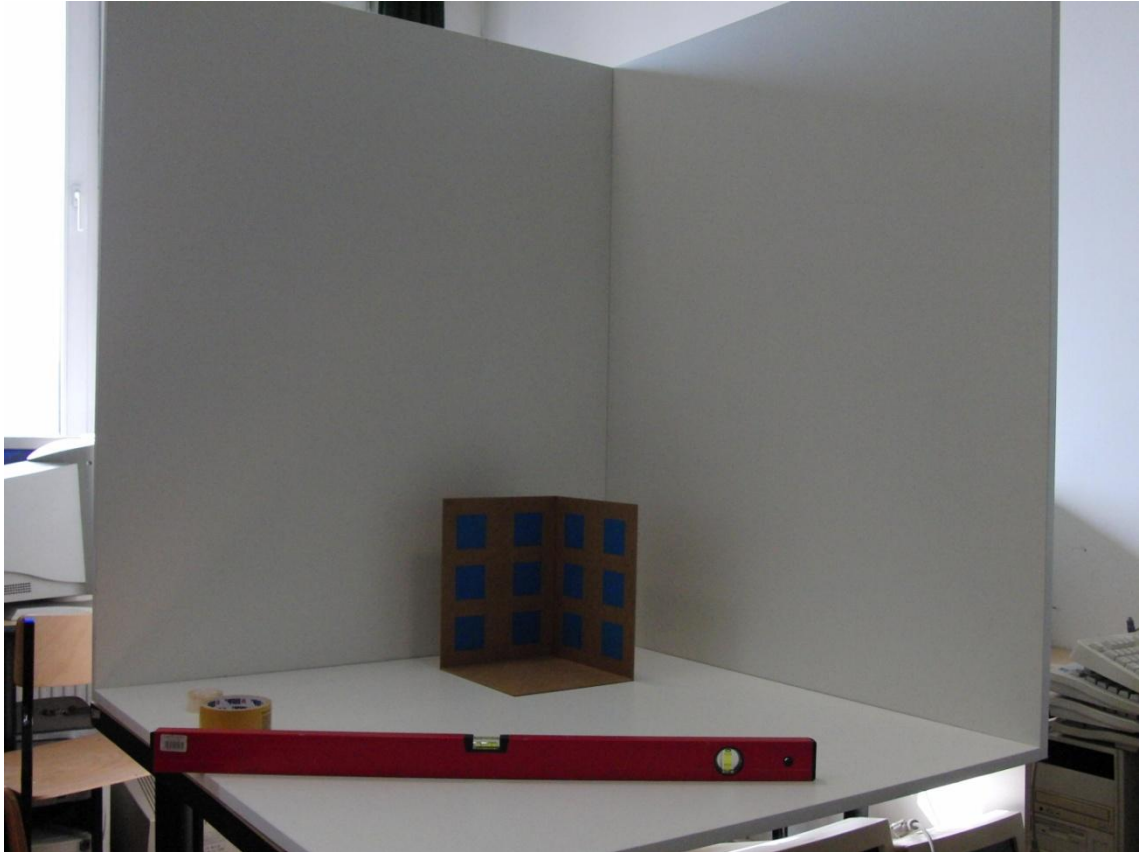
TYP NAGRANIA	SZYBKOŚĆ	ROZDZIELCZOŚĆ
STD	30 fps	640 × 480
HD	60 fsp	1920 × 1080
HD LP	30 fps	1280 × 720
Hi-Speed	300 fps	512 × 384
Hi-Speed	600 fps	432 × 192
Hi-Speed	1200 fps	336 × 96
Zdjęcia	1 (do 60 w ciągu sekundy)	2816 x 2112

Tabela 2.1. Możliwości nagrywania aparatu Exilim EX-F1.

Wybrane rozwiązanie wymaga pewnej adaptacji laboratoryjnej gdyż aparaty nie posiadają możliwości zsynchronizowania wyzwania w celu synchronizacji filmów. Potrzebny byłby do tego dodatkowy układ, lub synchronizacja programowa na bazie charakterystycznego zdarzenia na obrazie. Rozważane były migająca dioda lub błysk lampy błyskowej. Ostatecznie, żeby nie rozszerzać tematu pracy postanowiono, że dalsze działania oparte będą na zdjęciach. Odtwarzanie trajektorii mogłoby odbywać się na bazie poszczególnych klatek materiału filmowego, więc nie tracimy na ogólności rozważań, zyskując jednocześnie na prostocie pozyskiwania materiału do analizy. Ponadto w celu zbadania dokładności metody, badany obiekt musiałby znajdować się w spoczynku w precyzyjnie wyznaczonym miejscu celem porównania wyniku algorytmu z rzeczywistością.

2.2 Scena.

Idealną przestrzenią byłby narożnik pomieszczenia pomalowanego na biało, pozbawionego okien, w celu wykluczenia różnic w oświetleniu. W całej przestrzeni, którą widzą aparaty nie powinny stać żadne inne przedmioty z wyjątkiem tych przewidzianych przez eksperyment. W praktyce warunki te nie zawsze mogą być spełnione, postanowiliśmy jednak zbudować scenę przynajmniej częściowo spełniającą te warunki.



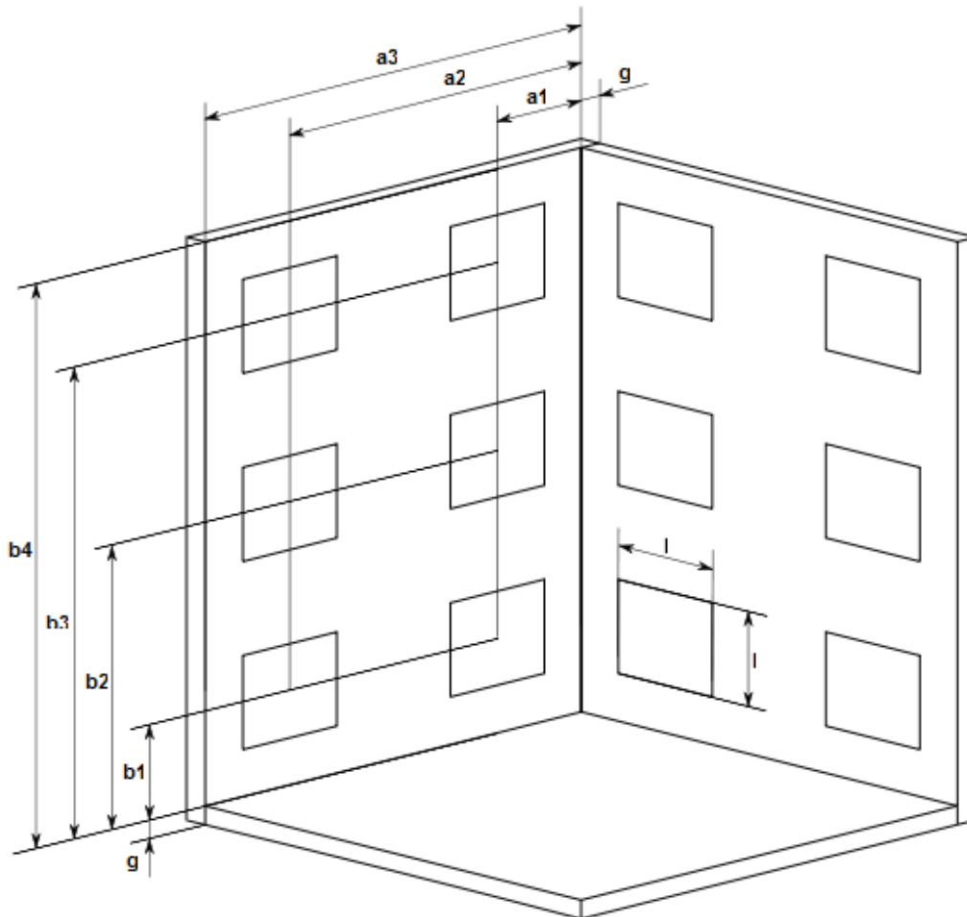
Rys. 2.2. Scena.

Konstrukcja sceny składa się z trzech elementów prostopadłych do siebie. Wykorzystane zostały one z płyt wiórowych. Wymiary uzyskanej przestrzeni roboczej to: wysokość 1,1 m, przekątna podstawy 1,4 m. Scena zapewnia jednolite tło dla doświadczeń i przestrzeń umożliwiającą dokonanie pomiarów, a także układ odniesienia. Wszystkie zdjęcia testowe zostały wykonane w taki sposób, że obejmują obszar większy niż zbudowana scena. Wynika to z dążenia do wykorzystania całej przestrzeni sceny oraz z zastosowanych układów dwóch kamer. Tło znajdujące się za sceną będziemy traktować, jako zakłócenie i eliminować programowo. Niestety względy praktyczne nie pozwoliły na stworzenie większej sceny (ilość zajmowanego miejsca, ciężar, stabilność konstrukcji).

2.3 Wzorce kalibracyjne.

Wzorce kalibracyjne należą do elementów stanowiska. Poprzez umieszczenie w znanym położeniu względem globalnego układu współrzędnych pozwalają na kalibrację układu stereowizyjnego, niezbędną dla jego prawidłowej pracy.

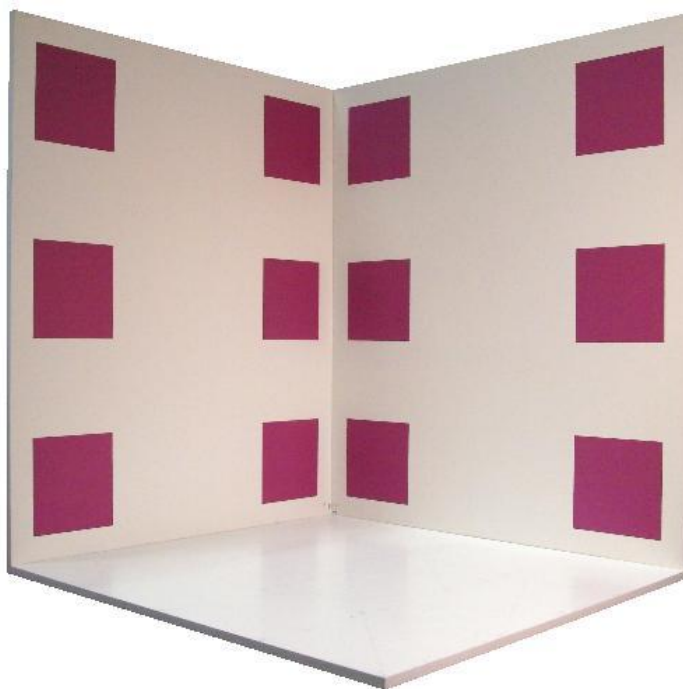
Konstrukcja wzorców składa się z trzech elementów prostopadłych do siebie. Wykorzystane zostały one z płyt wiórowych, które cechuje sztywność i jednolitość powierzchni przy relatywnie niewielkiej masie. Punkty definiujące płaszczyzny lokalne zostały określone jako środki geometryczne barwnych pól umieszczonych na wzorcu. Pola mają postać kwadratowych kartonów naklejonych na wzorcu i są rozmieszczone symetrycznie na obu płaszczyznach. Każda płaszczyzna lokalna definiowana jest poprzez sześć pól (punktów), przez co zwiększona jest dokładność identyfikacji w stosunku do minimalnej możliwej ilości punktów wynoszącej cztery (Rozdział 4.1.1). Schemat wzorca przedstawiony jest na Rys. 2.3.



Rys. 2.3. Schemat wzorca kalibracyjnego.

2.3.1 Wzorzec pierwszy.

Wzorzec umieszczony jest bezpośrednio na konstrukcji sceny. Stworzony został przede wszystkim z myślą o obserwacji i badaniu zjawisk w całym obszarze sceny. Jego rozmiary i waga powodują, iż jest on mało mobilny, przeznaczony raczej dla stacjonarnych układów stereowizyjnych. Zdjęcie wzorca pierwszego prezentuje Rys. 2.4.



Rys. 2.4. Zdjęcie wzorca pierwszego.

Wymiary:

$$a1 = 160 \text{ [mm]},$$

$$a2 = 840 \text{ [mm]},$$

$$a3 = 1000 \text{ [mm]},$$

$$b1 = 160 \text{ [mm]},$$

$$b2 = 580 \text{ [mm]},$$

$$b3 = 1000 \text{ [mm]},$$

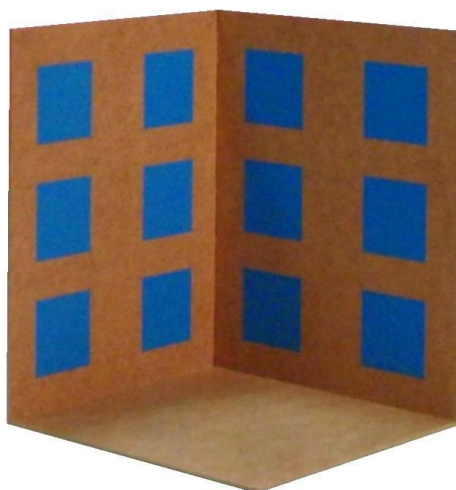
$$b4 = 1162 \text{ [mm]},$$

$$l = 210 \text{ [mm]},$$

$$g = 18 \text{ [mm]}.$$

2.3.2 Wzorzec drugi.

Wzorzec stworzony przede wszystkim z myślą o obserwacji i badaniu zjawisk w niewielkich obszarach przestrzeni. Ze względu na małe rozmiary i wagę może być wykorzystywany w systemach przenośnych lub wymagających częstej zmiany konfiguracji a tym samym ponownej identyfikacji. Zdjęcie wzorca drugiego prezentuje Rys. 2.5.



Rys. 2.5. Zdjęcie wzorca drugiego.

Wymiary:

$$a1 = 60 \text{ [mm]},$$

$$a2 = 180 \text{ [mm]},$$

$$a3 = 237 \text{ [mm]},$$

$$b1 = 57 \text{ [mm]},$$

$$b2 = 147 \text{ [mm]},$$

$$b3 = 237 \text{ [mm]},$$

$$b4 = 297 \text{ [mm]},$$

$$l = 60 \text{ [mm]},$$

$$g = 3 \text{ [mm]}.$$

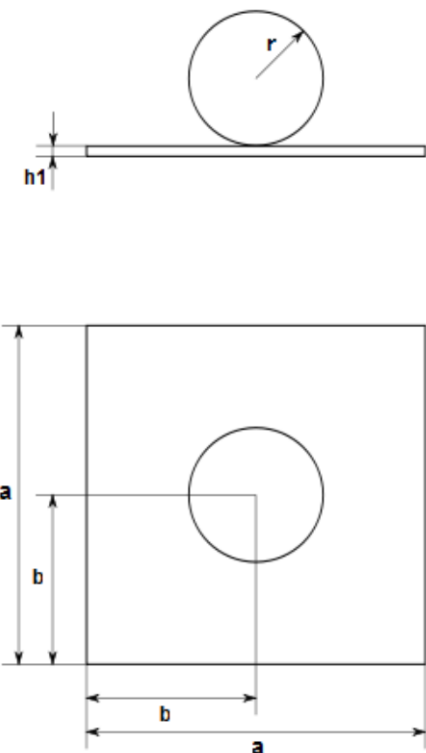
2.4 Modele obiektów.

Modele obiektów należą do elementów stanowiska. Pozwalają na umieszczenie badanych obiektów w znanych położeniach względem globalnego układu współrzędnych. Dzięki temu możliwe jest porównanie wyników otrzymywanych jako efekt pracy algorytmów z pomiarami położenia rzeczywistego, co jest podstawą oceny jakości algorytmów.

Jako obiekt badany wybrana została kula w kolorze zielonym, wykonana z piłeczki pingpongowej. Modele obiektów zawierają kule w wybranym kolorze. Pozwala to możliwie najlepiej odzwierciedlić cechy obiektu, w tym kształt, wielkość, kolor i fakturę powierzchni. Wyjątkiem jest model drugi, który zawiera kulę z tworzywa sztucznego. Wynika to z zastosowanego sposobu mocowania, wymagającego możliwość wykonania wydrążenia i gwintowania. Konstrukcja modeli wykonana jest z elementów aluminiowych, które cechuje duża sztywność i możliwość obróbki przy relatywnie niewielkiej masie. W większości przypadków do łączenia elementów zastosowane zostały połączenia gwintowane, dzięki czemu możliwy jest dość prosty demontaż oraz wymiana elementów.

2.4.1 Model pierwszy.

Model zawiera jeden obiekt. Jest on przymocowany w sposób trwały do podstawy. Model pozwala na precyzyjne umiejscowienie obiektu w ramach jednej płaszczyzny. Model pierwszy przedstawiony jest na Rys. 2.6 oraz Rys. 2.7.



Rys. 2.6. Schemat modelu pierwszego.



Rys. 2.7. Zdjęcie modelu pierwszego.

Wymiary:

$$a = 100 \text{ [mm]},$$

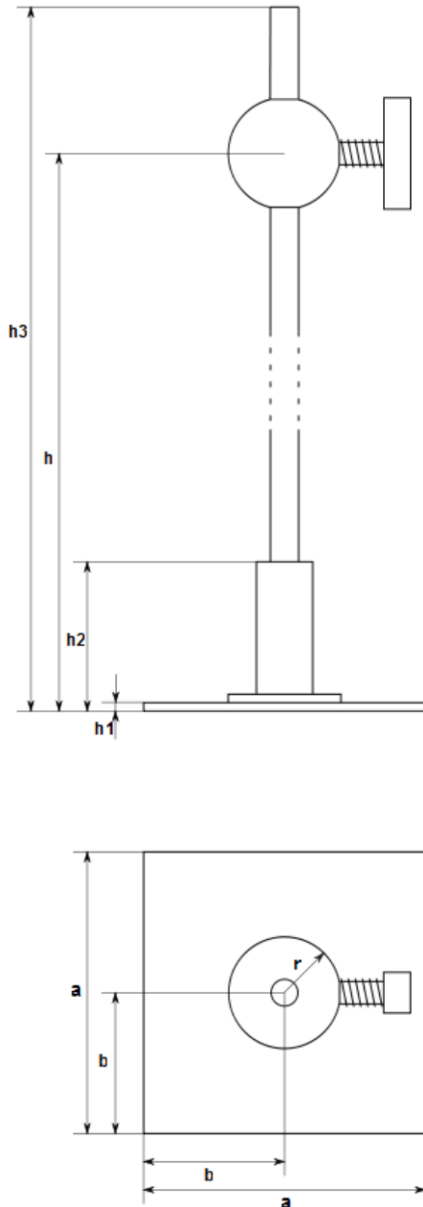
$$b = 50 \text{ [mm]},$$

$$h_1 = 3 \text{ [mm]},$$

$$r = 20 \text{ [mm]}.$$

2.4.2 Model drugi.

Model zawiera jeden obiekt. Znajduje się on na prowadnicy przymocowanej do podstawy. Wysokość położenia obiektu względem podstawy jest regulowana, i ustalana poprzez docisk przy pomocy gwintowanego pokrętła. Model pozwala na precyzyjne umiejscowienie obiektu w przestrzeni. Istnieje możliwość zwiększenie liczby obiektów w modelu. Model drugi przedstawiony jest na Rys. 2.8 oraz Rys. 2.9.



Rys. 2.8. Schemat modelu drugiego.



Rys. 2.9. Zdjęcie modelu drugiego.

Wymiary:

$$a = 100 \text{ [mm]},$$

$$b = 50 \text{ [mm]},$$

$$h1 = 3 \text{ [mm]},$$

$$h2 = 53 \text{ [mm]},$$

$$h3 = 95 \text{ [mm]},$$

$$h = \langle 73, 85 \rangle \text{ [mm]},$$

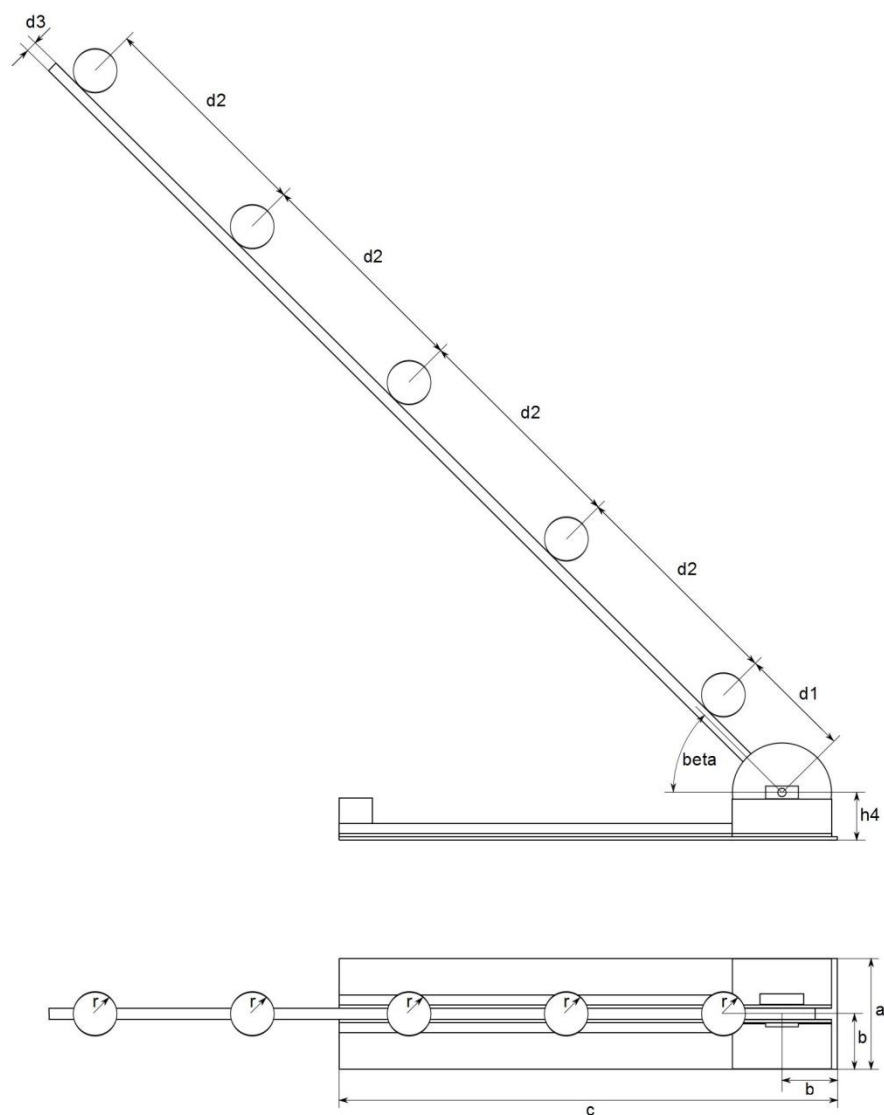
$$r = 20 \text{ [mm]}.$$

2.4.3 Model trzeci.

Model zawiera pięć obiektów. Są one przymocowane w sposób trwały do ramienia, ruchomego względem podstawy. Kąt wychylenia ramienia jest regulowany i ustalany poprzez docisk przy pomocy gwintowanego pokrętła. Model pozwala na umiejscowienie w przestrzeni grupy obiektów oraz dokładny pomiar ich położenia. Jest on szczególnie przydatny w czasie testów, gdyż pozwala na analizę pięciu punktów pomiarowych przy jednym ustawieniu modelu. Pozwala to na zmniejszenie liczby wykonywanych zdjęć oraz skrócenie czasu analizy zgromadzonego materiału. Ponadto ze względu na stałą odległość między poszczególnymi obiektami oraz ich liniowe ułożenie, może służyć do symulacji ruchu liniowego pojedynczego obiektu. Model trzeci przedstawiony jest na Rys. 2.10 oraz Rys. 2.11.



Rys. 2.10. Zdjęcie modelu trzeciego.



Rys. 2.11. Schemat modelu trzeciego.

Wymiary:

$$a = 100 \text{ [mm]},$$

$$b = 50 \text{ [mm]},$$

$$c = 450 \text{ [mm]},$$

$$d1 = 100 \text{ [mm]},$$

$$d2 = 200 \text{ [mm]},$$

$$d3 = 10 \text{ [mm]},$$

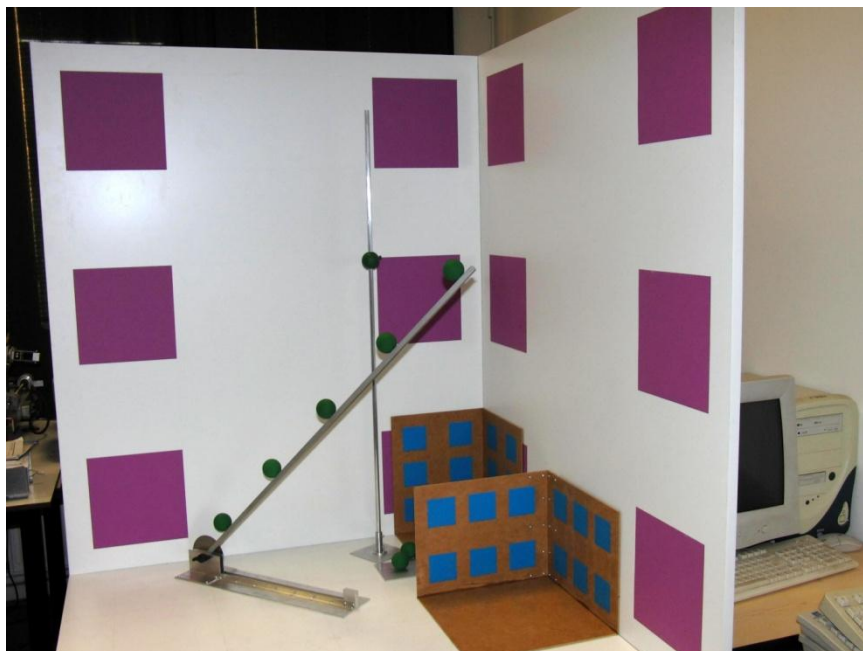
$$h4 = 43 \text{ [mm]},$$

$$\text{beta} = \langle 0, \pi/2 \rangle,$$

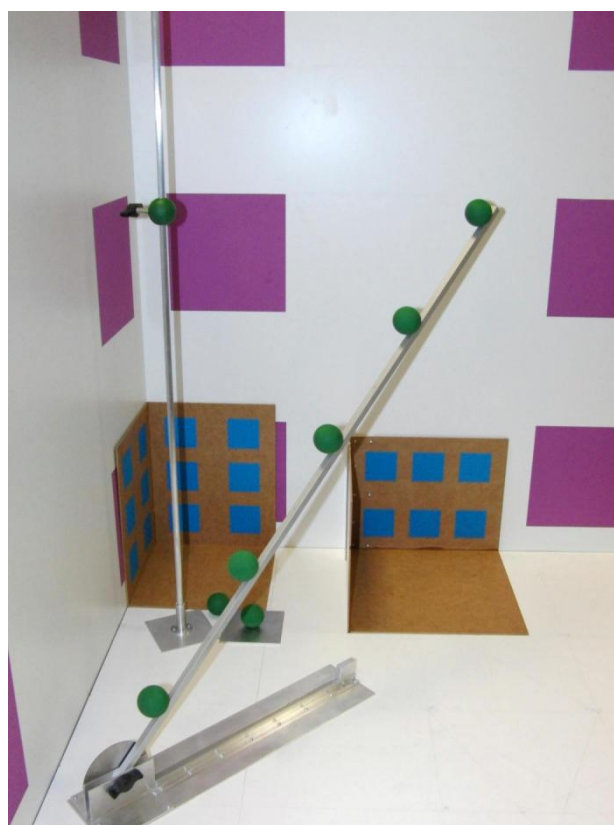
$$r = 20 \text{ [mm]}.$$

2.5 Zdjęcia stanowiska.

Zdjęcia całego stanowiska przedstawione są na Rys. 2.12 oraz Rys. 2.13.



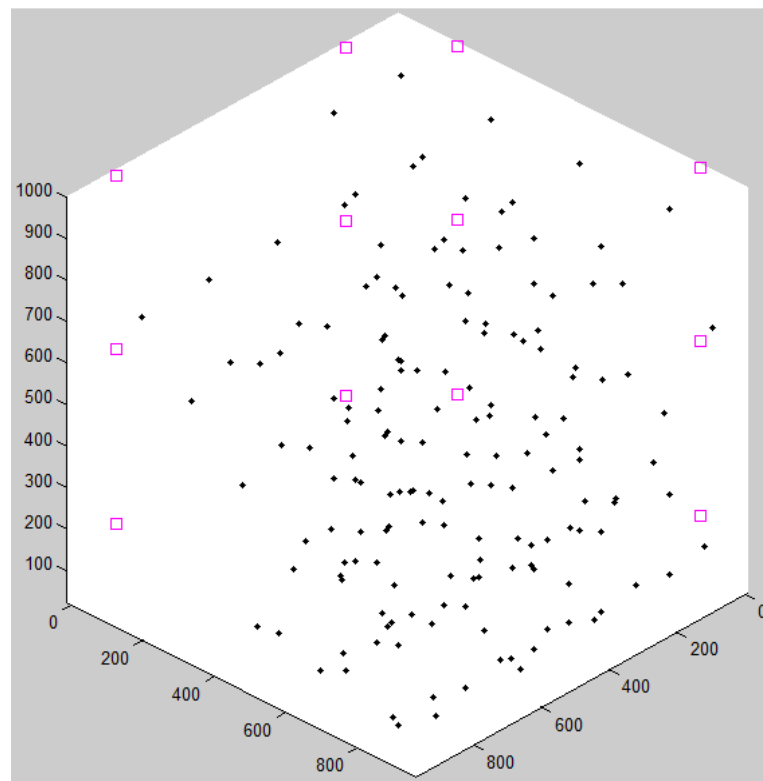
Rys. 2.12. Zdjęcie stanowiska.



Rys. 2.13. Zdjęcie stanowiska.

2.6 Zdjęcia testowe.

Wykonaliśmy 560 zdjęć testowych, z 810 punktami pomiarowymi. Zdjęcia wykonane zostały w pięciu seriach, dla różnych ustawień aparatów względem siebie i względem sceny, po 114 zdjęć w obrębie serii (56*2 aparaty). W ten sposób, dla każdej z serii uzyskane zostały 162 punkty pomiarowe o znanym (zmierzonym) położeniu względem globalnego układu współrzędnych. Umożliwia to porównanie wyników działania algorytmu z położeniem rzeczywistym punktów a tym samym ocenę jakości działania algorytmu. Ponieważ aparaty ustawione były symetrycznie względem sceny, większość punktów pomiarowych została równomiernie rozdystrybuowana na jednej połowie sceny, na drugiej zaś połowie umieszczone zostały punkty kontrolne. Rys. 2.14 przedstawia poglądowo rozłożenie punktów pomiarowych na scenie.



Rys. 2.14. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w obrębie przestrzeni roboczej.

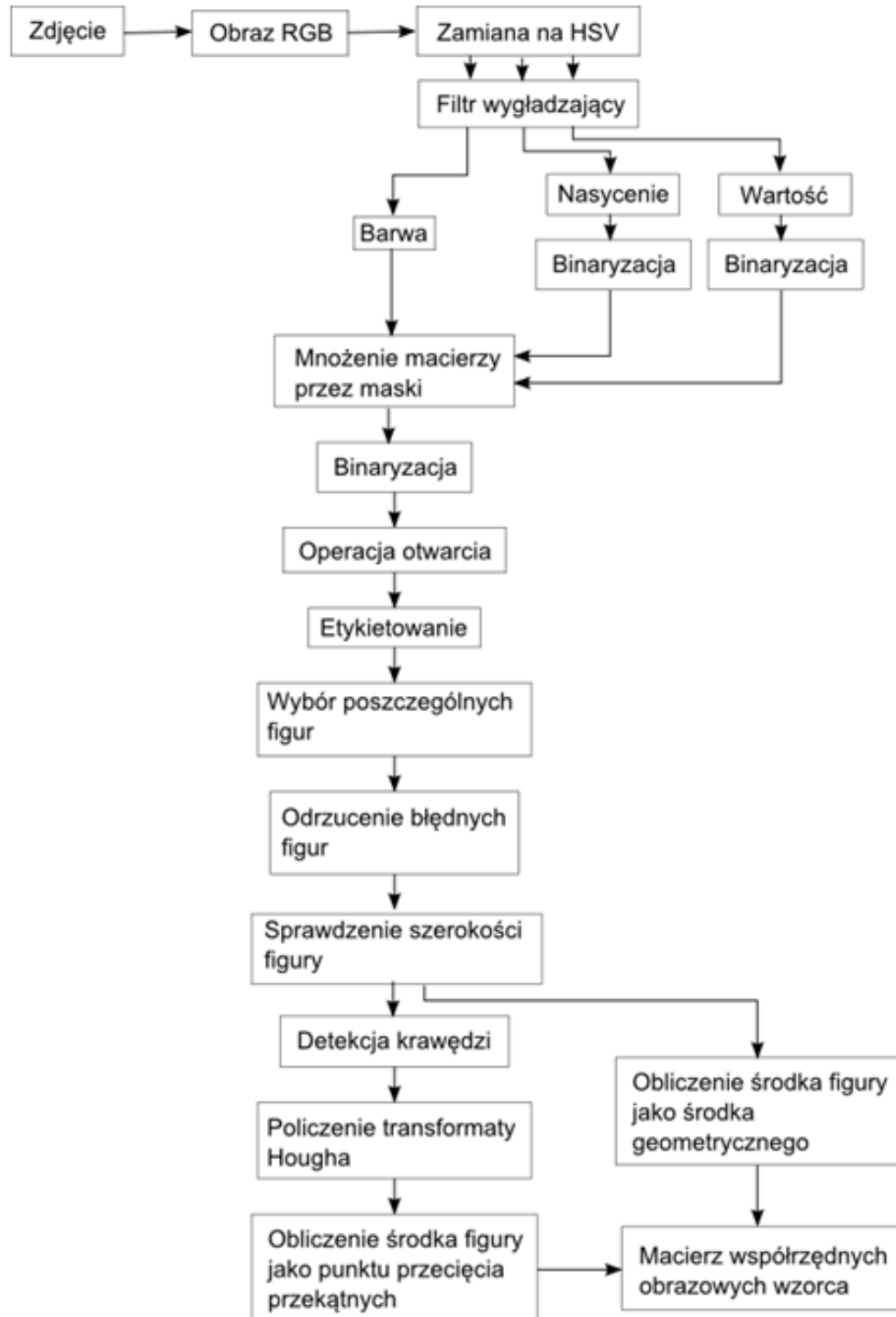
3. Algorytmy rozpoznające obraz.

3.1 Algorytm identyfikujący duży i mały wzorzec.

Celem algorytmu jest odnalezienie pól wzorca na zdjęciu a następnie wyznaczenie ich środków. Przyjęty przez nas wzorzec składa się z 12 kwadratowych pól o identycznym kolorze, rozmieszczonych na dwóch prostopadłych płaszczyznach. Środki pól muszą zostać wyznaczone możliwie precyzyjnie, ponieważ dokładność całej metody w dużej mierze zależy od dokładności wzorca.

Algorytm rozpoznawania wzorców rozwijany był stopniowo w miarę analizy kolejnych, wstępnych zdjęć. Poniżej opisana zostanie jego końcowa wersja przygotowana do pracy z wykonanymi zdjęciami testowymi (stworzone m-pliki oraz zdjęcia znajdują się w załączniku C na płycie DVD). Segmentacja obrazu została przeprowadzona głównie na podstawie barwy pól. Uwzględnione zostały również nasycenie i jasność, a także pole powierzchni oraz położenie pól. Wyznaczenie środka pola odbywa się poprzez wyznaczenie punktu przecięcia przekątnych lub jako środek geometryczny.

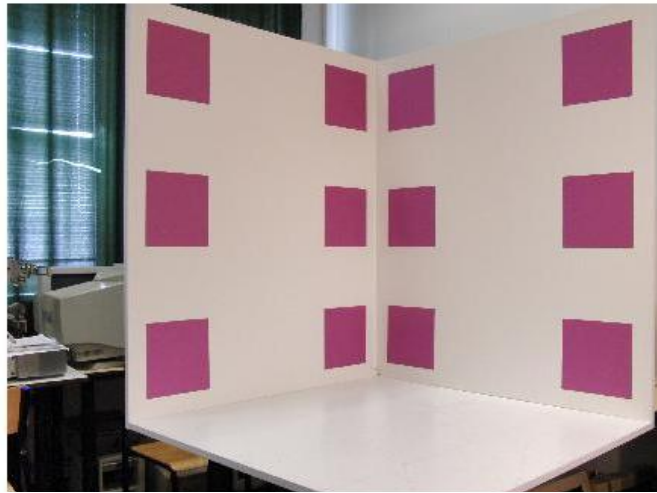
Na Rys. 3.1 został przedstawiony schemat blokowy algorytmu. Algorytm powstał w oparciu o wykłady „Transformacje kinematyczne i wizyjne w robotyce” prowadzone przez dr Pawła Rottera oraz książek “Digital image processing using MATLAB” (Gonzalez, Woods, Eddins), „MATLAB i Simulink : poradnik użytkownika : najbardziej efektywne narzędzie do rozwiązywania złożonych problemów matematycznych i ekonomicznych” (Mrożek B., Mrożek Z.).



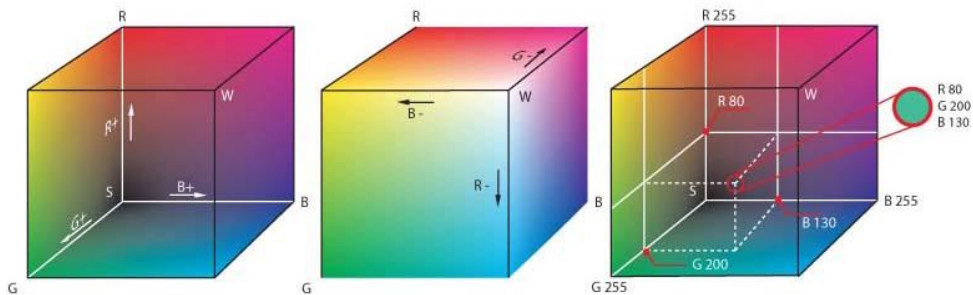
Rys. 3.1. Schemat blokowy algorytmu wykrywania pól wzorca.

Dane wczytywane są do pamięci. Matlab przechowuje je, jako macierz $N \times M \times 3$, gdzie N i M określone są przez rozdzielczość zdjęcia, a 3 wynika z przechowywania 3 składowych kolorów dla każdego punktu. Rys. 3.2 przedstawia przykładowe zdjęcie wzorca użyte do zobrazowania kolejnych kroków algorytmu.

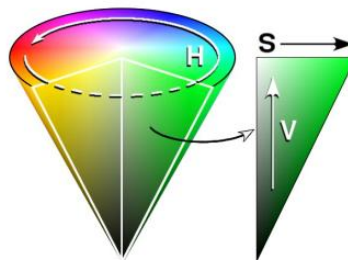
Obraz wejściowy



Rys. 3.2. Zdjęcie wzorca.

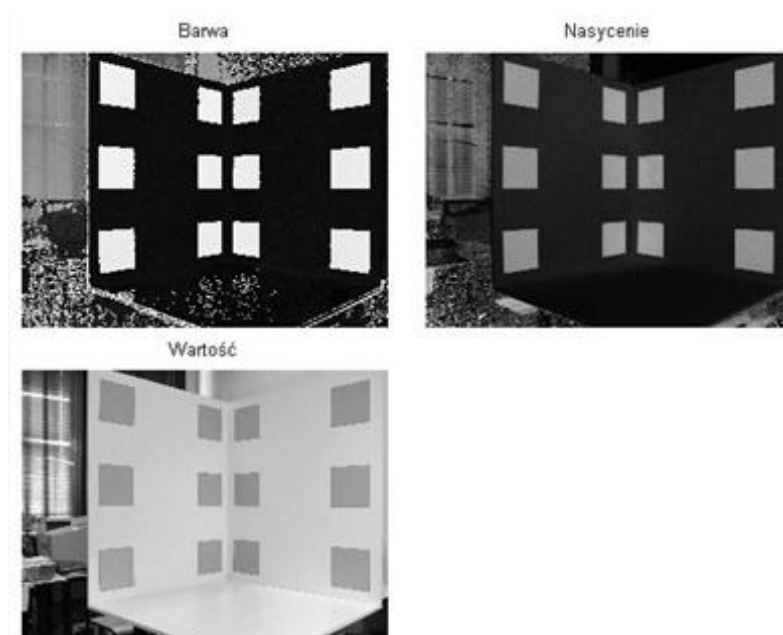


Rys. 3.3. Sześcian kolorów RGB. (Źródło: Wikipedia)



Rys. 3.4. Stożek przestrzeni barw HSV. (Źródło: Wikipedia)

Obraz jest konwertowany z formatu RGB na HSV w celu uproszczenia obliczeń i ułatwienia analizy. W formacie RGB trzy składowe reprezentujące wypadkowy kolor każdego punktu to udział kolorów składowych: czerwonego, zielonego i niebieskiego. W formacie HSV dla każdego punktu podawana jest jego barwa (H-Hue), nasycenie (S-Saturation) i wartość (V-Value, określająca jasność). Wadą notacji RGB jest powiązanie wszystkich trzech składowych z czynnikami takimi jak oświetlenie. Dla notacji HSV łatwiej określić kryteria podobieństwa kolorów. Rys. 3.5 przedstawia składowe HSV zdjęcia po konwersji. Obrazy reprezentowane oboma sposobami są równoważne, konwersja dokonywana jest bezstratnie.



Rys. 3.5. Składowe HSV zdjęcia wzorca.

Obrazy składowe (H, S, V) przepuszczone są przez filtr wygładzający (dolnoprzepustowy). Ma to na celu zmniejszenie szumów na obrazie i ujednorodnienie kolorów w obrębach pól. Rząd filtra jest niski w celu uniknięcia nadmiernej utraty szczegółów.

Następnie na podstawie składowych S i V tworzone są maski (Rys. 3.6). Z obrazów S i V, traktowanych osobno, wybierane są punkty o odpowiednim poziomie nasycenia (S) lub jasności (V), a następnie przypisywana jest im wartość 1. Pozostałym punktom przypisywana jest wartość 0. Ma to na celu wyeliminowanie obszarów zbyt ciemnych lub o małym poziomie nasycenia, które z powodu barwy (H) zbliżonej do wzorca, mogłyby zostać błędnie zinterpretowane.



Rys. 3.6. Obrazy binarne stworzone na podstawie nasycenia i wartości.

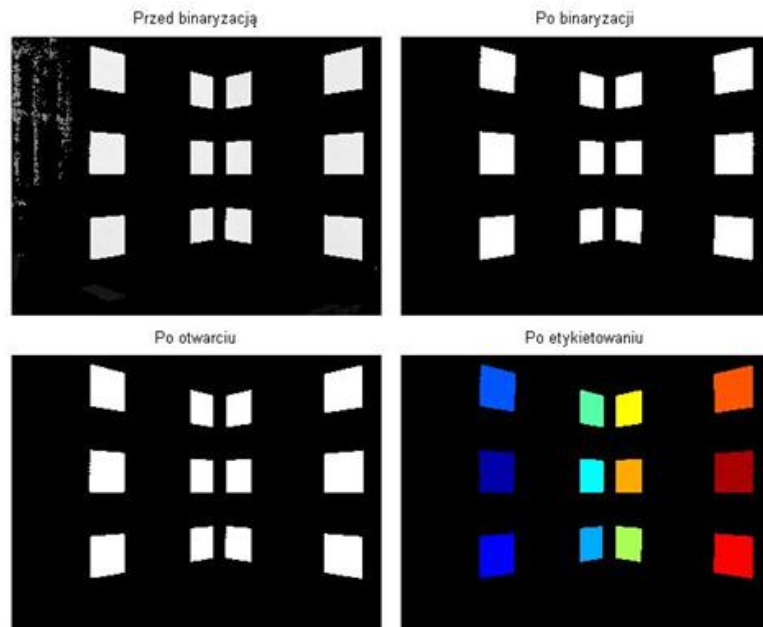
Po przemnożeniu składowej H przez maski następuje jej binaryzacja. Wybierane są tylko wartości barwy odpowiadające barwie rzeczywistej wzorca z uwzględnieniem niezbędnego marginesu błędu. Powstaje macierz składająca się z elementów: 1 – obiekt i 0 – tło.

Następnie macierz poddana jest operacji otwarcia. Jest to przekształcenie morfologiczne polegające na przeprowadzeniu erozji a następnie dylatacji, używając tego samego elementu strukturalnego. Element strukturalny to macierz składająca się z zer i jedynek oraz punktu centralnego określonego jako jeden z punktów tej macierzy (najczęściej jest to środek macierzy). W wyniku erozji obcięty zostaje brzeg obiektu na obrazie. Punkt obiektu zostaje usunięty, jeżeli nie jesteśmy w stanie znaleźć elementu strukturalnego, takiego że: badany punkt należy do elementu strukturalnego oraz wszystkim punktom elementu strukturalnego odpowiada 1 na badanej macierzy. Dylatacja natomiast sprawia, że figura zwiększa swoją powierzchnię. Dodawane są w niej wszystkie punkty elementu strukturalnego, jeżeli punktowi centralnemu odpowiada 1 na badanej macierzy. Operacja otwarcia służy do morfologicznego usuwania szumów.

Dla tak przygotowanej macierzy następuje etykietowanie obszarów (Rys. 3.8). Dla każdego elementu 1 następuje wyszukiwanie sąsiadów o wartości 1. Elementy te są grupowane razem, a każdej grupie zostaje przypisany kolejny numer. Używane jest 8-sąsiedztwo, czyli dla elementu badane są elementy w poprzedniej i następnej kolumnie lub wierszu, a także możliwe kombinacje (poprzedni wiersz, poprzednia kolumna; poprzedni wiersz, następna kolumna, itd. – Rys. 3.7).

S	S	S
S	X	S
S	S	S

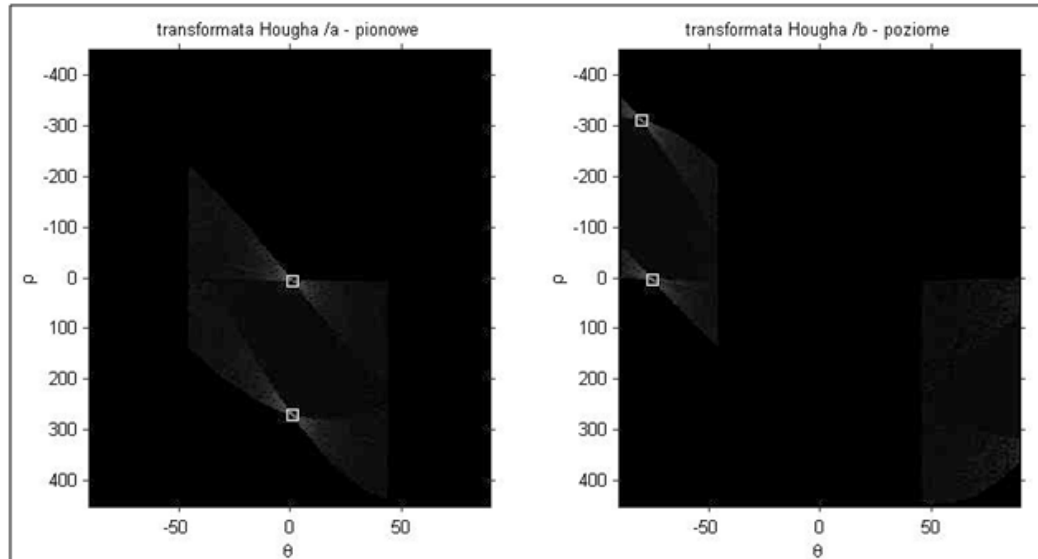
Rys. 3.7. 8-sąsiedztwo. x – badany element, s – sąsiad



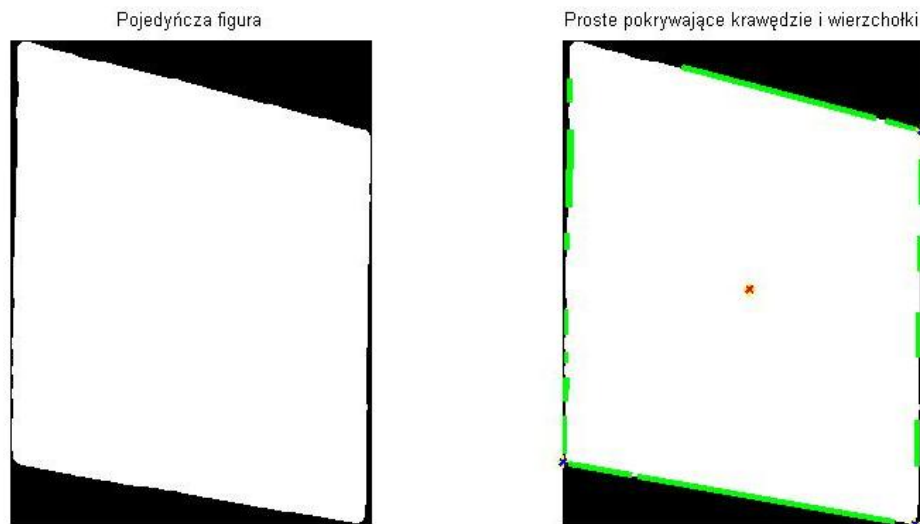
Rys. 3.8. Składowa H (barwa) zdjęcia wejściowego, segmentacja, operacja otwarcia i etykietowanie.

Dzięki temu, że obiekty są ponumerowane kolejne operacja będą przeprowadzane na poszczególnych częściach macierzy. Dla każdego obiektu obliczane jest pole powierzchni i położenie. Jeżeli pole powierzchni jest zbyt małe, lub obiekt leży zbyt blisko krawędzi macierzy obiekt jest odrzucany jako wykryty błędnie. Ma to szczególne znaczenie w sytuacji, gdy w obrębie sceny znajdują się obiekty nie będące częścią eksperymentu, wprowadzające zkłócenia. Na tym etapie rozpoznane są pola wzorca. Teraz dla małego wzorca następuje wybór metody wyznaczania środka pola. Jeżeli pole ma zbyt małą szerokość, wyszukiwanie na podstawie transformaty Hougha może dać niedokładne wyniki. Dzieje się tak, gdy krawędź jest zniekształcona i jest zbyt mało dokładnych punktów, aby możliwe było dopasowanie prostej odpowiadającej krawędzi. W takim przypadku środek pola wyznaczany jest jako środek ciężkości, czyli jako średnia współrzędnych punktów pola. W przypadku, gdy pole jest wystarczająco szerokie, stosowana jest dokładniejsza metoda bazująca na transformacie Hougha.

Transformata Hougha przenosi prostą k zdefiniowaną we współrzędnych kartezjańskich na punkt w układzie współrzędnych ρ i Θ , gdzie ρ to odległość prostej od początku układu współrzędnych, a Θ to kąt, pomiędzy dodatnią częścią osi OX oraz prostą prostopadłą do prostej k i przechodzącej przez początek układu współrzędnych. Jeżeli potraktujemy punkt jako pęk prostych, przecinających się w danym punkcie, na płaszczyźnie ρ i Θ otrzymamy wykres funkcji sinus. Jeżeli stworzymy w ten sposób dwie sinusoidy, odpowiadające dwóch punktom w układzie kartezjańskim, to punkt ich przecięcia wyznaczy ρ_1 i Θ_1 prostej przechodzącej przez te dwa dane punkty. W analogiczny sposób szuka się prostych odpowiadających krawędziom figury. Dla każdego punktu wyznacza się sinusoidę, tworzy macierz z ilością punktów wspólnych dla różnych sinusoid, a następnie szuka maksimum w tej macierzy. Im bardziej zniekształcona jest krawędź figury, tym trudniej jest znaleźć prostą jej odpowiadającą a tym samym mniejsza jest precyzja wyniku. Wykrywanie krawędzi figury, jest zagadnieniem bardzo prostym, gdy, tak jak w naszym przypadku, figura została wcześniej zidentyfikowana i jest w postaci binarnej (1- figura, 0-tło). Na Rys. 3.9 i Rys 3.10 przedstawiono transformatę Hougha, maksima, oraz figurę, a zielonym kolorem punkty figury należące do znalezionej prostej. Macierz Hougha została podzielona na dwie części, dla kątów od -45 do 45 stopni poszukujemy dwóch prostych pionowych, dla pozostałych kątów szukamy dwóch prostych poziomych. Ma to znaczenie dla małego wzorca, gdzie współliniowych punktów tworzących krawędzie pionowe jest znacznie więcej niż w przypadku krawędzi poziomych, co utrudnia wyszukiwanie maksimum lokalnych.



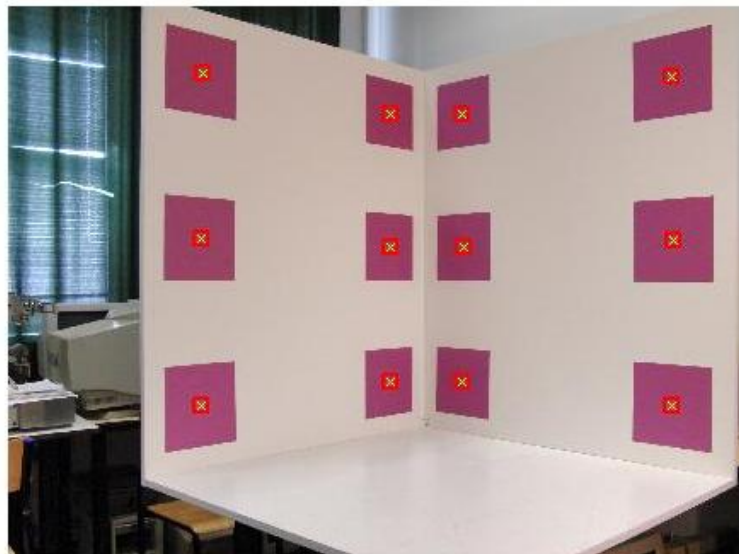
Rys. 3.9. Wizualizacja transformaty Hougha z zaznaczonymi maksimami lokalnymi.



Rys. 3.10. Figura badana i proste znalezione za pomocą transformaty Hougha.

Na podstawie przecięcia prostych wyznaczane są wierzchołki pola, a następnie punkt przecięcia przekątnych. Środek figury jest jednoznacznie zdefiniowany przez przecięcie przekątnych, niezależnie od zniekształceń perspektywicznych. Zniekształcenia obrazu uniemożliwiają dokładne wyznaczenie wierzchołków prostszą metodą. Dodatkowo na Rys. 3.11 przedstawiono wynik algorytmu.

Współrzędne obrazowe wzorca



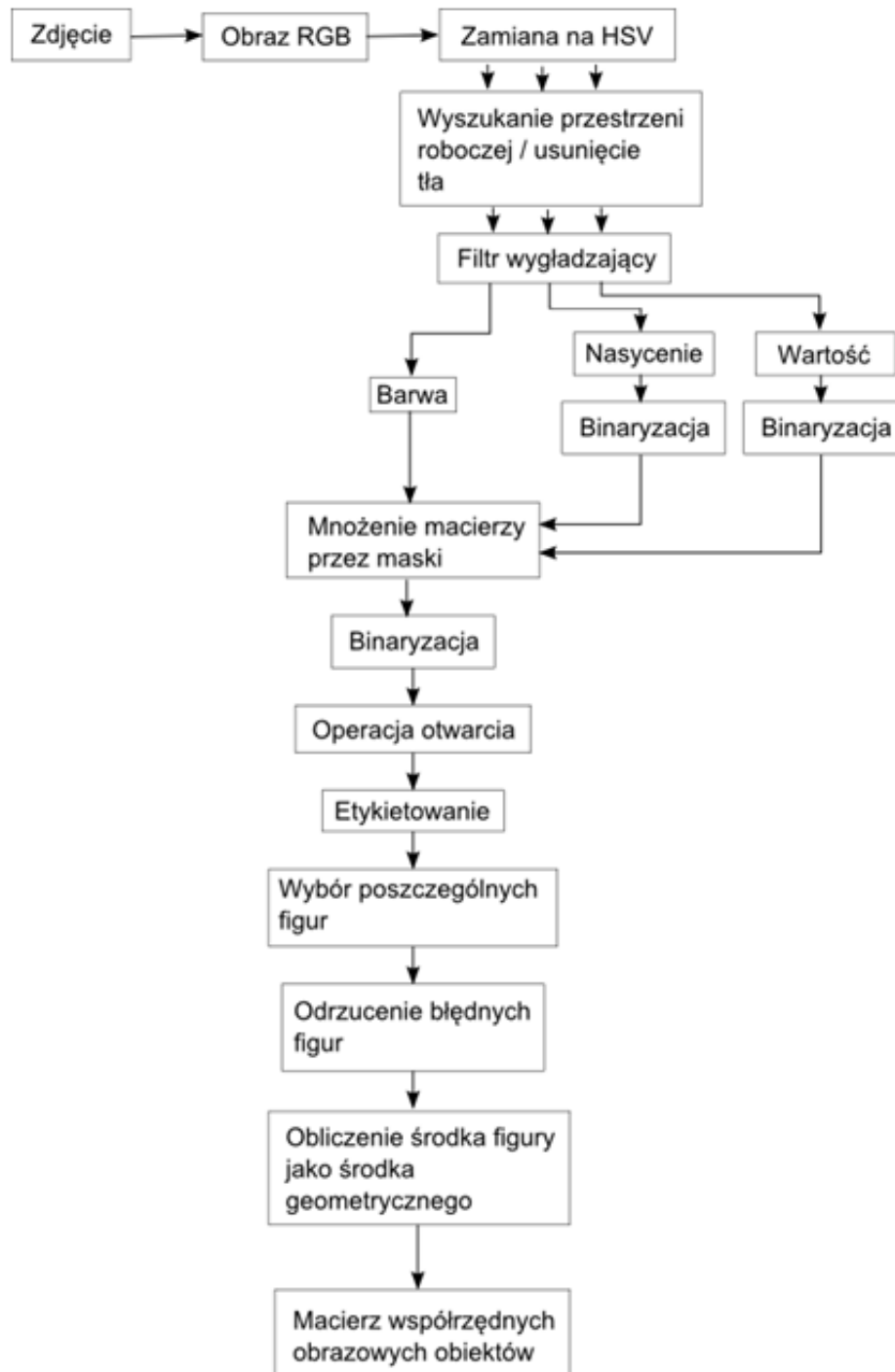
Rys. 3.11. Środki pól wzorca wyznaczone przez algorytm.

3.2 Algorytm identyfikujący obiekty.

Celem algorytmu jest odnaleźć obiekty na zdjęciach testowych. Za obiekty przyjęliśmy zielone kule. Kolor miał wyróżniać się na tle sceny i obu wzorców. Okrągły kształt miał ułatwić wyznaczanie środka geometrycznego, tożsamego w takim przypadku z ze środkiem ciężkości, niezależnie od zniekształceń perspektywicznych. Zadanie okazało się trudniejsze z powodu warunków, w jakich przeprowadzane były eksperymenty, w których występowało wiele obiektów o podobnych cechach.

Algorytm rozpoznawania obiektów rozwijany był stopniowo w miarę analizy kolejnych, wstępnych zdjęć. Główna zasada działania jest analogiczna jak dla algorytmu rozpoznawania wzorców. Szerzej przedstawione zostaną różnice pomiędzy algorytmami. Rozbudowane zostało odrzucanie błędnie wykrytych obiektów na podstawie współczynników cyrkularności. Dodatkowo, ponieważ pojawiły się zakłócenia o bardzo podobnych cechach charakterystycznych do szukanych obiektów, algorytm wyszukuje obszar sceny i odrzuca obiekty nie zawierające się w nim. stworzone m-pliki oraz zdjęcia testowe znajdują się w załączniku C na płycie DVD.

Na Rys. 3.12 został przedstawiony schemat blokowy algorytmu.



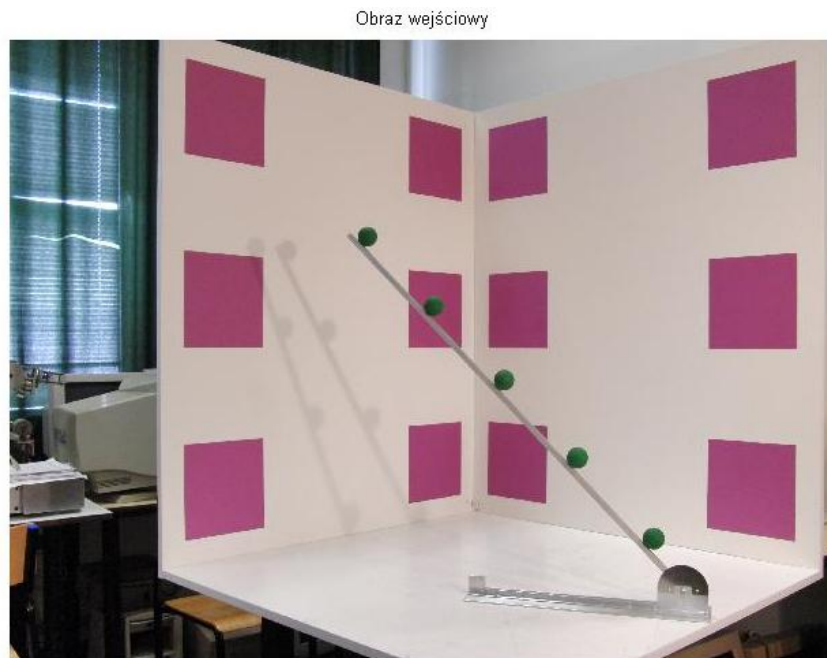
Rys. 3.12. Schemat blokowy algorytmu wykrywania obiektów.

Algorytm działa analogicznie do algorytmu wykrywania wzorca. Nie występuje w nim wyznaczanie środka na podstawie transformaty Hougha. Środki obiektów obliczane są, jako środki ciężkości. Zmodyfikowany został sposób odrzucania błędnie wykrytych obiektów. Ponieważ nie wyeliminowało to wszystkich błędów dodany został blok wyszukiwania przestrzeni roboczej, co pozwoliło na zidentyfikowanie właściwej liczby obiektów.

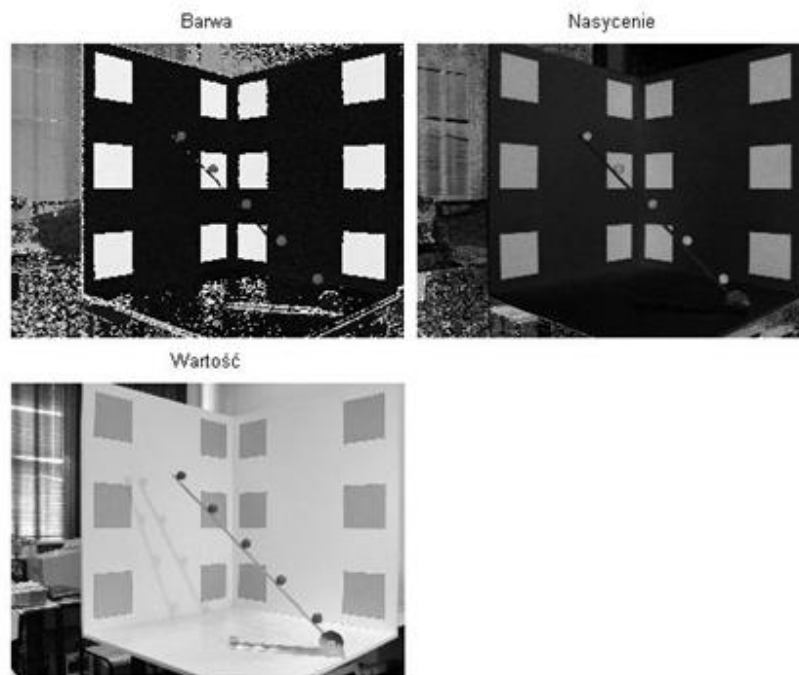
Dla każdego odnalezionego obiektu obliczane są współczynniki cyrkularności $W1$ i $W2$, oraz ich stosunek. $W1$ interpretowany jest, jako średnica koła o polu powierzchni równym polu badanej figury, a $W2$ jako średnica koła o obwodzie równym obwodowi danej figury. Jeżeli parametry te nie mieszczą się w określonym przez nas przedziale, obiekt jest odrzucany, jako wykryty błędnie. Ten blok algorytmu usuwał dużą ilość błędnie wykrytych figur (Rys. 3.16 – przed odrzuceniem i Rys. 3.17 – po odrzuceniu), niestety nie sprawdzał się we wszystkich przypadkach, ponieważ przyjęte przedziały dla współczynników musiałby być dość szerokie, aby uwzględnić obiekty na wszystkich zdjęciach. Na niektórych zdjęciach obraz piłeczki jest zniekształcony z powodu niedostatecznego oświetlenia, lub budowy modelu.

W celu zmniejszenia ilości błędnie wykrytych obiektów do algorytmu wprowadzono dodatkowy blok, ograniczający badaną przestrzeń. Na podstawie barwy, nasycenia i wartości znajduwane jest białe tło sceny oraz zamontowany na stałe, duży wzorzec. Obszar ten nie zawiera obiektów. Dokonywane są operacje morfologiczne otwarcia, w celu wyeliminowania błędów, a następnie zamknięcia. Zamknięcie (wykonanie dylatacji a następnie erozji) wykonane jest przy użyciu dużego elementu strukturalnego w taki sposób, żeby dołączyć do obszaru piłeczki, które wcześniej nie zostały uwzględnione (Rys. 3.15). W ten sposób kolejne bloki algorytmu nie pracują na całej przestrzeni, tylko obszarze oznaczonym, jako roboczy, czyli właściwej scenie, jej obrzeżach, oraz części tła o podobnym kolorze, ale różnym od koloru piłeczki. Obszary, które po tej operacji zostają błędnie wykryte są skutecznie odrzucane w dalszej części algorytmu.

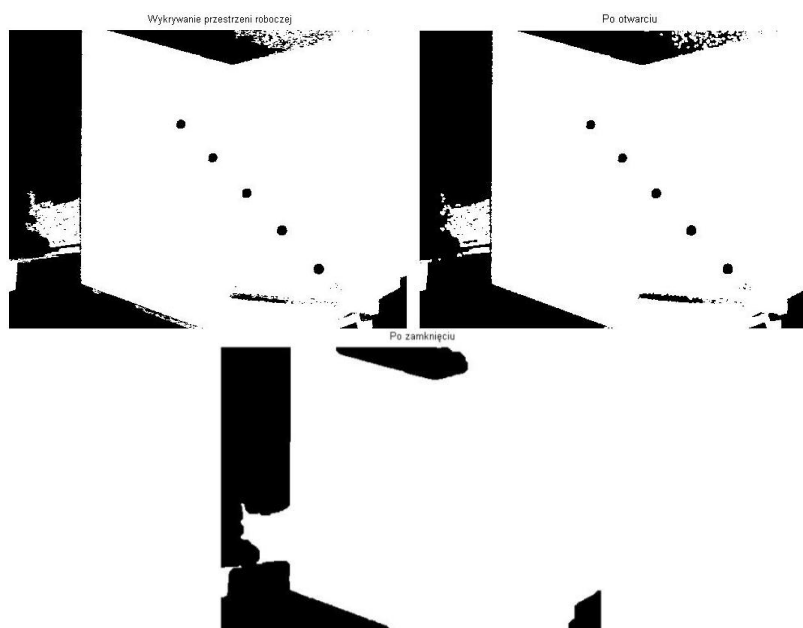
Dalej zostały przedstawione rysunki dla przykładowego zdjęcia (Rys. 3.13) pokazujące działanie poszczególnych etapów algorytmu, oraz wynik całego algorytmu (Rys.3.17).



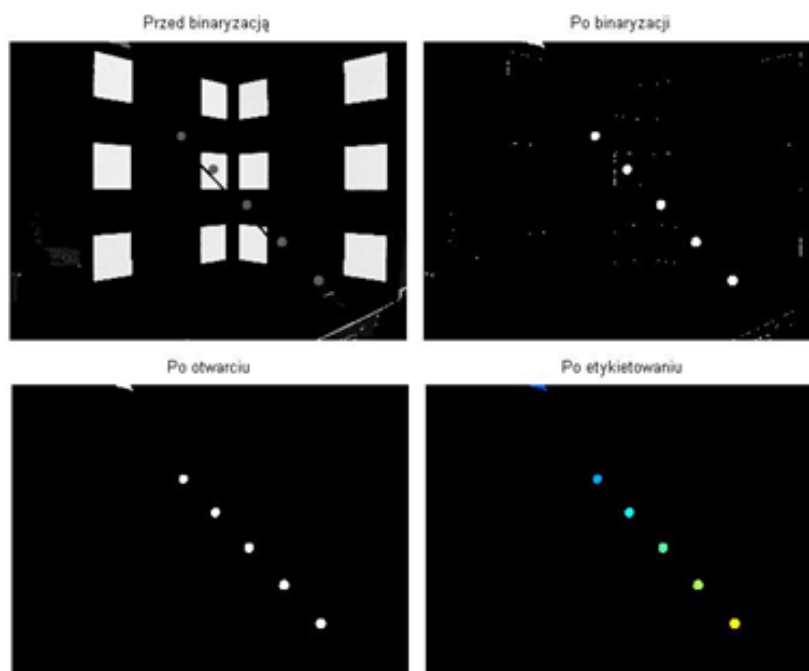
Rys. 3.13. Zdjęcie obiektu.



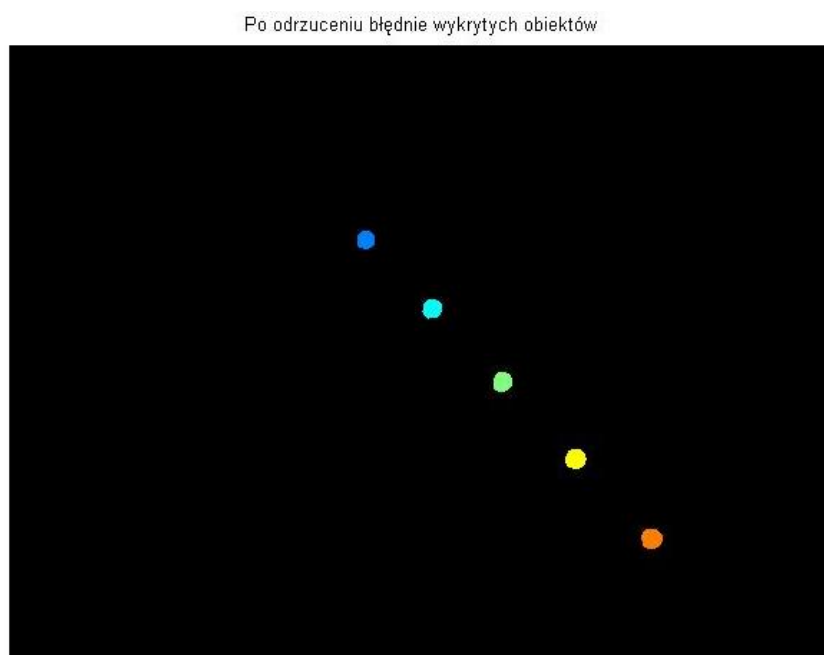
Rys. 3.14. Składowe HSV zdjęcia obiektu.



Rys. 3.15. Znaleziona przestrzeń robocza.

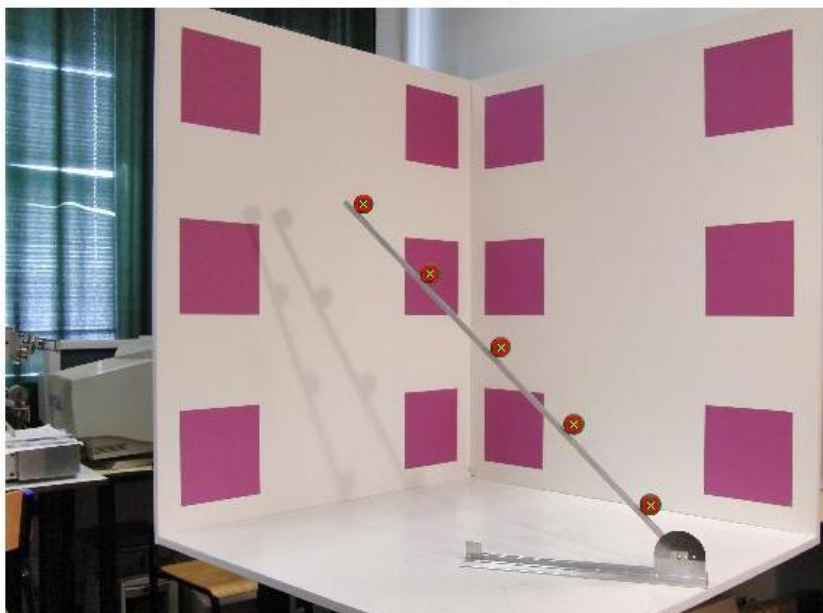


Rys. 3.16. Składowa H (barwa) zdjęcia wejściowego, segmentacja, operacja otwarcia i etykietowanie.



Rys. 3.17. Obiekty po odrzuceniu elementów nie spełniających kryteriów.

Współrzędne zidentyfikowanych obiektów



Rys. 3.18. Środki obiektów wyznaczone przez algorytm.

4 Algorytm stereowizyjny.

Zadaniem algorytmu stereowizyjnego jest odtworzenie położenia obiektu w przestrzeni trójwymiarowej na podstawie zdjęć z dwóch kamer. Oparty jest on na wielokrotnym wykorzystaniu transformacji płaskiej i został stworzony na bazie publikacji „Czteropunktowa metoda identyfikacji transformacji stereowizyjnej” (Fuksa, Byrski). Algorytm zaimplementowany został w programie Matlab w oparciu o książkę „MATLAB i Simulink : poradnik użytkownika : najbardziej efektywne narzędzie do rozwiązywania złożonych problemów matematycznych i ekonomicznych” (Mrożek B., Mrożek Z.).

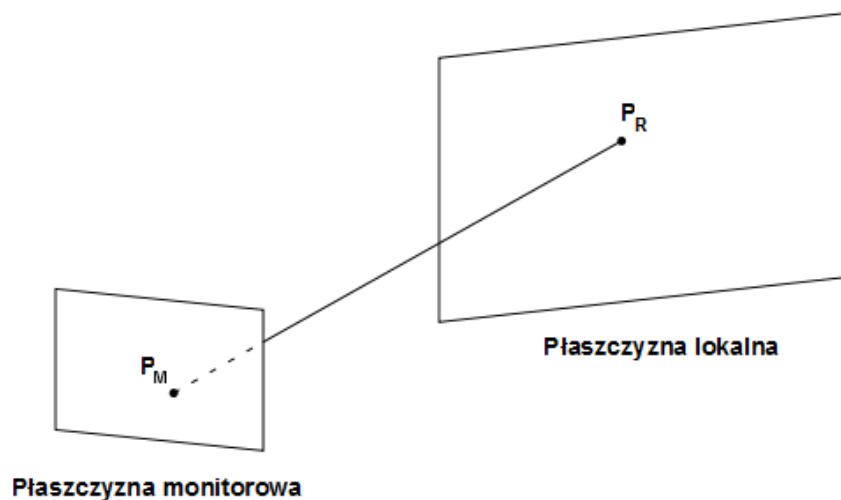
4.1 Transformacja płaska.

Transformacja płaska to odwzorowanie przyporządkowujące punktom należącym do jednej płaszczyzny, punkty płaszczyzny drugiej. Płaszczyzna pierwsza, nazywana monitorową, utożsamiana jest z matrycą światłoczułą kamery lub monitorem. Płaszczyzna druga, nazywana lokalną, to odpowiednio zdefiniowana płaszczyzna w przestrzeni.

Transformację płaską TP można zapisać w postaci:

$$TP(P_M) = P_R, \quad P_M \in R^2, \quad P_R \in R^2 \quad (4.1)$$

Graficzna interpretacja transformacji płaskiej przedstawiona jest na Rys. 4.1.



Rys. 4.1. Graficzna interpretacja transformacji płaskiej.

Dokładna zależność między punktami należącymi do obu płaszczyzn opisana jest wzorem:

$$TP(P_M) = P_R = \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_1 \cdot x_M + b_1 \cdot y_M + c_1}{\alpha \cdot x_M + \beta \cdot y_M + 1} \\ \frac{a_2 \cdot x_M + b_2 \cdot y_M + c_2}{\alpha \cdot x_M + \beta \cdot y_M + 1} \end{bmatrix}, \quad P_M = \begin{bmatrix} x_M \\ y_M \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

We wzorze występuje osiem współczynników:

$$WSP^T = [a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, \alpha, \beta].$$

Współczynniki WSP definiują jednoznacznie transformacje. Opisują związek między płaszczyzną monitorową i płaszczyzną lokalną, w tym uwzględniają zarówno położenie płaszczyzn względem siebie jak i parametry oraz własności optyczne kamery.

4.1.1 Identyfikacja transformacji płaskiej.

Identyfikacja transformacji płaskiej jest równoznaczna z wyznaczeniem wartości współczynników, definiujących konkretną transformację. Do przeprowadzenia identyfikacji wykorzystywana jest znajomość położenia punktów na płaszczyźnie monitorowej, oraz odpowiadających im punktów na płaszczyźnie lokalnej. Konieczna jest znajomość współrzędnych czterech par punktów, z których żadne trzy nie mogą być współliniowe. Umożliwia to, przy wykorzystaniu wzoru (4.2), skonstruowanie układu ośmiu równań liniowych z ośmioma niewiadomymi, jakimi są współczynniki transformacji:

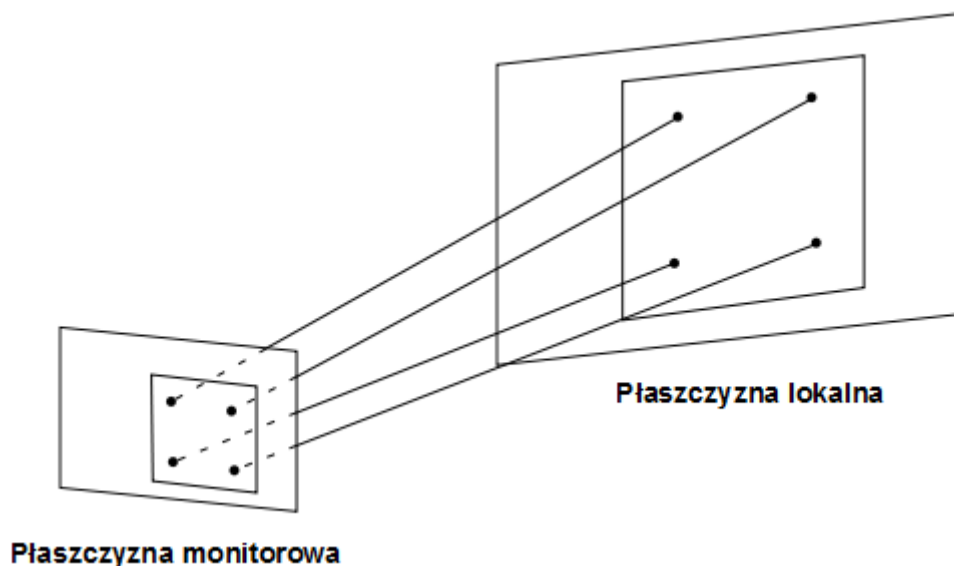
$$\begin{bmatrix} x_{R1} \\ y_{R1} \\ x_{R2} \\ y_{R2} \\ x_{R3} \\ y_{R3} \\ x_{R4} \\ y_{R4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{M1} & y_{M1} & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_{M1} \cdot x_{R1} & -y_{M1} \cdot y_{R1} \\ 0 & 0 & 0 & x_{M1} & y_{M1} & 1 & -x_{M1} \cdot x_{R1} & -y_{M1} \cdot y_{R1} \\ x_{M2} & y_{M2} & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_{M2} \cdot x_{R2} & -y_{M2} \cdot y_{R2} \\ 0 & 0 & 0 & x_{M2} & y_{M2} & 1 & -x_{M2} \cdot x_{R2} & -y_{M2} \cdot y_{R2} \\ x_{M3} & y_{M3} & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_{M3} \cdot x_{R3} & -y_{M3} \cdot y_{R3} \\ 0 & 0 & 0 & x_{M3} & y_{M3} & 1 & -x_{M3} \cdot x_{R3} & -y_{M3} \cdot y_{R3} \\ x_{M4} & y_{M4} & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_{M4} \cdot x_{R4} & -y_{M4} \cdot y_{R4} \\ 0 & 0 & 0 & x_{M4} & y_{M4} & 1 & -x_{M4} \cdot x_{R4} & -y_{M4} \cdot y_{R4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \\ a_2 \\ b_2 \\ c_2 \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$H = C \cdot WSP \quad (4.4)$$

Przy spełnieniu założenia o braku współliniowości punktów, układ posiada dokładnie jedno rozwiązanie:

$$WSP = C^{-1} \cdot H \quad (4.5)$$

Klasyczny algorytm identyfikacyjny zakłada umieszczenie w polu kamery wzorca kalibracyjnego z zaznaczonymi odpowiednio punktami, definiującymi płaszczyznę lokalną. Punkty te są odnajdywane na obrazie z kamery (płaszczyzna monitorowa). Następnie na podstawie znajomości położenia punktów na obu płaszczyznach, przy wykorzystaniu wzoru (4.5), identyfikowana jest transformacja płaska. Po zakończeniu procesu kalibracji wzorec może zostać usunięty z pola kamery. Graficzną interpretację sytuacji przedstawia Rys. 4.2.



Rys. 4.2. Graficzna interpretacja identyfikacji transformacji płaskiej.

W celu zwiększenia dokładności wyznaczenia współczynników transformacji, istnieje możliwość zwiększenia liczby par punktów wykorzystanych do identyfikacji. W takim przypadku zwiększa się liczba równań układu (4.3), zaś liczba niewiadomych pozostaje stała. Wartości współczynników można uzyskać przy użyciu metody najmniejszych kwadratów. Postać rozwiązania minimalno-normowego jest znana i wynosi:

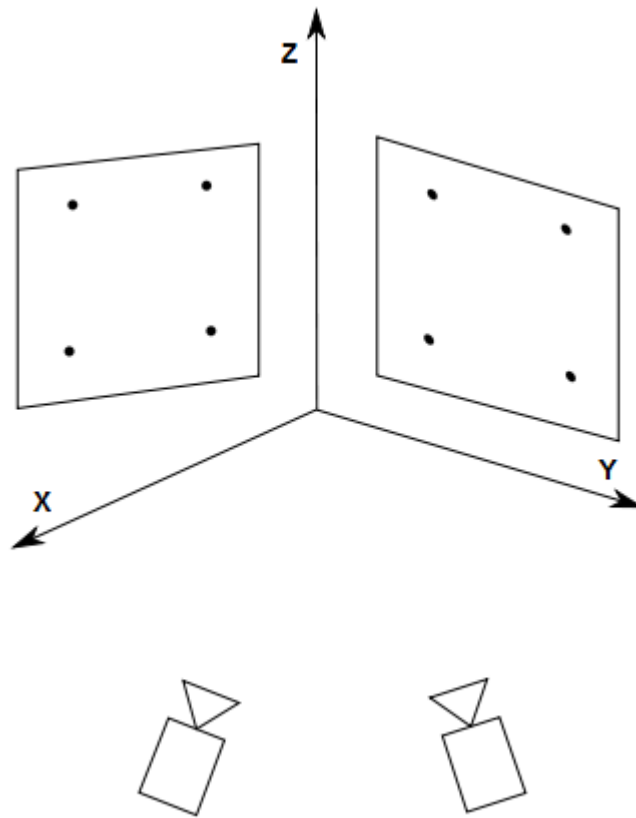
$$WSP = [C^T C]^{-1} C^T H, \quad H^T = [x_{R1} \ y_{R1} \ \dots \ x_{Rn} \ y_{Rn}], \quad (4.6)$$

przy czym n to liczba par punktów wykorzystanych do identyfikacji.

4.1.2 Transformacja płaska w stereowizji.

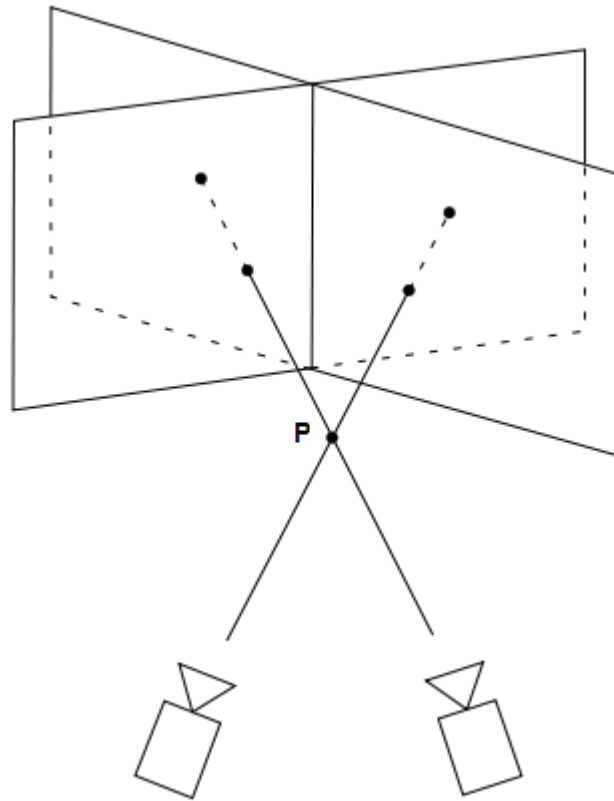
Transformacja płaska może być wykorzystywana w układach stereowizyjnych do rozwiązania klasycznego dla nich zadania, jakim jest określenie położenia punktu w przestrzeni, na podstawie obrazu z dwóch kamer.

Wymagany jest do tego globalny trójwymiarowy układ współrzędnych, dwie płaszczyzny ze zdefiniowanymi układami współrzędnych o znanym położeniu względem układu globalnego, oraz dwie kamery. Interpretacja graficzna sytuacji przedstawiona jest na Rys. 4.3.



Rys. 4.3. Graficzna interpretacja układu stereowizyjnego.

Dla każdej z kamer identyfikowane są dwie transformacje płaskie wiążące płaszczyznę obrazu danej kamery z dwoma płaszczyznami zdefiniowanymi w przestrzeni. Dla badanego punktu P , przy wykorzystaniu dwóch transformacji płaskich, określone są dwa punkty będące odwzorowaniami punktu P na obie płaszczyzny. Znając położenie płaszczyzn względem układu globalnego, można określić położenie tych punktów w globalnym układzie współrzędnych oraz zidentyfikować prostą do której należą. Ponieważ wszystkie operacje wykonywane są dla obu kamer, otrzymywane są dwie proste. Położenie punktu badanego P w globalnym układzie współrzędnych określone jest jako punkt przecięcia prostych (Rys. 4.4).



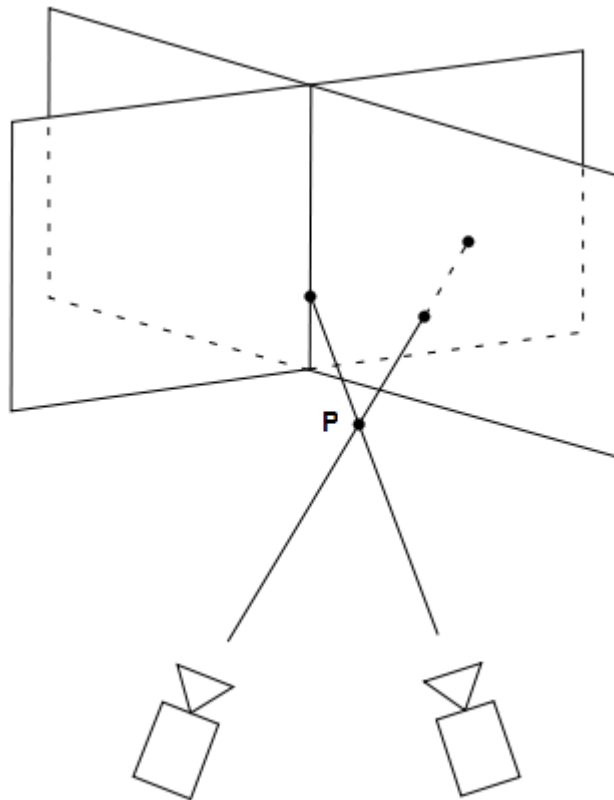
Rys. 4.4. Wyznaczanie położenia punktu w przestrzeni z użyciem transformacji płaskiej.

4.1.3 Błąd algorytmu stereowizyjnego.

Metoda wykorzystania transformacji płaskiej w stereowizji obarczona jest błędem. Natrafiliśmy na niego w trakcie pracy w kole naukowym nad projektem wykorzystującym transformację płaską w układzie stereowizyjnym. Dla pewnych charakterystycznych serii zdjęć dokładność otrzymywanych wyników była zdecydowanie gorsza niż dla pozostałych. W niektórych przypadkach wynik wydawał się być niemal losowy.

Błąd występuje jeżeli badany punkt, na obrazie przynajmniej jednej z kamer, znajduje się w pobliżu przecięcia płaszczyzn lokalnych, dla których definiowane są transformacje płaskie. Aby zrozumieć skąd bierze się błąd należy założyć sytuację, w której na obrazie jednej z kamer, to jest na jednej z płaszczyzn monitorowych, badany punkt znajduje się dokładnie na prostej będącej przecięciem płaszczyzn lokalnych. Ponadto założyć należy że transformacja pierwsza wiąże płaszczyznę monitorową z pierwszą płaszczyzną lokalną zaś transformacja druga wiąże płaszczyznę monitorową z drugą płaszczyzną lokalną. W takiej sytuacji punkt, będący odwzorowaniem punktu badanego przez transformację pierwszą oraz punkt, będący odwzorowaniem punktu badanego przez transformację drugą, będą miały takie samo położenie względem

zdefiniowanego globalnego układu współrzędnych (Rys. 4.5). Algorytm zakłada że na podstawie obrazu z każdej z dwóch kamer, wyznaczona zostanie jednoznacznie prosta, a punkt finalny jest punktem przecięcia tych dwóch prostych. Ponieważ dwa identyczne punkty nie definiują jednoznacznie prostej, lecz pęk prostych, działanie algorytmu zostaje przerwane w takiej sytuacji bez wygenerowania wyniku.



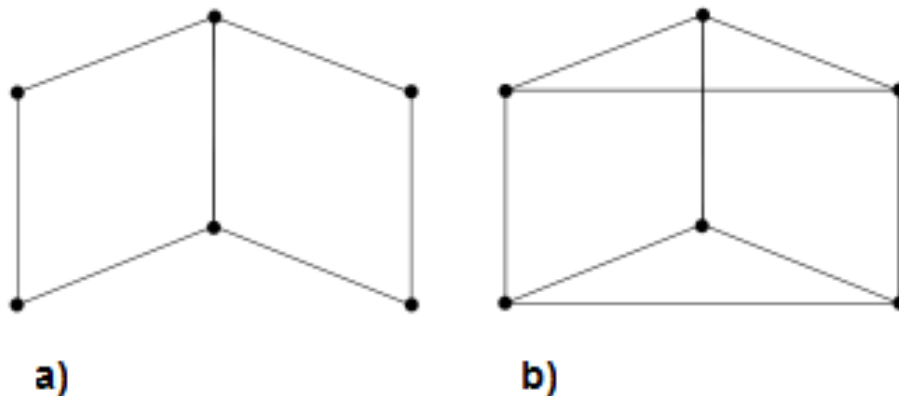
Rys. 4.5. Źródło błędu algorytmu stereowizyjnego.

W rzeczywistej implementacji algorytmu do czynienia mamy z nieco inną sytuacją. Należy bowiem uwzględnić czynniki takie jak: zniekształcenia układu optycznego, skończona dokładność wykonania wzorca, skończona dokładność obliczeń numerycznych, skwantowanie płaszczyzny monitorowej. W wyniku tego punkty otrzymywane jako odwzorowania punktów z płaszczyzny monitorowej obarczone są błędami. W związku z tym, dla założonej wcześniej sytuacji należy spodziewać się uzyskania dwóch, położonych blisko, ale nie identycznych punktów. Pewna prosta zostaje zatem zdefiniowana. Z punktu widzenia metody jest ona jednak bezużyteczna, podobnie jak punkt wyznaczony przy jej wykorzystaniu. Ponieważ błędy dotyczą wszystkich punktów, wszystkie uzyskane proste są zdegenerowane. Problem ten ma największe znaczenie dla punktów leżących na płaszczyźnie monitorowej w pobliżu prostej przecięcia płaszczyzn. Przyporządkowywane bowiem im punkty na płaszczyznach lokalnych leżą blisko siebie a co za tym idzie, błędy jakimi są obarczone powodują znaczny stopień degeneracji definiowanych przez nie prostych.

4.1.4 Korekcja błędu algorytmu stereowizyjnego.

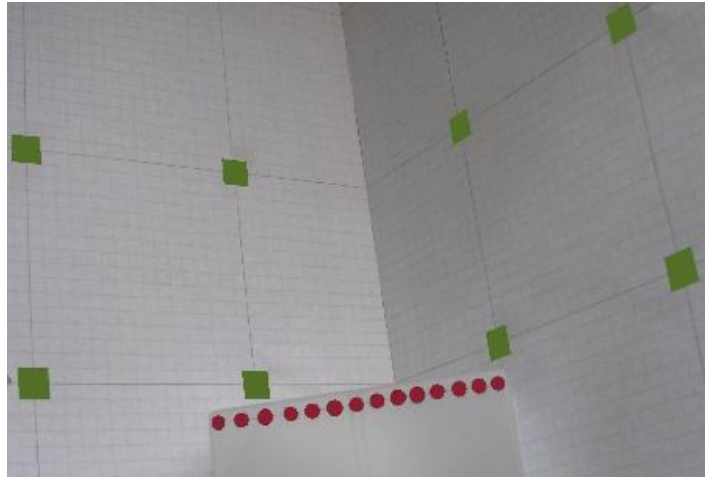
Zaproponowana przez nas metoda korekcji błędu algorytmu stereowizyjnego polega na zdefiniowaniu trzeciej płaszczyzny lokalnej, zwanej pomocniczą. Nałożone jest ograniczenie o braku punktu wspólnego dla wszystkich trzech płaszczyzn. Dla płaszczyzny pomocniczej identyfikowane są dodatkowe transformacje płaskie. W takiej sytuacji każdemu punktowi z płaszczyzny monitorowej można, przy użyciu transformacji płaskich, przyporządkować trzy punkty na płaszczyznach lokalnych. Jeżeli ograniczenie jest spełnione, to co najmniej dwa punkty nie są identyczne, dzięki czemu definiowanie prostych jest zawsze możliwe. Ponadto istnieje możliwość poprawy jakości wyników również dla punktów leżących na płaszczyźnie monitorowej w pobliżu prostej przecięcia płaszczyzn. Wystarczy że na obrazach z kamer, proste przecięcia płaszczyzny pomocniczej z płaszczyznami podstawowymi, są oddalone od siebie.

Metoda ta nie wymaga przygotowywania zaawansowanego konstrukcyjnie wzorca. Możliwe jest użycie klasycznego wzorca kalibracyjnego jak na Rys. 4.6.a, przy czym wybór płaszczyzn podstawowych i płaszczyzny pomocniczej może wyglądać jak na Rys. 4.6.b.

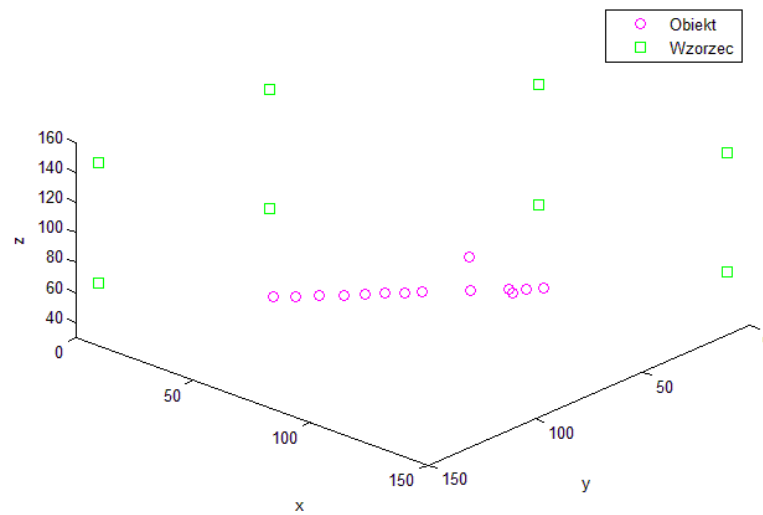


Rys. 4.6. Wzorec kalibracyjny: a) klasyczny układ płaszczyzn; b) nowy układ płaszczyzn

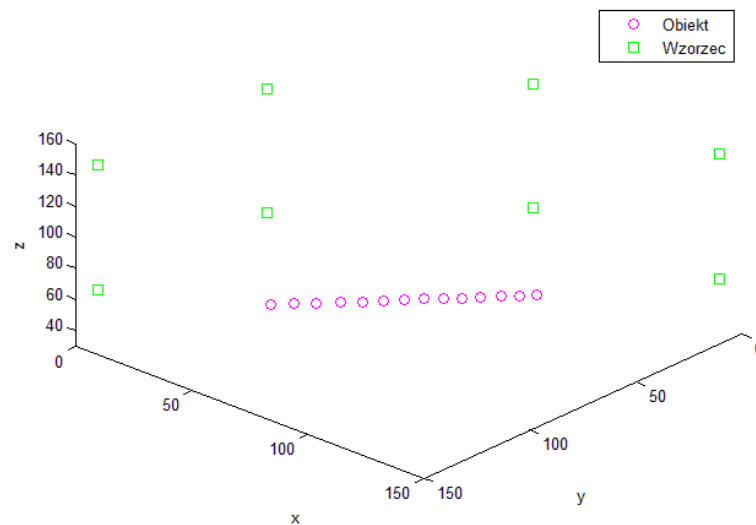
Przykładowe zdjęcie dla którego występuje błąd algorytmu przedstawione jest jako Rys. 4.7. Na Rys. 4.8 widać scenę odtworzoną przy zastosowaniu algorytmu bazowego, natomiast Rys. 4.9 prezentuje scenę odtworzoną przy zastosowaniu algorytmu z zaproponowaną przez nas metodą korekcji błędu.



Rys. 4.7. Zdjęcie dla którego występuje błąd algorytmu



Rys. 4.8. Wynik działania algorytmu bazowego



Rys. 4.9. Wynik działania algorytmu z zaproponowaną metodą korekcji.

4.2 Zastosowany algorytm stereowizyjny.

Zastosowany algorytm stereowizyjny stworzony został na podstawie algorytmu stereowizyjnego wykorzystującego transformację płaską (opisanego w rozdziale 4.1.2) z uwzględnieniem zaproponowanej metody korekcji jego błędów (opisanej w rozdziale 4.1.4). Zakłada on wykorzystanie wzorców kalibracyjnych zgodnych ze schematem opisanym w rozdziale 2.2.

Danymi wejściowymi dla algorytmu są zdjęcia sceny wraz ze wzorcem, oraz zdjęcia sceny wraz z obiektem badanym. Ponadto wymaga on informacji na temat budowy wzorca oraz jego położenia względem globalnego układu współrzędnych. Jako wynik algorytmu otrzymywane jest położenie obiektu badanego w globalnym układzie współrzędnych.

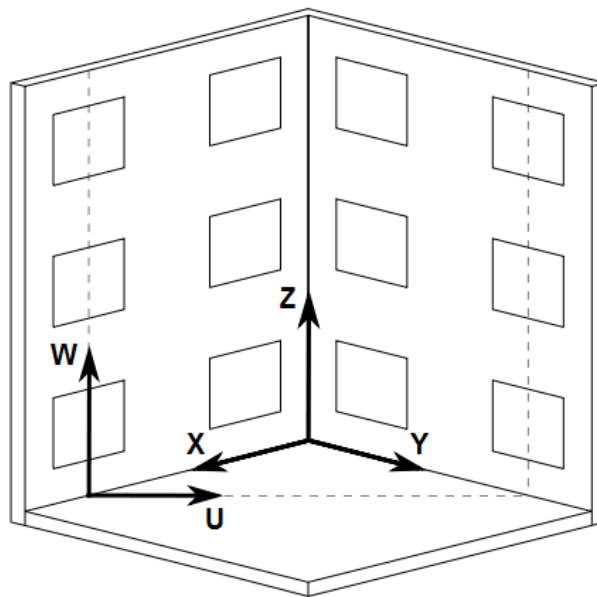
Założony jest następujący cykl pracy:

- 1) ustawienie kamer a tym samym zdefiniowanie sceny jako obszaru obserwowanego przez obie kamery,
- 2) wybór globalnego układu współrzędnych
- 3) umieszczenie wzorca kalibracyjnego w obszarze sceny, w znanym położeniu względem globalnego układu współrzędnych,
- 4) identyfikacja współczynników transformacji płaskich,
- 5) usunięcie wzorca jeżeli istnieje taka potrzeba ,
- 6) wykonanie zdjęć obiektu (lub jego modelu) znajdującego się w obszarze sceny,
- 7) przetworzenie przez algorytm stereowizyjny informacji ze zdjęć.

4.2.1 Definiowanie globalnego układu współrzędnych oraz płaszczyzn lokalnych.

Domyślnie globalny układ współrzędnych definiowany jest jako układ prawoskrętny zgodnie z płaszczyznami wzorca kalibracyjnego (Rys. 4.10). Istnieje możliwość wyboru innego układu globalnego i zdefiniowania w programie macierzy rotacji i translacji transformujących układ domyślny do układu pożądanego.

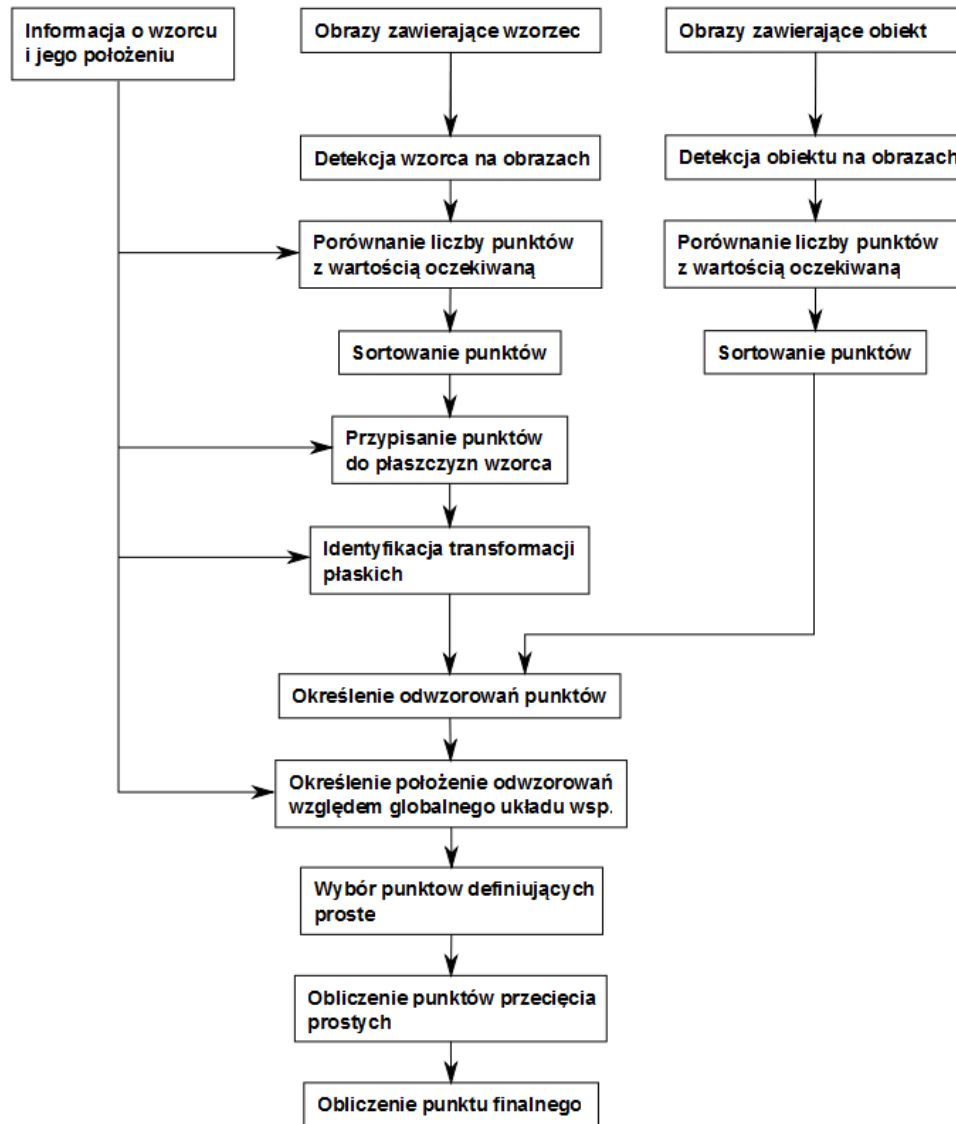
Płaszczyzny lokalne podstawowe zgodne są z domyślnym globalnym układem współrzędnych. Płaszczyzna pierwsza to płaszczyzna XZ, płaszczyzna druga to płaszczyzna YZ. Sposób zdefiniowania płaszczyzny lokalnej pomocniczej, oznaczonej jako UW, przedstawiony jest na Rys. 4.10.



Rys. 4.10. Definiowanie globalnego układu współrzędnych i płaszczyzn lokalnych

4.2.2 Opis zastosowanego algorytmu stereowizyjnego.

Na Rys. 4.11 przedstawiony został schemat blokowy zastosowanego algorytmu.



Rys. 4.11. Schemat blokowy zastosowanego algorytmu stereowizyjnego

W pierwszej fazie na obrazach wykrywany jest wzorec kalibracyjny. Opis algorytmu wykrywania wzorca znajduje się w rozdziale 3.1. Liczba wykrytych punktów wzorca porównywana jest z liczbą punktów oczekiwanych, jeżeli liczby te nie zgadzają się algorytm zgłasza błąd. W przypadku poprawnej ilości punktów, są one sortowane według kryterium położenia na obrazie z kamer, a następnie przypisywane do odpowiednich płaszczyzn wzorca. Dane te oraz informacje o budowie wzorca a dokładniej o położeniu punktów wzorca względem płaszczyzn lokalnych, pozwalają na dokonanie identyfikacji transformacji płaskich (rozdział 4.1.1). Wiążą one płaszczyzny monitorowe obu kamer z trzema płaszczyznami lokalnym definiowanym przez wzorec.

W fazie drugiej na obrazach wykrywane są obiekty. Liczba wykrytych punktów reprezentujących obiekt porównywana jest z liczbą oczekiwaną (domyślnie liczba ta wynosi jeden), w przypadku braku zgodności algorytm zgłasza błąd. W przypadku poprawnej liczby, jeżeli jest ona większa od 1, punkty są sortowane według kryterium położenia na obrazie z kamer.

W fazie trzeciej, dla każdego punktu reprezentującego obiekt, poprzez zastosowanie zidentyfikowanych transformacji płaskich, określone są odwzorowania na płaszczyzny lokalne. Następnie poprzez znajomość położenia wzorca i płaszczyzn lokalnych względem globalnego układu współrzędnych, określone jest położenie odwzorowań względem układu globalnego. Dla każdej pary punktów reprezentującej jeden obiekt na obrazach i dla każdej z trzech par płaszczyzn wzorca, wybierane są cztery odpowiednie odwzorowania, definiujące dwie proste w przestrzeni. Następnie obliczany jest punkt przecięcia prostych, z wykorzystaniem algorytmu opisanego w rozdziale 4.2.3. Ponieważ można wybrać trzy pary płaszczyzn, dla każdego obiektu badanego wyznaczone zostają trzy punkty w przestrzeni. Algorytm obliczania punktu finalnego na podstawie trzech punktów przedstawiony jest w rozdziale 4.2.4.

4.2.3 Algorytm obliczania punktu przecięcia prostych w przestrzeni.

Istnieją trzy możliwości wzajemnego położenia dwóch dowolnych prostych w przestrzeni trójwymiarowej. Proste mogą być równoległe (w szczególności mogą pokrywać się), mogą przecinać się w punkcie lub mogą być skośne tzn. nie przecinać się ani nie być równoległe. Z punktu widzenia opisywanej metody, pożądane jest wystąpienie sytuacji drugiej. W rzeczywistej implementacji algorytmu jest to mało prawdopodobne. Powodem tego są czynniki takie jak: zniekształcenia układu optycznego, skończona dokładność wykonania wzorca, skończona dokładność obliczeń numerycznych, skwantowanie płaszczyzny monitorowej. W większości przypadków otrzymywane proste są skośne, nie mające punktu przecięcia. Dla każdej pary prostych skośnych można jednak wskazać dokładnie jeden punkt, którego odległość od obu prostych jest najmniejsza. Punkt ten ma cechy najbardziej zbliżone do punktu przecięcia prostych i jako jego przybliżenie może być wykorzystywany w dalszej części algorytmu. Całkowicie niepożądane jest wystąpienie prostych równoległych, co powoduje błąd i prowadzi do przerwania algorytmu. Wynika to z braku zarówno punktu przecięcia prostych jak i możliwości jednoznacznego wyznaczenia jego przybliżenia. Algorytm powstał w oparciu o materiały z wykładów „Algebra wyższa” prowadzonych przez dr Magdalenę Sękowską.

Każda z prostych: L_1 , L_2 jest określona jest poprzez dwa punkty do niej należące:

$$P_{L11}, P_{L12} \in L_1 ,$$

$$P_{L21}, P_{L22} \in L_2 .$$

Pozwala to na wyznaczenie dla każdej prostej wektora kierunkowego:

$$\begin{aligned} V_{L1} &= P_{L12} - P_{L11}, \\ V_{L2} &= P_{L22} - P_{L21}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

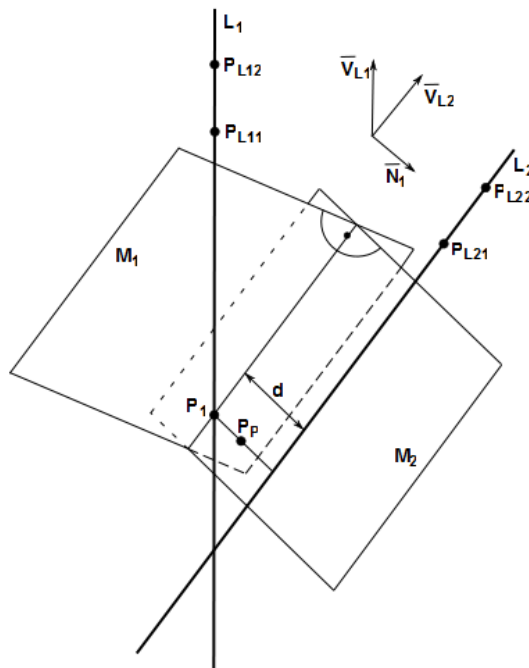
W pierwszym kroku algorytmu sprawdzane jest czy punkty definiujące poszczególne proste nie są identyczne, to jest czy spełnione są warunki:

$$\begin{aligned} P_{L11} &\neq P_{L12}, \\ P_{L21} &\neq P_{L22}. \end{aligned}$$

Następnie sprawdzane jest czy proste nie są równoległe (w szczególności czy nie pokrywają się), to jest czy spełniony jest warunek:

$$\sim \exists k: V_{L2} = k \cdot V_{L1}.$$

Nie spełnienie któregoś z warunków powoduje wystąpienie błędu i przerwanie działania algorytmu. Spełnienie warunków powoduje przejście do kroku drugiego, w którym obliczane jest przybliżenie punktu przecięcia prostych, lub w szczególności obliczany jest punkt przecięcia prostych jeżeli taki punkt istnieje.



Rys. 4.12. Sposób obliczania przybliżenia punktu przecięcia

Zastosowaną metodę ilustruje Rys. 4.12. W pierwszej fazie poszukiwany jest punkt P_1 na prostej L_1 , który jest najmniej odległy od prostej L_2 . W tym celu wyznaczana jest płaszczyzna M_1 , która zawiera prostą L_1 i jest równoległa do prostej L_2 :

$$\begin{aligned} M_1: L_1 \subset M_1 \wedge L_2 \parallel M_1, \\ P_{L_{11}} \in L_1 \Rightarrow P_{L_{11}} \in M_1, \\ \vec{N}_1 \perp M_1, \\ \vec{N}_1 = \vec{V}_{L_1} \times \vec{V}_{L_2}. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Następnie znajduje się płaszczyzna M_2 , która zawiera prostą L_2 i jest równoległa do płaszczyzny M_1 :

$$\begin{aligned} M_2: L_2 \subset M_2 \wedge M_1 \perp M_2, \\ P_{L_{21}} \in L_2 \Rightarrow P_{L_{21}} \in M_2, \\ \vec{N}_2 \perp M_2, \\ \vec{N}_2 = \vec{N}_1 \times \vec{V}_{L_2}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Prosta powstała przez przecięcie płaszczyzn M_1 i M_2 jest rzutem prostej L_2 na płaszczyznę M_1 . Punkt P_1 można zatem policzyć jako punkt przecięcia prostej L_1 z płaszczyzną M_2 :

$$P_1: P_1 \in L_1 \wedge P_1 \in M_2. \quad (4.10)$$

Obliczana jest odległość d między prostymi, czyli między punktem P_1 i prostą L_2 :

$$V_1 = P_1 - P_{L_{21}}, \quad (4.11)$$

$$d = \frac{\|V_{L_2} \times V_1\|}{\|V_{L_2}\|}. \quad (4.12)$$

Obliczany jest punkt P_p będący przybliżeniem punktu przecięcia prostych. Jest on równy translacji punktu P_1 w kierunku zgodnym z wektorem N_1 o odległość równą połowie odległości d między prostymi:

$$P_p = P_1 + N_1 \cdot \frac{d}{2 \cdot \|N_1\|}. \quad (4.13)$$

4.2.4 Algorytm obliczania punktu finalnego.

Algorytm wykorzystywany jest, jako element algorytmu stereowizyjnego do obliczania punktu finalnego. Zadaniem algorytmu jest wyznaczenie punktu, który z możliwie największą dokładnością określałby położenie badanego obiektu w przestrzeni. Jak zostało wspomniane w opisie algorytmu stereowizyjnego (rozdział 4.2.2), dla każdej pary punktów reprezentującej jeden obiekt i dla każdej z trzech par płaszczyzn wzorca, obliczany jest jeden punkt w przestrzeni. W ten sposób każdemu obiektowi badanemu odpowiadają trzy punkty (P_{P1}, P_{P2}, P_{P3}), określające jego położenie. Punkt finalny obliczany jest jako średnia ważona tych punktów, z wagami w_1, w_2, w_3 , zgodnie ze wzorem (4.14):

$$P_F = \frac{w_1 \cdot P_{P1} + w_2 \cdot P_{P2} + w_3 \cdot P_{P3}}{w_1 + w_2 + w_3}. \quad (4.14)$$

Najistotniejszą częścią algorytmu jest dobór wag odpowiadających punktom. Waga stosowana w algorytmie odzwierciedla szacowaną dokładność z jaką dany punkt został wyznaczony. Jest ona obliczana ze wzoru (4.15):

$$w_i = \frac{1}{\sqrt{\min(|P_{iL12} - P_{iL11}|, |P_{iL22} - P_{iL21}|)}}. \quad (4.15)$$

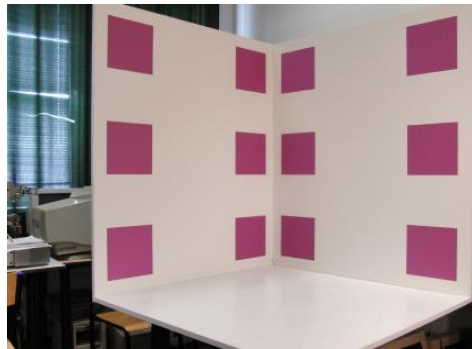
przy czym punkty $P_{iL11}, P_{iL12}, P_{iL21}, P_{iL22}$ to punkty określające proste na podstawie których wyznaczony został punkt P_{Pi} , zgodnie z algorytmem przedstawionym w rozdziale 4.2.3.

Taki sposób obliczania współczynników wynika z przyjętych założeń. Zgodnie z rozumowaniem opisanym w rozdziale 4.1.3, wszystkie punkty uzyskiwane jako odwzorowania obarczone są błędami. Oznacza to iż wszystkie proste definiowane przez te punkty są w pewnym stopniu obarczone błędem. Jeżeli wszystkie punkty obarczone są błędami tego samego rzędu to dwa punkty oddalone od siebie definiują prostą znacznie dokładniej niż dwa punkty znajdujące się blisko siebie. Jakość wyznaczenia prostej zależy od odległości między punktami, które ją definiują natomiast jakość wyznaczenia punktu przecięcia prostych (rozdział 4.2.3) jest determinowana głównie przez prostą, które obarczona jest większym błędem.

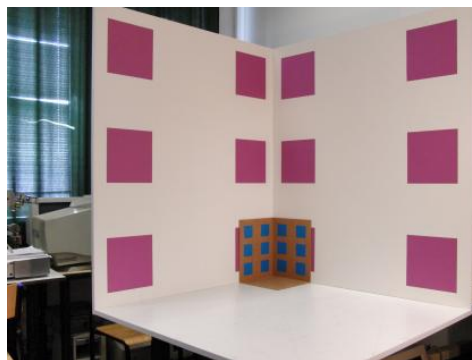
5. Analiza dokładności w zależności od użytego wzorca, rozstawienia aparatów oraz analiza błędu ze względu na poszczególne współrzędne.

5.1 Wpływ wielkości oraz położenia wzorca na dokładność algorytmu.

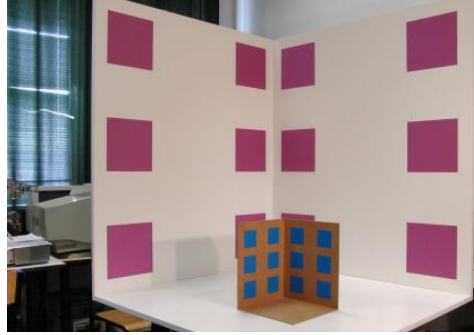
Wstępne testy na małym wzorcu wykazały potrzebę wykonania większego wzorca. Dokładne testy, których wyniki zaprezentowano poniżej, pokazują poprawę jakości algorytmu uzyskaną dla dużego wzorca. Przez błąd rozumiemy odległość otrzymanego punktu od punktu rzeczywistego. Do testów użyto poprawionego algorytmu. Porównanie zostało przeprowadzone zbiorczo dla wszystkich ustawień aparatów. Wykonano testy dla małego wzorca w dwóch położeniach oraz dla wzorca dużego.



Rys. 5.1. Duży wzorzec w początku układu współrzędnych; oznaczany jako W1.



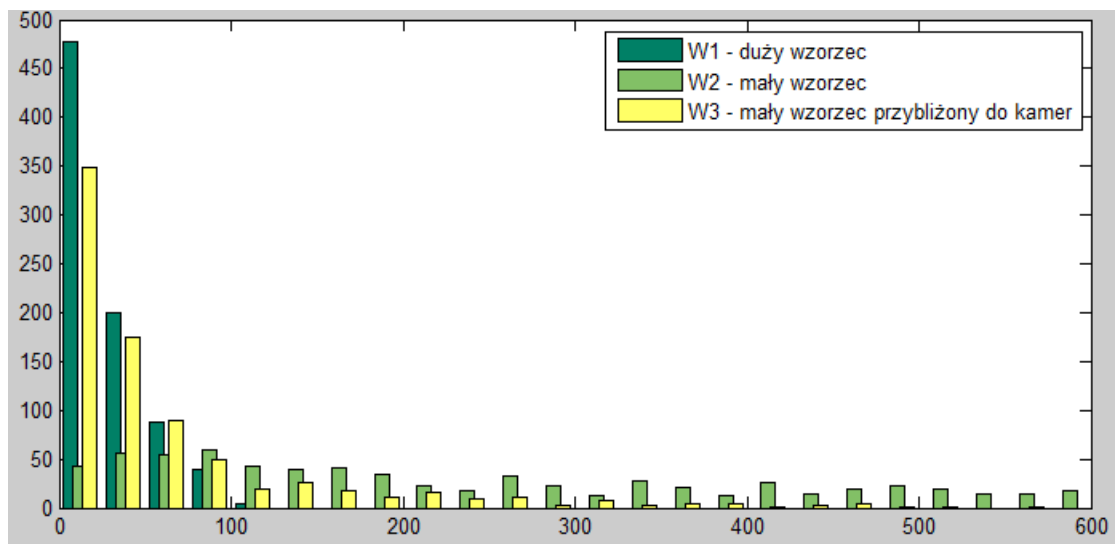
Rys. 5.2. Mały wzorzec, w początku układu współrzędnych (grubość fizyczna wzorca została uwzględniona); oznaczany jako W2.



Rys. 5.3. Mały wzorec w połowie obszaru roboczego (współrzędne x: 500 [mm] y: 500 [mm]); oznaczany jako W3.

Błąd	W1	W2	W3
Maksimum [mm]	115	23059	815
Średnia arytmetyczna [mm]	26.42	360.01	66.71
Średnia kwadratowa [mm]	35.64	955.03	116.32
Mediana [mm]	19.12	243.52	30.90

Tab. 5.1. Zestawienie danych statystycznych dla testów wzorców.



Rys. 5.4. Histogram przedstawiający rozkład błędów dla testów wzorców.

Mały wzorec nie spełnia dobrze swojej roli. Do dużych błędów tej metody przyczynia się kilka problemów. Środki małych pól mogą być nieprecyzyjnie wyznaczone. Pola są reprezentowane małą ilością pikseli, ich obraz jest zniekształcony, w związku z tym algorytm nie może jednoznacznie wyznaczyć wierzchołków, ani nawet krawędzi pól. Mała precyzja wyznaczenia środków mocno wpływa na

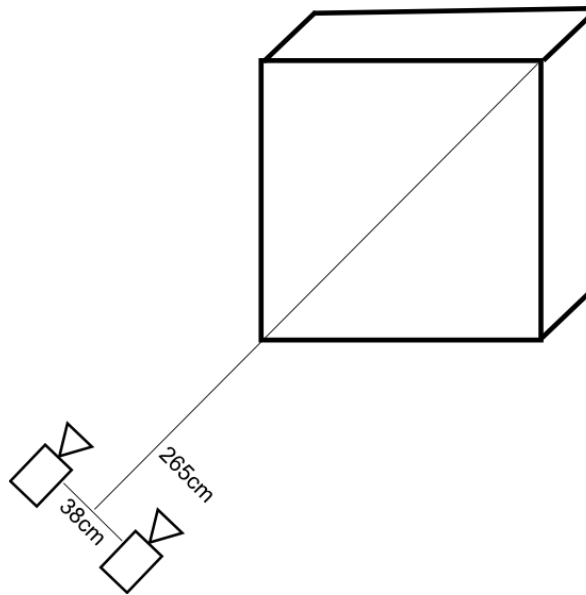
dokładność metody. Kolejnym problemem jest bliskie położenie względem siebie punktów, definiujących płaszczyznę. Ponieważ punkty te są obarczone błędem, im dalej od siebie są położone, tym mniejszy jest wpływ tych błędów na dokładność wyznaczenia płaszczyzny. Zbyt mała precyzja w wyznaczeniu przekształceń płaskich (duże błędy wyznaczania punktów, które mocno przenoszą się na wyznaczenie płaszczyzny) powoduje bardzo duże błędy końcowe. Mały wzorzec ustawiony w początku układu współrzędnych daje maksymalny błąd przekraczający dwudziestokrotnie przestrzeń roboczą. Błąd ten wystąpił w serii piątej, kiedy jedna ze ścian wzorca jest najbardziej zniekształcona perspektywicznie i najmniej czytelna dla algorytmu. Błąd średniokwadratowy wynoszący 95% przestrzeni roboczej potwierdza naszą analizę problemu. Błąd tego rzędu uniemożliwia wykorzystanie metody.

Mały wzorzec ustawiony bliżej aparatów dał lepsze rezultaty, ale błąd przekraczający 80% przestrzeni roboczej nie może być akceptowalny. Poprawa wynika z powiększenia pól wzorca na obrazie (więcej pikseli), jak również zwiększenia rozstawu punktów w obrębie definiowanej płaszczyzny.

Najlepsze i akceptowalne rezultaty dał duży wzorzec, który będzie stosowany przy dalszych testach. Maksymalny błąd ciągle jest duży (ponad 10% przestrzeni roboczej), ale wynika to z różnej jakości pomiarów dla różnych układów kamer. Błędy wynikające ze zniekształconego obrazu pól wzorca zostały ograniczone.

5.2 Wpływ ustawienia kamer na dokładność algorytmu.

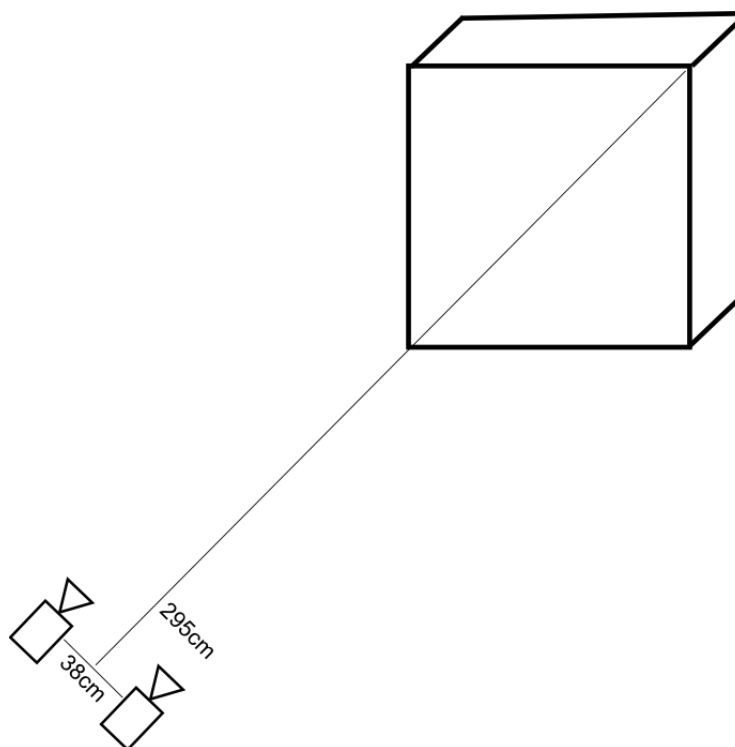
W tym rozdziale pokazany zostanie wpływ rozmieszczenia kamer, na jakość działania algorytmu. Oprócz wyłonienia najlepszego układu, pokazany zostanie wpływ przybliżania i rozsuwania aparatów względem siebie. Dokładność poszczególnych układów jest interesująca z punktu widzenia potencjalnych zastosowań dla algorytmu. W niektórych zastosowaniach praktycznych możliwości ustawienia aparatów mogą być ograniczone, dlatego istotne jest, jaką dokładność będziemy w stanie uzyskać. Porównanie przeprowadzone zostało na wynikach algorytmu poprawionego, uzyskanych z wykorzystaniem wzorca dużego.



Rys. 5.5. Układ kanoniczny; oznaczany jako S1. Aparaty przybliżone do sceny o 30cm względem układu S2.

Błąd	S1
Maksimum [mm]	64.2
Średnia arytmetyczna [mm]	26.0
Średnia kwadratowa [mm]	29.3
Mediana [mm]	24.0

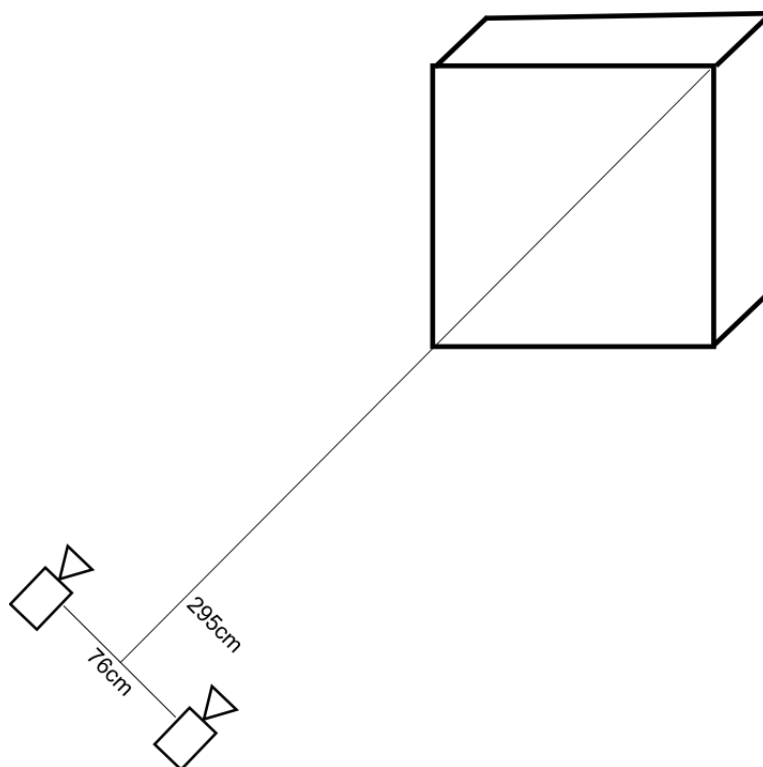
Tab. 5.2. Zestawienie danych statystycznych dla testu układu kamer S1.



Rys. 5.6. Układ kanoniczny; oznaczany jako S2.

Błąd	S2
Maksimum [mm]	114.8
Średnia arytmetyczna [mm]	52.5
Średnia kwadratowa [mm]	58.8
Mediana [mm]	50.0

Tab. 5.3. Zestawienie danych statystycznych dla testu układu kamer S2.



Rys. 5.7. Układ kanoniczny; oznaczany jako S3. Rozstaw aparatów zwiększony o 38cm względem układu S2.

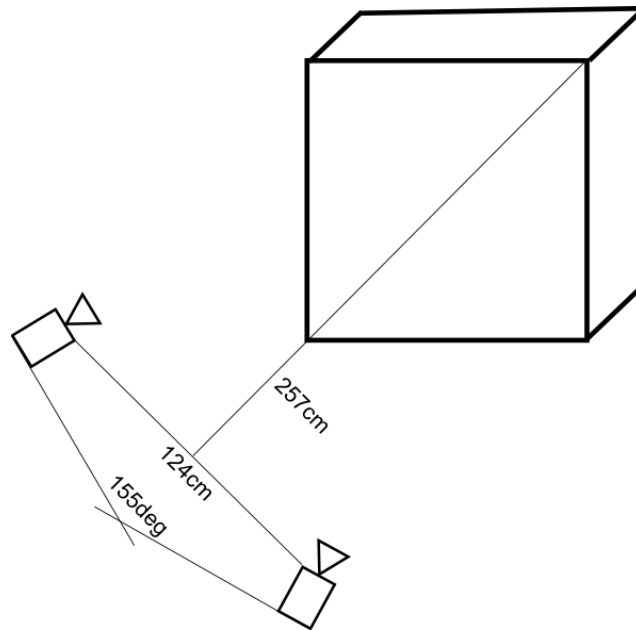
Błąd	S3
Maksimum [mm]	89.5
Średnia arytmetyczna [mm]	39.0
Średnia kwadratowa [mm]	43.3
Mediana [mm]	36.9

Tab. 5.4. Zestawienie danych statystycznych dla testu układu kamer S3.

Z układów kanonicznych, czyli takich gdzie osie optyczne aparatów są równoległe względem siebie, najlepszy rezultat dał układ S1. Przybliżenie układu do sceny dało lepszy rezultat niż rozsunięcie aparatów. Konieczność zachowania równoległości osi optycznych kamer w układach kanonicznych, a za razem konieczność obejmowania całej sceny powoduje, że układy kanoniczne są mocno ograniczone pod względem rozmieszczenia kamer względem siebie i względem sceny. W tym przypadku aparaty zostały przybliżone i rozsunięte maksymalnie na ile było to możliwe przy zachowaniu kryteriów. Jednym z przykładów zastosowania układu kanonicznego jest nawigacja wizyjna robota mobilnego. Dla tego zastosowania nie można rozsunać kamer bardziej niż wynika to z gabarytów robota. Nie możemy również przybliżyć kamer do sceny, ale cenna jest informacja o zwiększaniu dokładności pomiarów w miarę

przybliżania się całego robota. Takie wykorzystanie naszego algorytmu jest możliwe, potrzebna jest tylko kalibracja i uwzględnienie, że globalny układ współrzędnych jest powiązany z układem kamer, który musi być stały. Zaletą kanonicznego układu kamer jest również dostępność takich układów na rynku. Można kupić dwie kamery o równoległych osiach optycznych zamkniętych w jednej obudowie.

Następnie zbadaliśmy dokładność układów dowolnych, jeszcze bardziej zwiększając odległość między aparatami. Ponieważ aparaty nie muszą być równoległe nie musieliśmy oddalać ich od obserwowanej sceny.

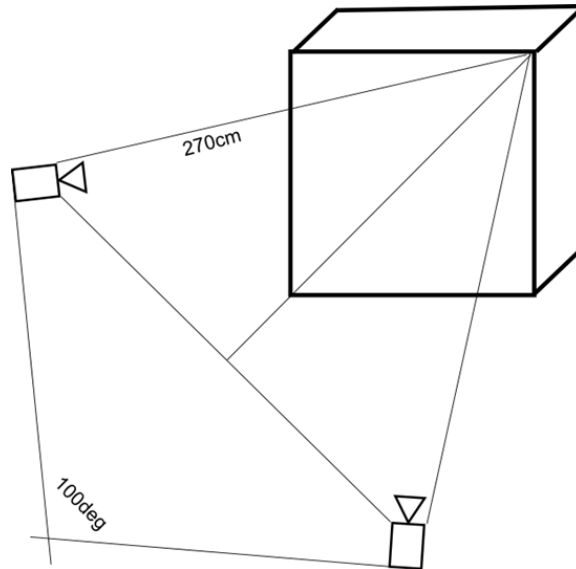


Rys. 5.8. Układ dowolny kamer; oznaczany jako S4.

Błąd	S4
Maksimum [mm]	28.0
Średnia arytmetyczna [mm]	10.0
Średnia kwadratowa [mm]	11.5
Mediana [mm]	8.3

Tab. 5.5. Zestawienie danych statystycznych dla testu układu kamer S4.

Widać zdecydowaną poprawę w stosunku do układów kanonicznych. Dzięki jednoczesnemu przybliżeniu aparatów do sceny i rozsunięciu ich względem siebie, maksymalny błąd zmalał ponad dwukrotnie, w porównaniu z najlepszym wynikiem wśród układów kanonicznych.



Rys. 5.9. Układ dowolny kamer; oznaczany jako S5.

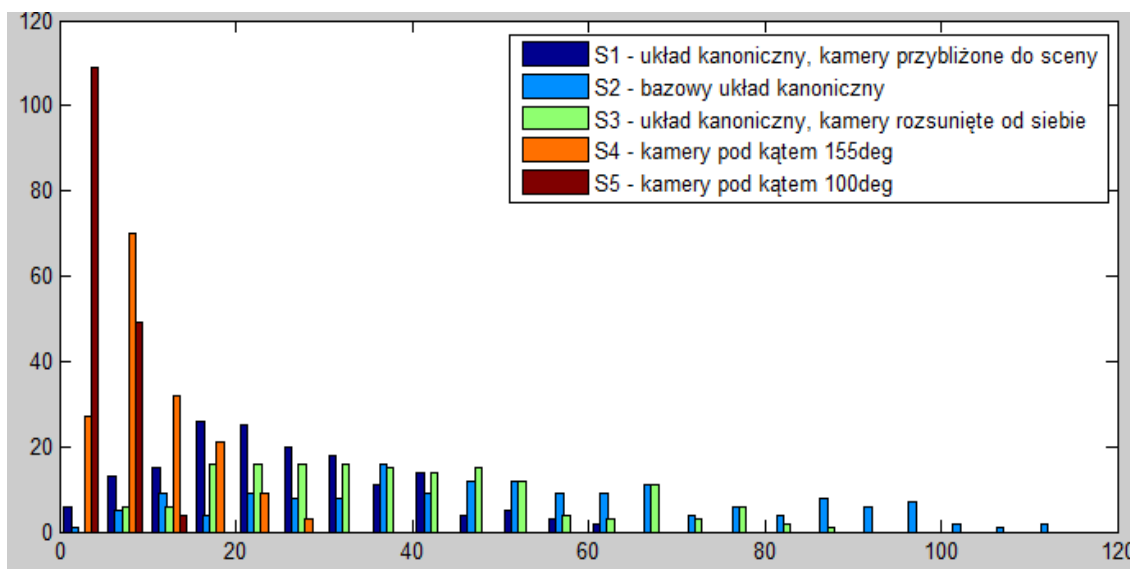
Błąd	S5
Maksimum [mm]	12.2
Średnia arytmetyczna [mm]	4.6
Średnia kwadratowa [mm]	5.0
Mediana [mm]	4.4

Tab. 5.6. Zestawienie danych statystycznych dla testu układu kamer S5.

Najlepszy z uzyskanych wyników dała seria piąta, w której kamery rozsunięte są maksymalnie względem siebie, a osie optyczne przecinają się pod kątem 80° . Przy obecnie wykorzystywanym wzorcu nie jesteśmy w stanie osiągnąć kąta 90° tak, aby obie kamery widziały oba wzorce, w stopniu pozwalającym na precyzyjne wyznaczenie środków ich pól przez algorytm. Maksymalny błąd nie przekracza 1.25% długości sceny. Średni błąd wynosi 5mm. Tego typu układ kamer możemy wykorzystać na przykład w hali produkcyjnej, w której mamy większe możliwości pozycjonowania. Układ taki mógłby być wykorzystany na przykład do dynamicznego wyznaczania przestrzeni zabronionej dla robota.

Błąd	S1	S2	S3	S4	S5
Maksimum	64.23	114.75	89.46	27.93	12.16
Średnia artmetyczna	26.08	52.50	38.91	9.98	4.64
Średnia kwadratowa	29.34	58.82	43.29	11.49	5.00
Mediana	23.97	50.02	36.91	8.33	4.36

Tab. 5.7. Zestawienie danych statystycznych dla testów różnych układów kamer

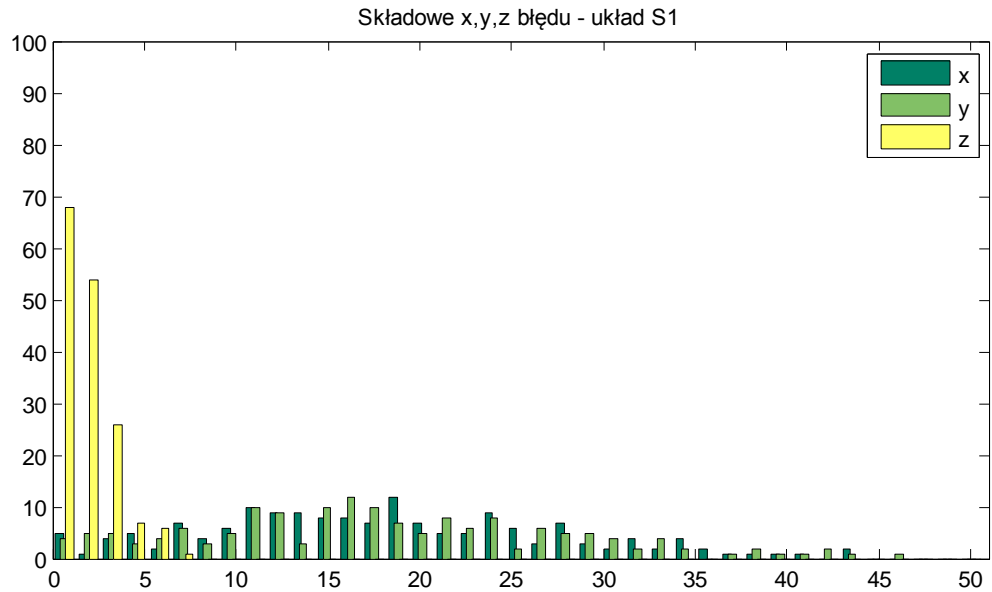


Rys. 5.10. Histogram przedstawiający rozkład błęd dla testów różnych układów kamer.

Tab. 5.7 zawiera porównanie poszczególnych układów aparatów. Rys. 5.10 przedstawia histogramy błędów. Analiza zarówno wybranych wskaźników statystycznych, jak i dokładniejszego histogramu potwierdza, że najlepsze rezultaty dały szeroko rozstawione aparaty, leżące blisko sceny. Wśród układów kanonicznych najlepszy okazał się ten leżący najbliżej sceny.

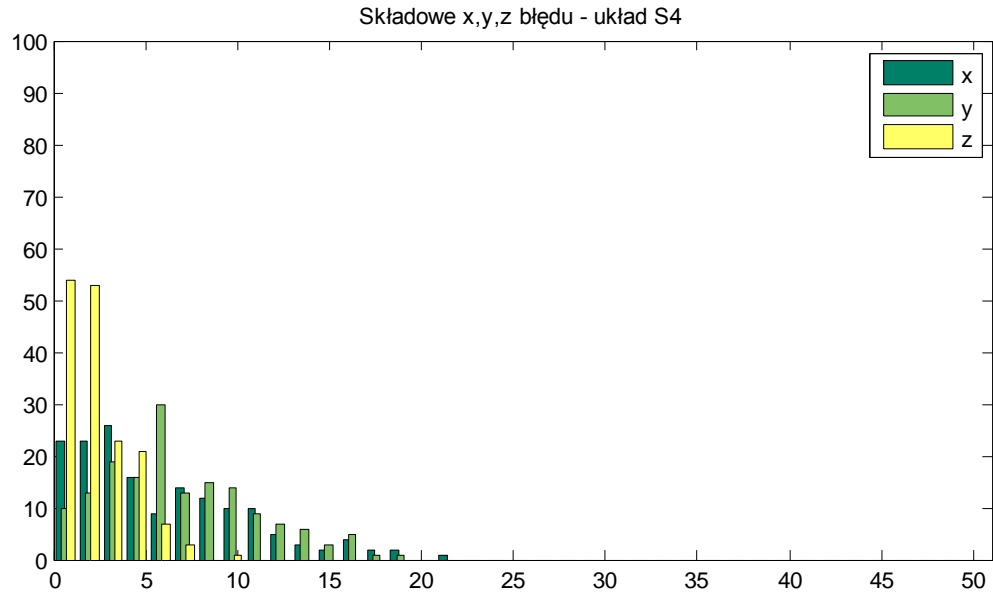
5.3 Analiza błędu ze względu na poszczególne współrzędne.

W powyższych podrozdziałach błąd definiowany był, jako odległość punktu wyznaczonego przez algorytm od punktu rzeczywistego. Poniżej zostanie przedstawiona analiza poszczególnych składowych błędów dla serii S1, S4 i S5. Serie S2 i S3 są zbliżone do serii S1 i zostały pominięte. Rysunki 5.11 5.12 i 5.13 przedstawiają histogramy składowych błędów dla poszczególnych układów kamer.



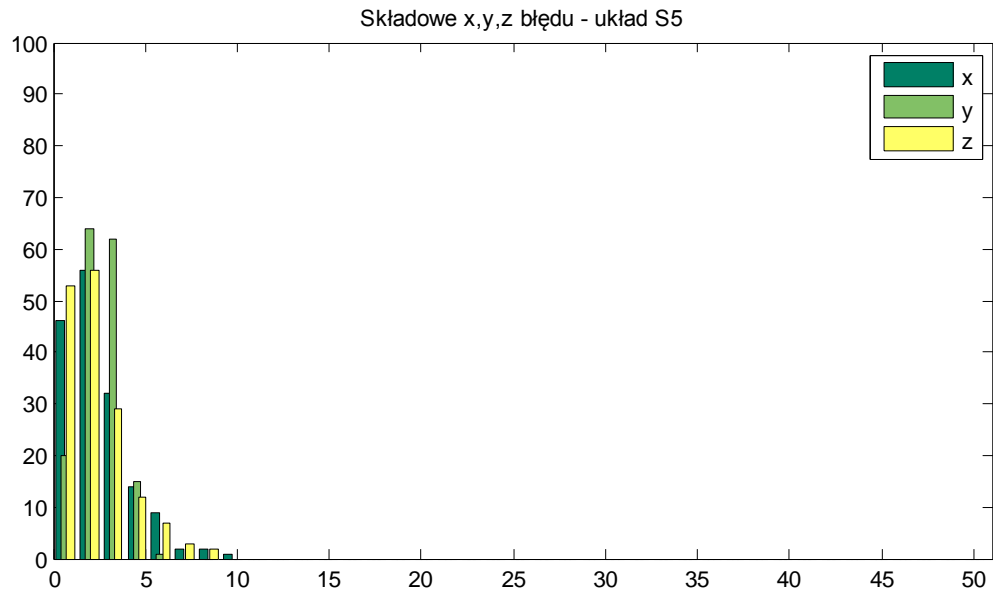
Rys. 5.11. Histogram przedstawiający rozkład składowych x y z błędów dla układu S1.

Z histogramu widać, że najdokładniej wyznaczona została współrzędna z. Współrzędne x oraz y obciążone są błędem w podobnym stopniu.



Rys. 5.12. Histogram przedstawiający rozkład składowych x y z błędu dla układu S4.

Po rozsunięciu kamer od siebie widzimy, że zmniejszony zostaje błąd współrzędnych x i y, natomiast współrzędna z jest obciążona błędem w podobnym stopniu.



Rys. 5.13 Histogram przedstawiający rozkład składowych x y z błędu dla układu S5.

Przy kamerach rozstawionych tak, że ich osie optyczne przecinają się pod kątem 80° wszystkie trzy składowe wyznaczone są z tą samą dokładnością.

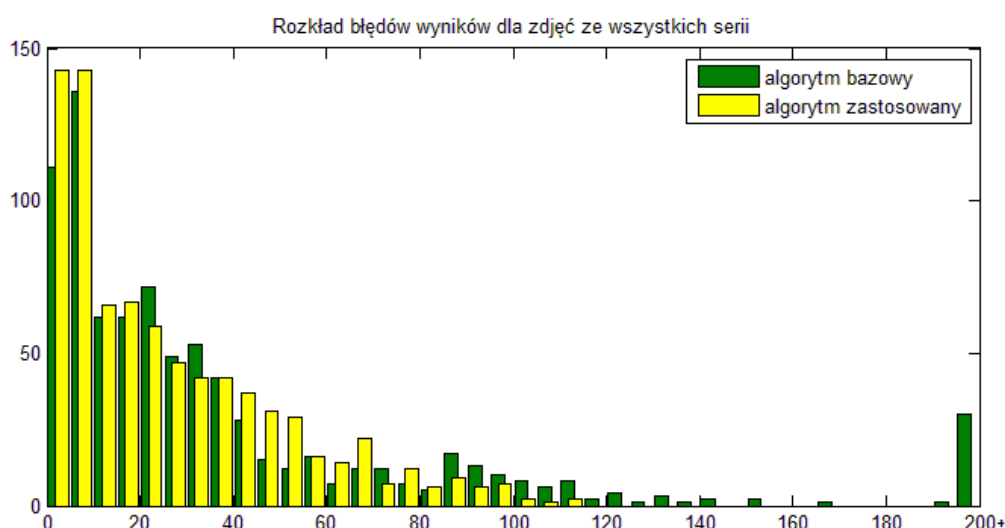
6. Porównanie wyników działania zastosowanego algorytmu stereowizyjnego oraz algorytmu bazowego.

6.1 Porównanie wyników działania algorytmów dla przypadku ogólnego.

Sposób przeprowadzania testów oraz budowa zaproponowanego przez nas algorytmu (rozdział 4.2.2) pozwala na porównanie wyników jego działania z wynikami działania algorytmu bazowego (rozdział 4.1.2). Porównanie przeprowadzone zostało w oparciu o błąd wyniku, zdefiniowany jako odległość między rzeczywistym położeniem obiektu a położeniem wyznaczonym przez algorytm. Brane pod uwagę były wyniki uzyskane we wszystkich seriach przy kalibracji z użyciem wzorca pierwszego. Wyniki porównania prezentuje Tab. 6.1. oraz Rys. 6.1.

Błąd	Bazowy algorytm	Zastosowany algorytm
Maksimum [mm]	2401	115
Średnia arytmetyczna [mm]	49	26
Średnia kwadratowa [mm]	139	36
Mediana [mm]	23	19

Tab. 6.1. Porównanie błędów wyników algorytmu bazowego i zastosowanego dla punktów badanych we wszystkich seriach.



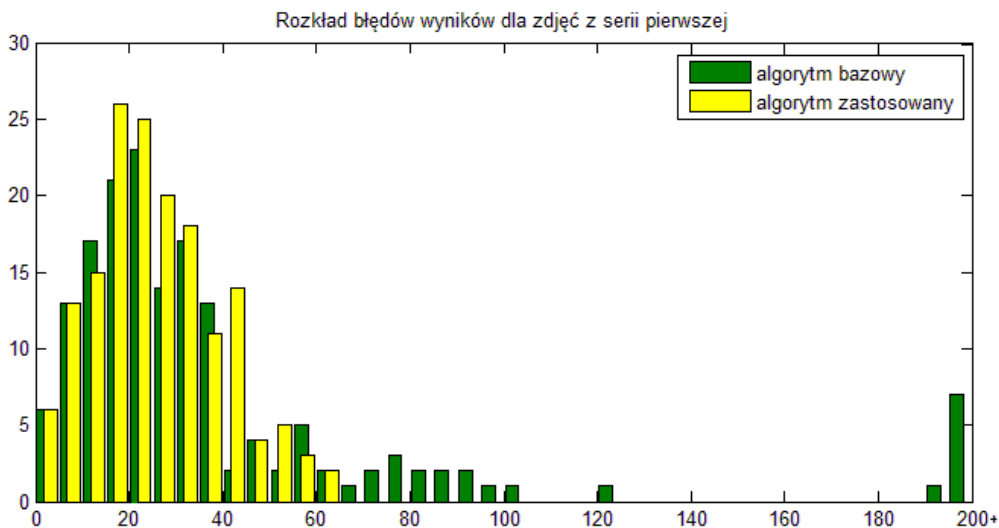
Rys. 6.1. Histogramy błędów wyników algorytmu bazowego i zastosowanego dla punktów badanych we wszystkich seriach.

Porównanie wyników działania obu algorytmów dla punktów badanych we wszystkich seriach pozwala stwierdzić iż zaproponowany przez nas algorytm umożliwia uzyskiwanie zdecydowanie dokładniejszych wyników niż algorytm bazowy. Użycie zaproponowanego przez nas algorytmu spowodowało blisko czterokrotne zmniejszenie średniej kwadratowej błędów i blisko dwukrotne zmniejszenie średniej arytmetycznej błędów, w stosunku do bazowego algorytmu (Tab. 6.1). Korzystniej prezentuje się również rozkład błędów (Rys.6.1).

Dokładniejsze porównanie obu algorytmów wymaga skupienia się na jednej serii. Wybrana została seria pierwsza, dla której uzyskiwane wyniki były najbardziej reprezentatywne. Efekty porównania prezentuje Tab. 6.2. oraz Rys. 6.2.

Błąd	Bazowy algorytm	Zastosowany algorytm
Maksimum [mm]	2401	64
Średnia arytmetyczna [mm]	59	26
Średnia kwadratowa [mm]	207	29
Mediana [mm]	25	24

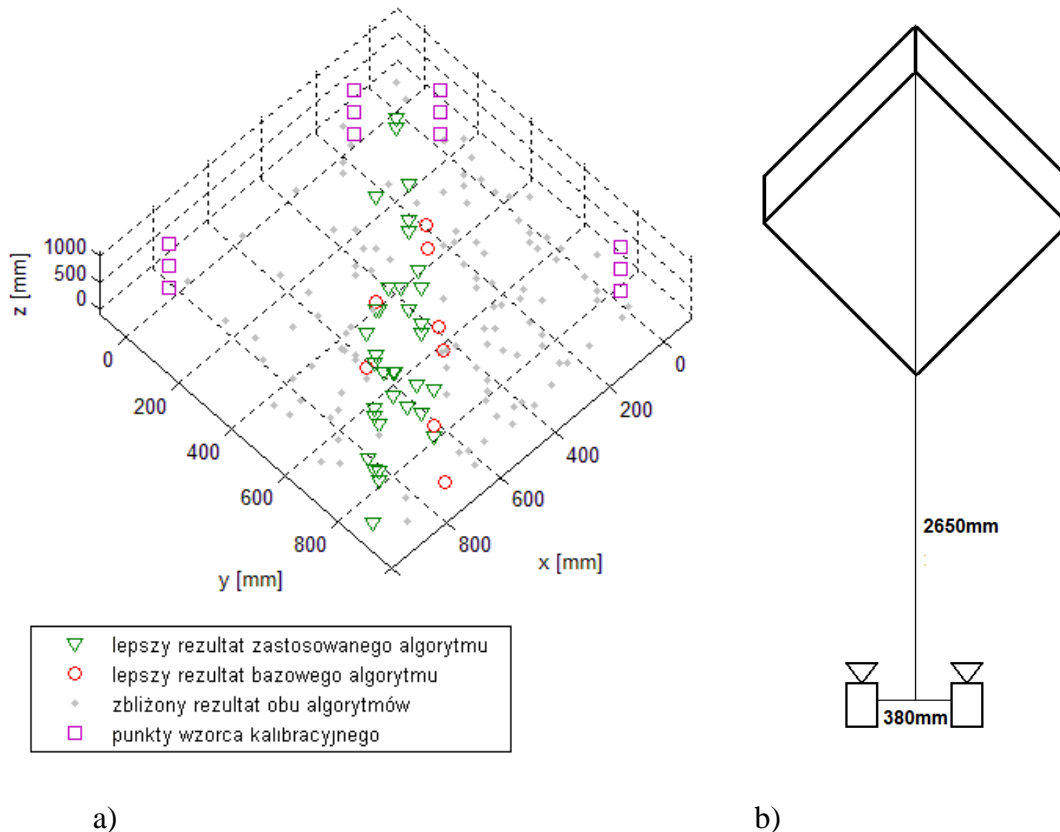
Tab. 6.2. Porównanie błędów wyników algorytmu bazowego i zastosowanego dla punktów badanych w serii pierwszej.



Rys. 6.2. Histogramy błędów wyników algorytmu bazowego i zastosowanego dla punktów badanych w serii pierwszej.

Wynik porównania dla punktów badanych w pierwszej serii jest zbliżony do wyniku porównania dla punktów badanych we wszystkich seriach. Zarówno wskaźniki statystyczne jak i rozkład błęd są korzystniejsze dla zastosowanego przez nas algorytmu niż dla algorytmu bazowego.

Zbadane zostało również dla jakich punktów w przestrzeni zastosowany algorytm zwraca wyniki lepszej jakości niż algorytm bazowy, a dla jakich zwraca wyniki gorsze. Rezultaty badania dla serii pierwszej zostały zobrazowane na Rys. 6.3.



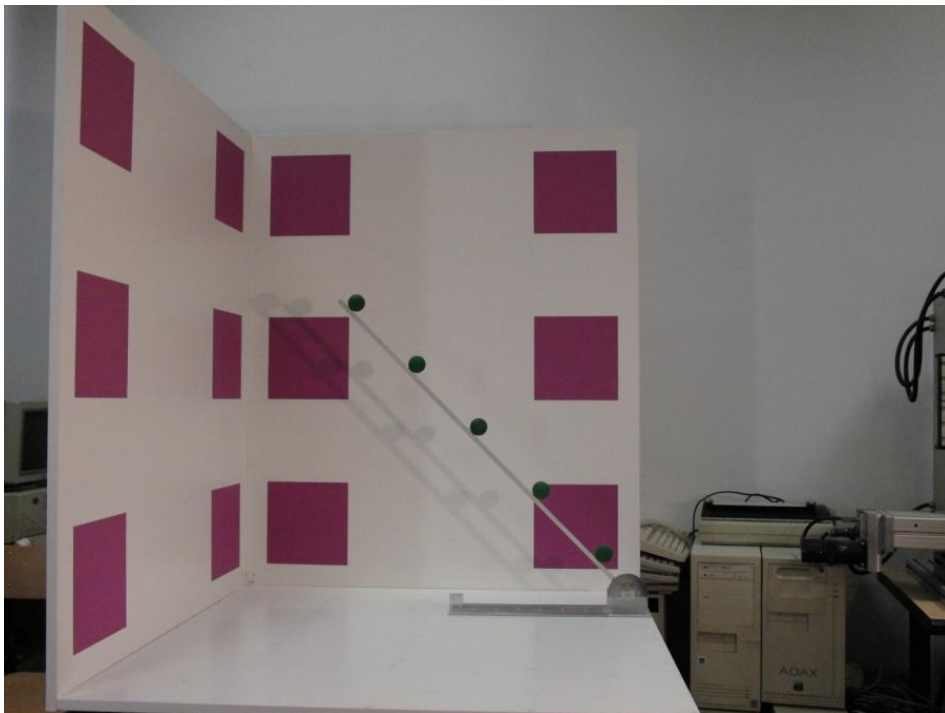
Rys. 6.3. a) Wykres przedstawiający punkty w przestrzeni dla których zastosowany algorytm zwraca wyniki lepszej jakości niż algorytm bazowy, oraz wyniki gorszej jakości. Wyróżnione zostały punkty dla których różnica błęd wyników obu algorytmów była większa niż 10 mm. b) Schemat przedstawiający ustawienie kamer względem wzorca w serii pierwszej.

Zgodnie z oczekiwaniem zastosowany algorytm zwraca wyniki lepszej jakości niż algorytm bazowy przede wszystkim dla punktów dla których występuje błąd algorytmu bazowego. Są to punkty, których rzuty na płaszczyzny lokalne znajdują się w pobliżu prostej przecięcia tych płaszczyzn. Zastosowany algorytm wykrywa te sytuacje i dobiera odpowiednie wagi przy obliczaniu punktu finalnego, przez co wynik obarczony jest mniejszym błędem.

Wyróżnić można również punkty dla których zastosowany algorytm zwraca wyniki gorszej jakości niż algorytm bazowy. Obszar ich występowania jest zbliżony do punktów opisanych wcześniej ponieważ są to punkty których rzuty znajdują się blisko prostej przecięcia płaszczyzn ale dla których błąd algorytmu bazowego nie wystąpił. W sytuacji takiej wynik algorytmu bazowego jest obarczony małym błędem. Zastosowany algorytm wykrywając możliwość zaistnienia błędu dobrał wagi mające niwelować jego wpływ przy obliczaniu punktu finalnego. W takim przypadku wynik końcowy obarczony jest niewielkim błędem, który może być jednak większy niż błąd algorytmu bazowego.

6.2 Analiza działania algorytmu dla przykładowej sytuacji wystąpienia błędu algorytmu bazowego.

Aby porównać w pełni działanie bazowego algorytmu stereowizyjnego oraz algorytmu z zaproponowaną przez nas metodą jego korekcji prześledzone zostanie działanie algorytmu dla jednej z sytuacji, przy której błąd algorytmu bazowego wystąpił. Wykorzystane zostaną zdjęcia z serii piątej: S5_D1_KL_07.JPG (Rys 6.4) oraz S5_D1_KP_07.JPG (Rys 6.5). Obiektem na podstawie którego analizowane będzie działanie algorytmu będzie obiekt widoczny na zdjęciach jako drugi od dołu. Kalibracja układu odbędzie się z użyciem wzorca pierwszego.



Rys. 6.4. Zdjęcie 1



Rys. 6.5. Zdjęcie 2

Wynik detekcji obiektu na zdjęciach:

zdjęcie 1	zdjęcie 2
[1440.3 ; 1596.3]	[1550.4 ; 1881.6]

Odwzorowania punktów na płaszczyzny:

zdjęcie 1	zdjęcie 2
XZ [-113479.3 ; -9796]	[2.6 ; 174.6]
YZ [751.7 ; 250]	[-4.3 ; 175.5]
UW [1064.3 ; 257.7]	[893.7 ; 254.4]

Odwzorowania punktów względem globalnego układu współrzędnych:

zdjęcie 1	zdjęcie 2
XZ [-113479.3 ; 0 ; -9796]	[2.6 ; 0 ; 174.6]
YZ [0 ; 751.7 ; 250]	[0 ; -4.3 ; 175.5]
UW [87.4 ; 752.6 ; 257.7]	[208 ; 632 ; 254.4]

Dalsza analiza przeprowadzona oddzielnie dla każdej pary płaszczyzn lokalnych.

Działanie algorytmu dla pary płaszczyzn lokalnych XZ i YZ.

Odległość między punktami definiującymi proste (precyzja określenia prostych):

prosta 1	113935.5
prosta 2	5.1

Odległość między prostymi

263.6

Położenie punktu wyznaczone przez algorytm (przybliżenie punktu przecięcia prostych):

[411.2 ; 721.9 ; 158.4]

Rzeczywiste położenie punktu w przestrzeni:

[250 ; 755.5 ; 272.8]

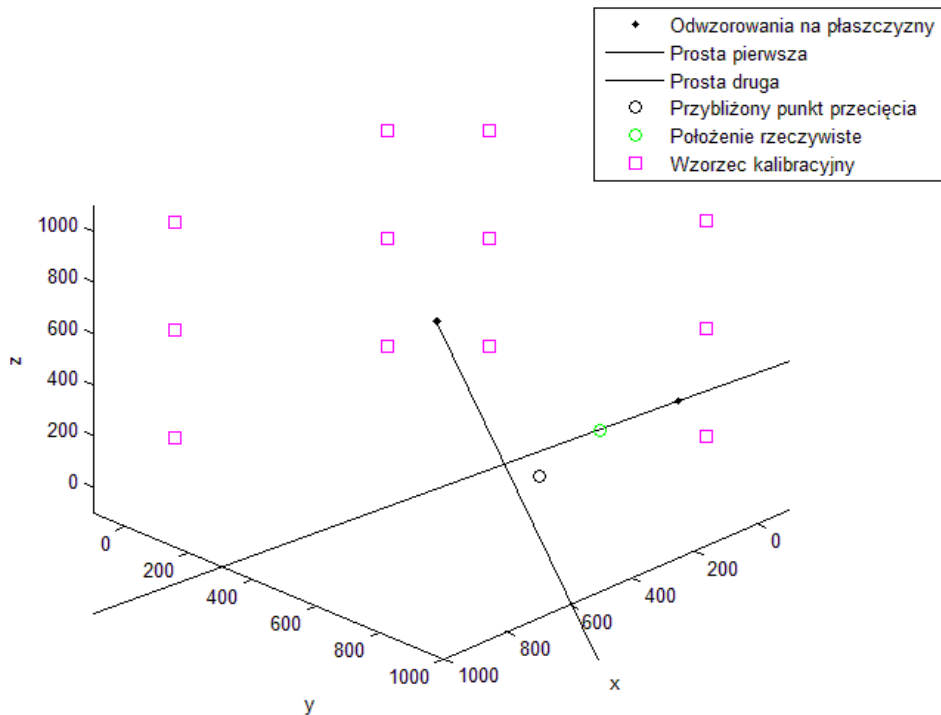
Różnica między położeniem rzeczywistym i określonym przez algorytm:

[-161.1 ; 34.6 ; 114.4]

Odległość między punktem rzeczywistym i określonym przez algorytm:

200.6

Wykres obrazujący działanie algorytmu dla pary płaszczyzn lokalnych XZ i YZ przedstawia Rys. 6.6. Rzuty punktu badanego na płaszczyzny lokalne wykonane na podstawie zdjęcia z aparatu znajdującego się po prawej stronie (Rys. 6.5) znajdują się w pobliżu prostej przecięcia płaszczyzn lokalnych. Są one położone na tyle blisko siebie że zlewają się na przedstawionym wykresie. Rzut punktu badanego na płaszczyznę lokalną XZ wykonany na podstawie zdjęcia z aparatu znajdującego się po lewej stronie (Rys. 6.4) wykracza daleko poza obszar prezentowany na wykresie.



Rys. 6.6. Działanie algorytmu dla pary płaszczyzn XZ i YZ.

Działanie algorytmu dla pary płaszczyzn lokalnych XZ i UW.

Odległość między punktami definiującymi proste (precyzja określenia prostych):

prosta 1 114013.3

prosta 2 669.2

Odległość między prostymi

2

Położenie punktu wyznaczone przez algorytm (przybliżenie punktu przecięcia prostych):

[247.4 ; 753.5 ; 272.8]

Rzeczywiste położenie punktu w przestrzeni:

[250 ; 755.5 ; 272.8]

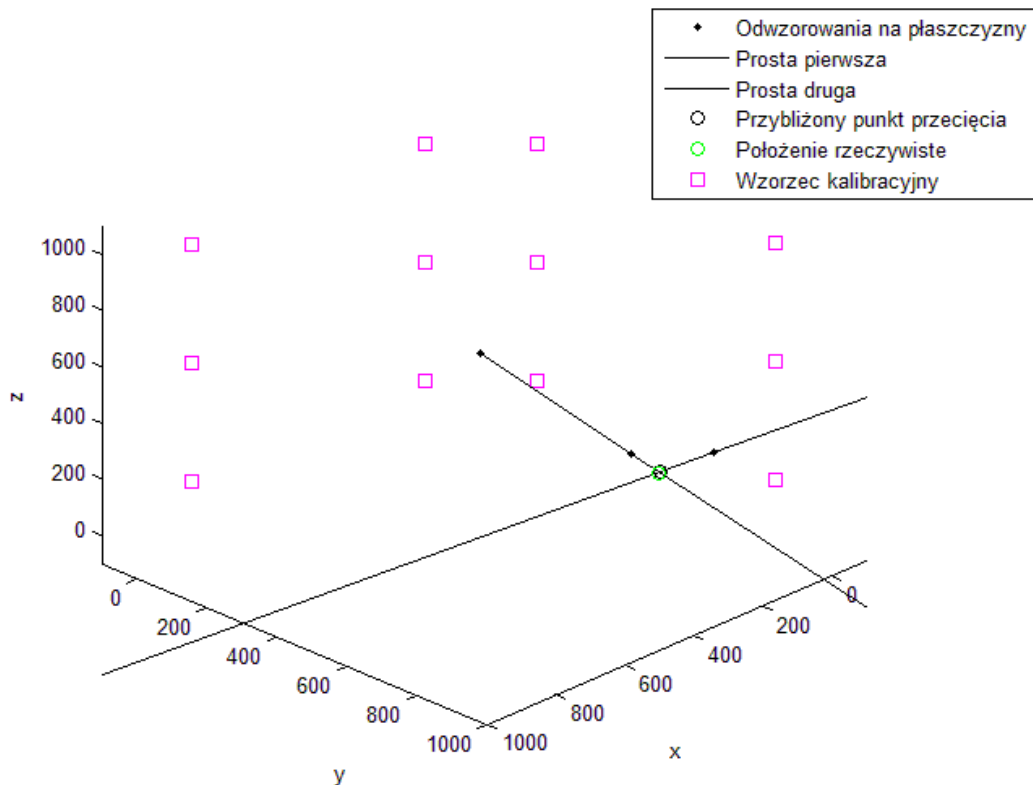
Różnica między położeniem rzeczywistym i określonym przez algorytm:

[2.6 ; 2 ; 0]

Odległość między punktem rzeczywistym i określonym przez algorytm:

3.3

Wykres obrazujący działanie algorytmu dla pary płaszczyzn lokalnych XZ i UW przedstawia Rys. 6.7. Podobnie jak na Rys. 6.6 rzut punktu badanego na płaszczyznę lokalną XZ wykonany na podstawie zdjęcia z aparatu znajdującego się po lewej stronie (Rys. 6.4) wykracza daleko poza obszar prezentowany na wykresie.



Rys. 6.7. Działanie algorytmu dla pary płaszczyzn XZ i UW.

Działanie algorytmu dla pary płaszczyzn lokalnych YZ i UW.

Odległość między punktami definiującymi proste (precyzja określenia prostych):

prosta 1 87.8

prosta 2 674.1

Odległość między prostymi :

2.1

Położenie punktu wyznaczone przez algorytm (przybliżenie punktu przecięcia prostych):

[247.7 ; 753.9 ; 272.8]

Rzeczywiste położenie punktu w przestrzeni:

[250 ; 755.5 ; 272.8]

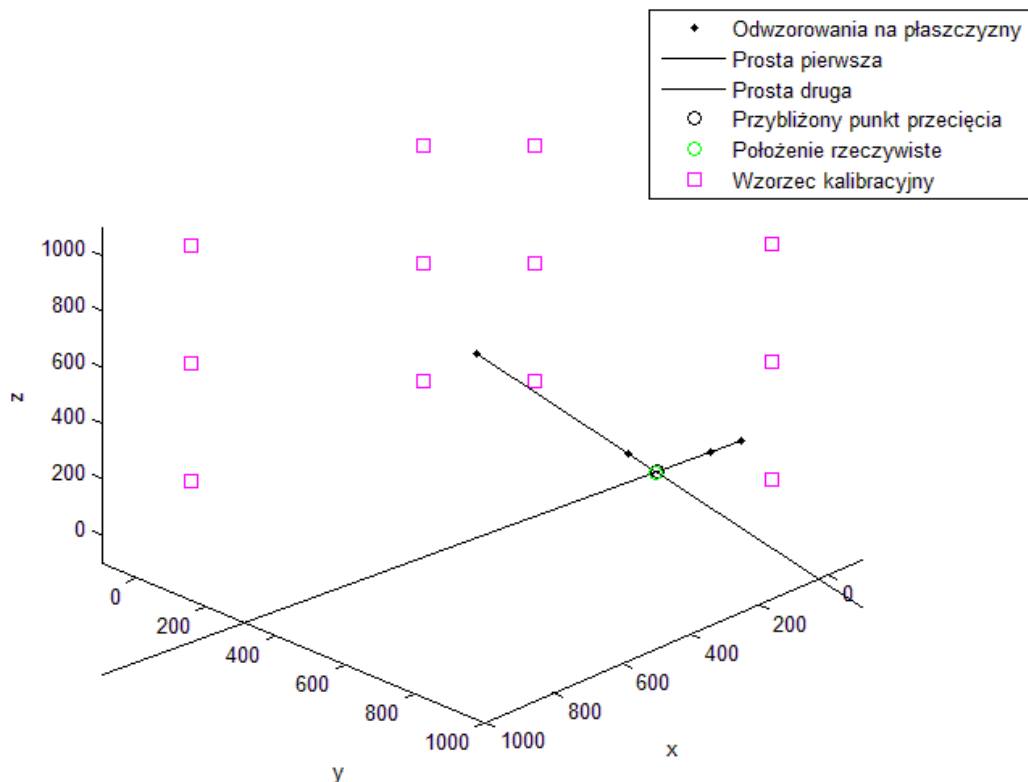
Różnica między położeniem rzeczywistym i określonym przez algorytm:

[2.3 ; 1.6 ; 0.1]

Odległość między punktem rzeczywistym i określonym przez algorytm:

2.7

Wykres obrazujący działanie algorytmu dla pary płaszczyzn lokalnych YZ i UW przedstawia Rys. 6.8.



Rys. 6.8. Działanie algorytmu dla pary płaszczyzn YZ i UW.

Obliczanie punktu finalnego

Wagi odpowiadające punktom wyznaczonym w oparciu o pary płaszczyzn:

płaszczyzny XZ i YZ	2.3
płaszczyzny XZ i UW	25.9
płaszczyzny YZ i UW	9.4

Obliczony punkt finalny:

[257.4 ; 751.7 ; 265.9]

Rzeczywiste położenie punktu w przestrzeni:

[250 ; 755.5 ; 272.8]

Różnica między położeniem rzeczywistym i określonym przez algorytm:

[-7.4 ; 3.9 ; 6.9]

Odległość między punktem rzeczywistym i określonym przez algorytm

10.8

W omówionym przykładzie można wyraźnie zaobserwować wystąpienie błędu algorytmu bazowego. Powód tego jest widoczny na zdjęciu 2 (Rys. 6.5.). Obiekt badany znajduje się na zdjęciu niemal dokładnie na linii przecięcia podstawowych płaszczyzn lokalnych. Odległość między odwzorowaniami punktu reprezentującego obiekt na płaszczyzny podstawowe jest niewielka (5.1 [mm]) a przez to definiują one prostą (prosta 2) z niską dokładnością. Mimo iż prosta 1 wyznaczana na podstawie zdjęcia 1 określona jest z dużą dokładnością, jakość wyznaczenia punktu przecięcia prostych jest niska. Jest ona bowiem determinowana przez prostą obarczoną większym błędem. Warto zwrócić uwagę na odległość prostych w przestrzeni, która wynosi ponad 260 [mm]. W takim przypadku mamy do czynienia z bardzo dużym przybliżeniem punktu przecięcia prostych. Nie dziwi więc fakt iż położenie obiektu wyznaczone przez algorytm bazowy jako przybliżenie punktu przecięcia prostych, różni się od położenia rzeczywistego o ponad 200 [mm].

Wykorzystanie płaszczyzny pomocniczej UW pozwoliło na uzyskanie odwzorowań definiujących proste z dużo większą dokładnością. Dokładniej wyznaczane są punkty ich przecięcia. Odległości między odpowiednimi prostymi w przestrzeni wynoszą 2 [mm] dla pary płaszczyzn XZ i UW oraz 2.1 [mm] dla pary płaszczyzn YZ i UW. Wyznaczone położenia obiektu różnią się od położenia rzeczywistego o 3.3 [mm] dla pary płaszczyzn XZ i UW oraz 2.7 [mm] dla pary płaszczyzn XZ i UW.

Punkt finalny obliczany został jako średnia ważona trzech wyznaczonych punktów zgodnie ze wzorem (4.13). Wagi odpowiadające punktom, odzwierciedlające szacowaną ich dokładność, obliczone zostały z pomocą wzoru (4.14). Zgodnie z oczekiwaniem punkt określony na podstawie płaszczyzn XZ i YZ ma znacznie niższą wagę (2.3) niż punkty uzyskane z wykorzystaniem płaszczyzny pomocniczej (25.9 oraz 9.4). Położenie obiektu określone przez algorytm jako punkt finalny różni się od położenia rzeczywistego o blisko 11 [mm].

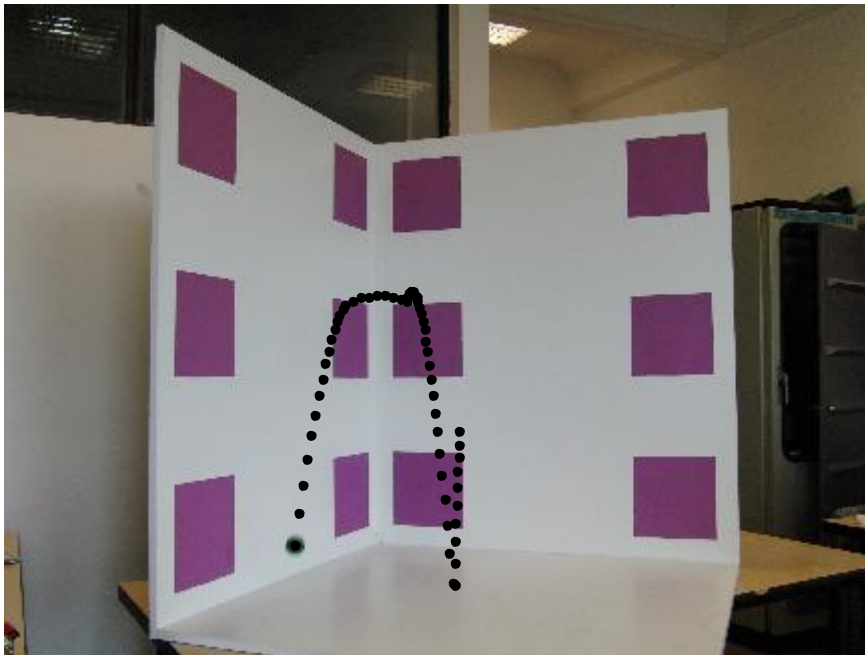
Uzyskany wynik jest interesujący ze względu na dwa aspekty. Z jednej strony umożliwia porównanie wyniku algorytmu bazowego z wynikiem algorytmu zmodyfikowanego i pozwala stwierdzić iż wynik algorytmu zmodyfikowanego obciążony jest blisko dziesiętnastokrotnie mniejszym błędem niż wynik algorytmu bazowego, co jest efektem zadowalającym. Z drugiej jednak strony bardzo duży udział w błędzie punktu finalnego ma błąd punktu pierwszego. Jego odległość od punktu rzeczywistego jest na tyle duża iż mimo niskiej odpowiadającej mu wagi, mocno wpływa na wynik. Nasuwa się myśl nad inną metodą dobierania wag. Warto jednak wziąć pod uwagę że rozpatrywany jest pojedynczy przypadek, natomiast metoda korekcji algorytmu bazowego i obliczania współczynników dobierana była na podstawie wielu testów i serii zdjęć.

6.3 Porównanie algorytmów – podsumowanie.

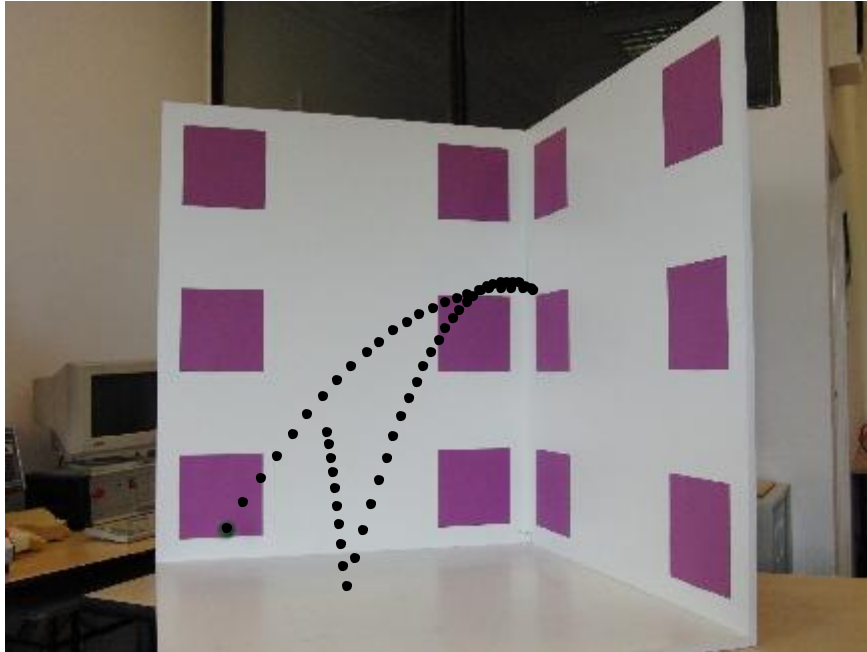
Wyniki porównania wskazują iż zastosowany przez nas algorytm pozwala uzyskiwać wyniki z większą dokładnością niż algorytm bazowy. Różnica w dokładności uzyskiwanych wyników przy zastosowaniu obu algorytmów jest szczególnie wyraźna dla sytuacji w których występuje duży błąd algorytmu bazowego. Na przykładzie konkretnego przypadku dowiedzione zostało jednoznacznie iż wykryty i opisany w rozdziale 4.1.3 błąd działania algorytmu bazowego występuje w rzeczywistej implementacji. Sprawdzone zostało również działanie zaproponowanej przez nas i opisanej w rozdziale 4.1.4 metody korekcji błędów. Przeprowadzona analiza wyników ogólnych oraz analiza konkretnej sytuacji wskazuje iż metoda działa poprawnie.

7 Podsumowanie.

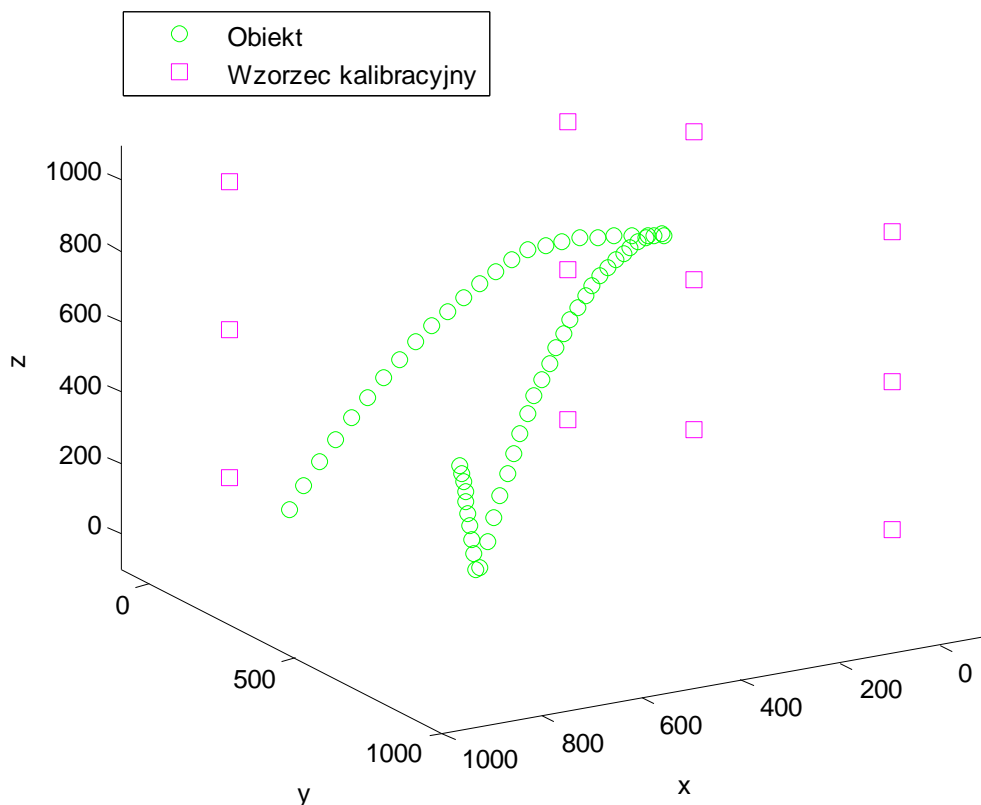
W ramach pracy opracowaliśmy i zaimplementowaliśmy metodę rekonstrukcji współrzędnych 3D na podstawie stereopary. Na rysunkach od 7.1 do 7.9 przedstawione zostało przykładowe działanie algorytmu. Rysunki przedstawiają położenie obiektu w kolejnych interwałach czasu (około 1,67 ms) w widoku lewej i prawej kamery, oraz trójwymiarowy wykres trajektorii odtworzonej przez algorytm. Jako obiekt testowy wykorzystana została piłeczka pingpongowa, dla której przeprowadzono trzy eksperymenty, oznaczone jako A, B i C. Średnia prędkość obiektu w eksperymencie A, obliczona na podstawie trajektorii wynosi 2,55m/s. Oprócz tego przeprowadzone zostały dokładne testy, na które składa się 560 zdjęć prezentujących 810 punktów pomiarowych, które umożliwiły wyznaczenie dokładności metody. Przetestowane zostały różne wzorce oraz układy kamer. Najlepszą uzyskaną dokładność systemu prezentują tabela 7.1 i histogram Rys. 7.10. Błąd maksymalny nie przekracza 12.25mm, a błąd średni wynosi 4.6mm. Podczas pracy wykryliśmy problem w oryginalnej metodzie, uniemożliwiający wyznaczenie współrzędnych punktów, jeżeli rzut punktu leży na przecięciu płaszczyzn definiowanych przez wzorce. Zaproponowaliśmy skuteczne rozwiązanie tego problemu w postaci wprowadzenia dodatkowej trzeciej płaszczyzny i korzystaniu z trzech par płaszczyzn z odpowiednimi wagami.



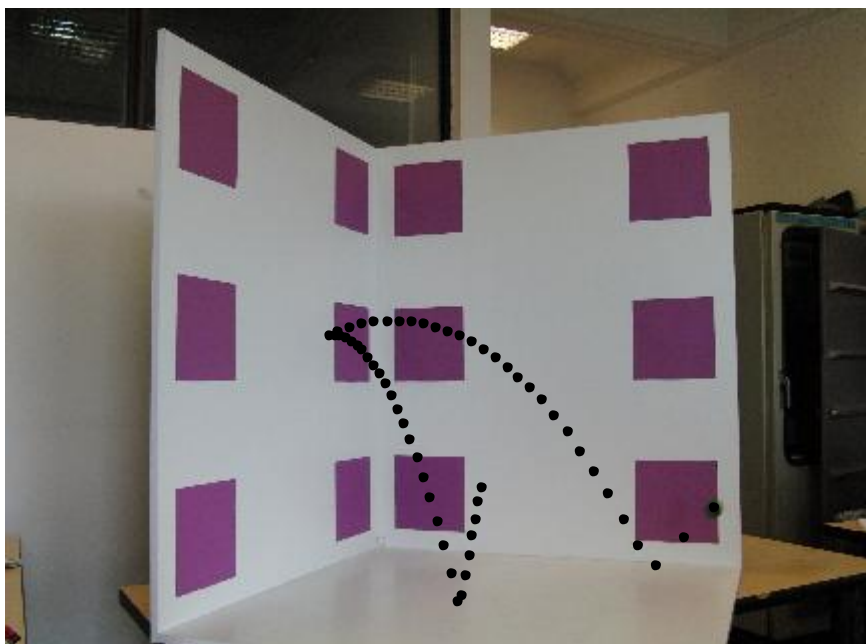
Rys. 7.1. Przykładowa trajektoria (A), widok z lewej kamery, na rysunek zostały naniesione środki obiektu wykryte przez algorytm na poszczególnych obrazach.



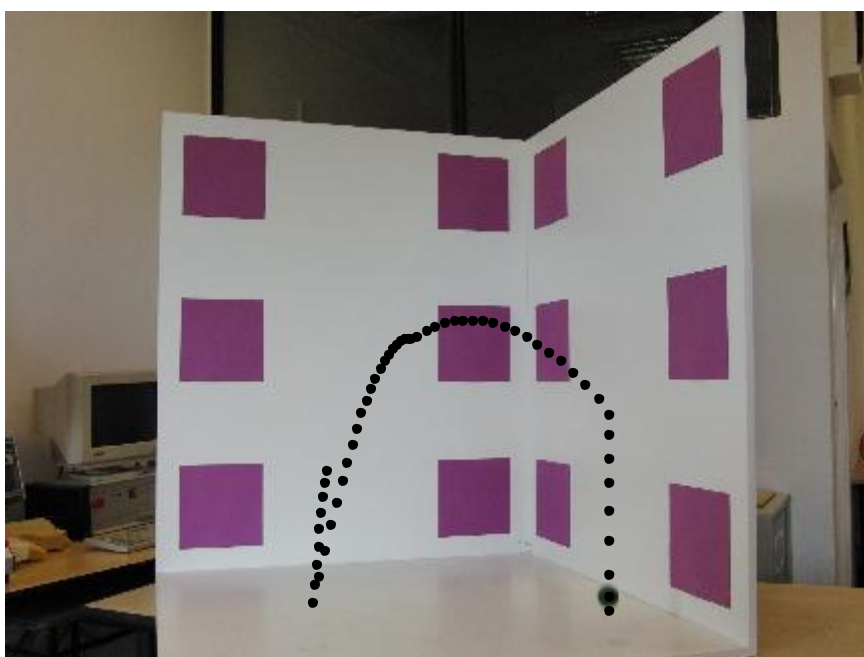
Rys. 7.2. Przykładowa trajektoria (A), widok z prawej kamery, na rysunek zostały naniesione środki obiektu wykryte przez algorytm na poszczególnych obrazach.



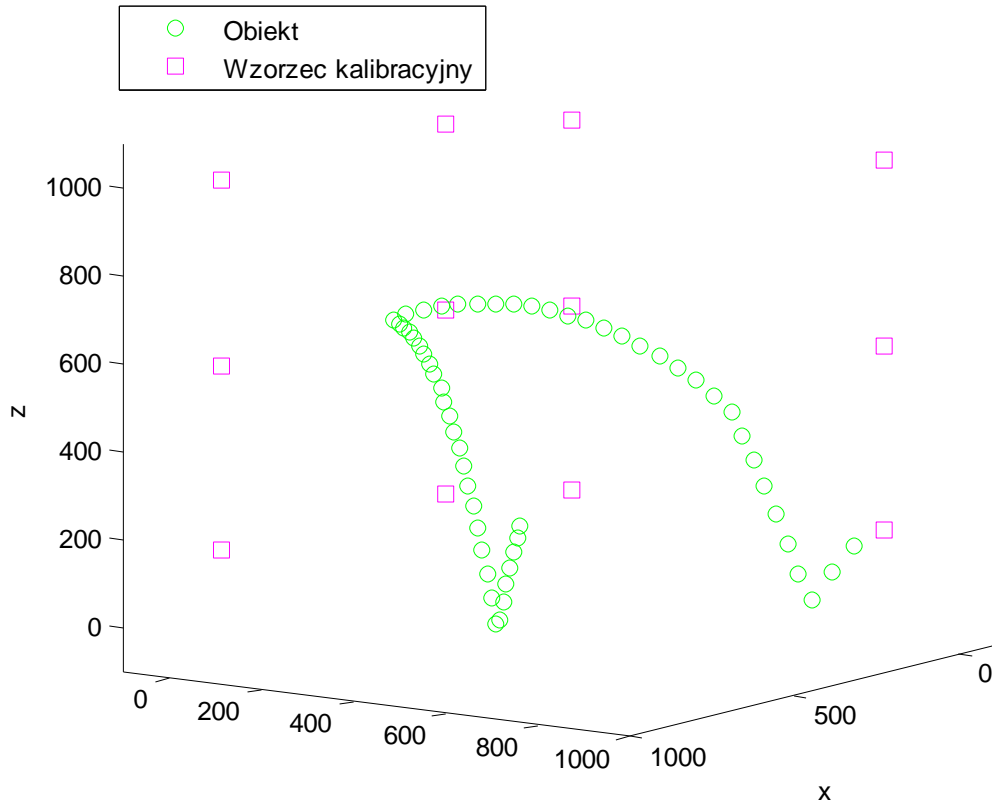
Rys. 7.3. Przykładowa trajektoria (A), wykres trajektorii odtworzonej przez algorytm



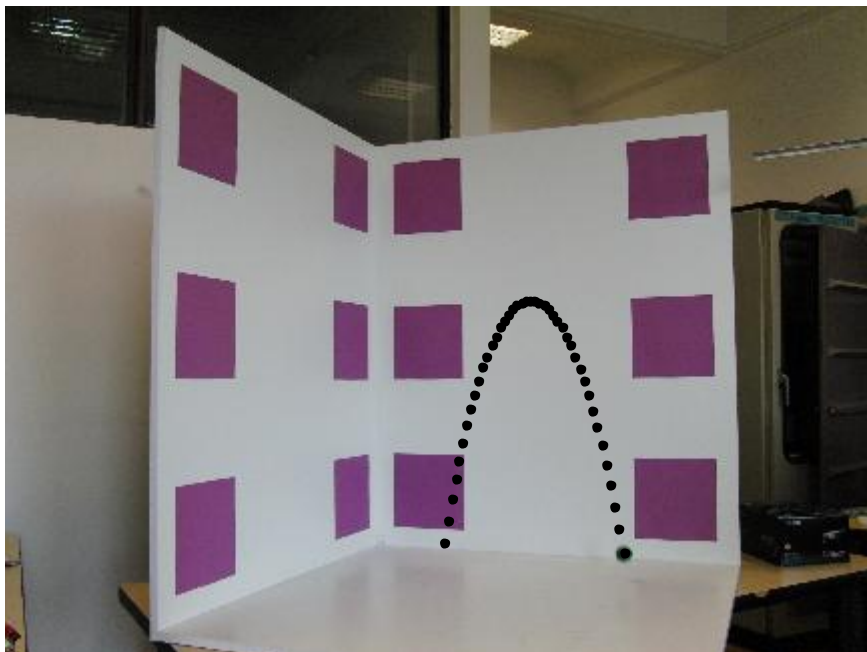
Rys. 7.4. Przykładowa trajektoria (B), widok z lewej kamery, na rysunek zostały naniesione środki obiektu wykryte przez algorytm na poszczególnych obrazach.



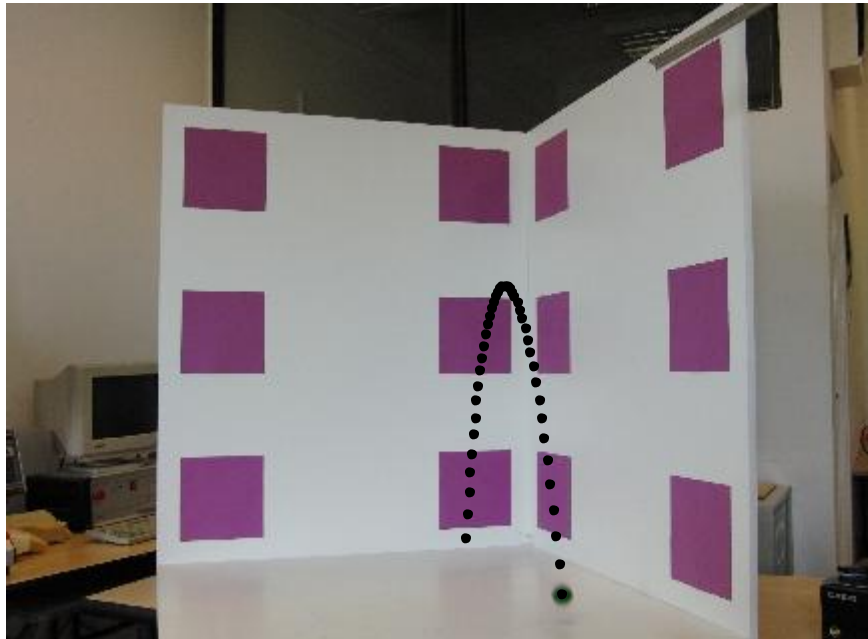
Rys. 7.5. Przykładowa trajektoria (B), widok z prawej kamery, na rysunek zostały naniesione środki obiektu wykryte przez algorytm na poszczególnych obrazach.



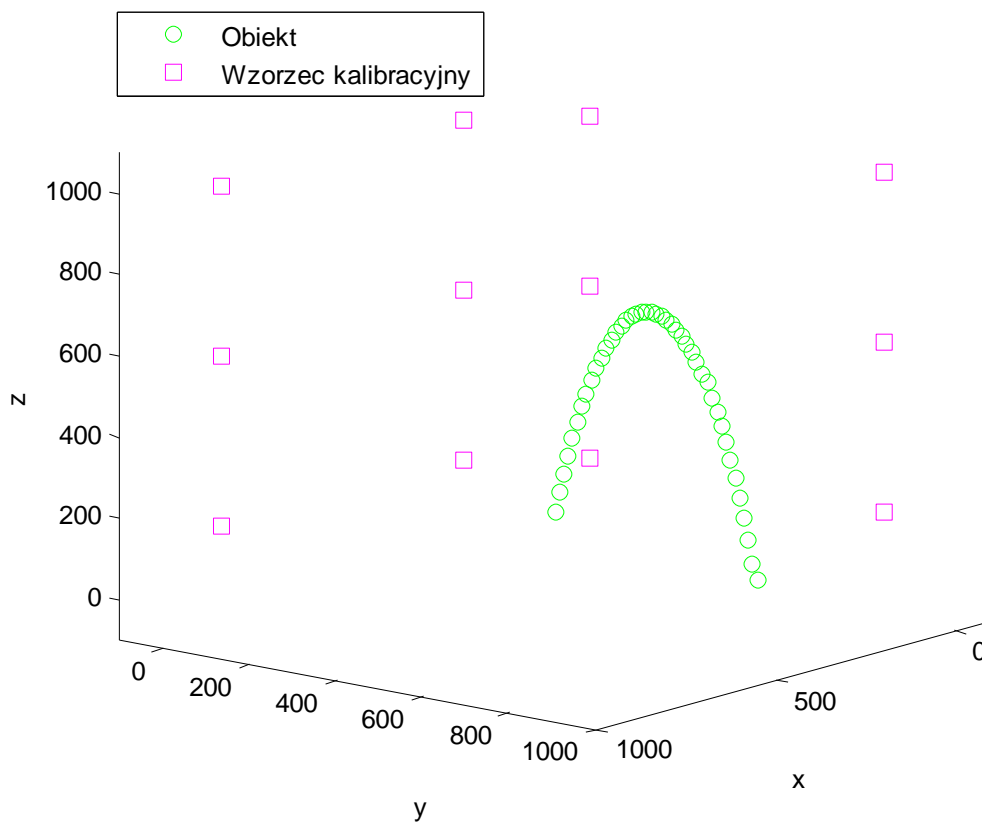
Rys. 7.6. Przykładowa trajektoria (B), wykres trajektorii odtworzonej przez algorytm.



Rys. 7.7. Przykładowa trajektoria (C), widok z lewej kamery, na rysunek zostały naniesione środki obiektu wykryte przez algorytm na poszczególnych obrazach.



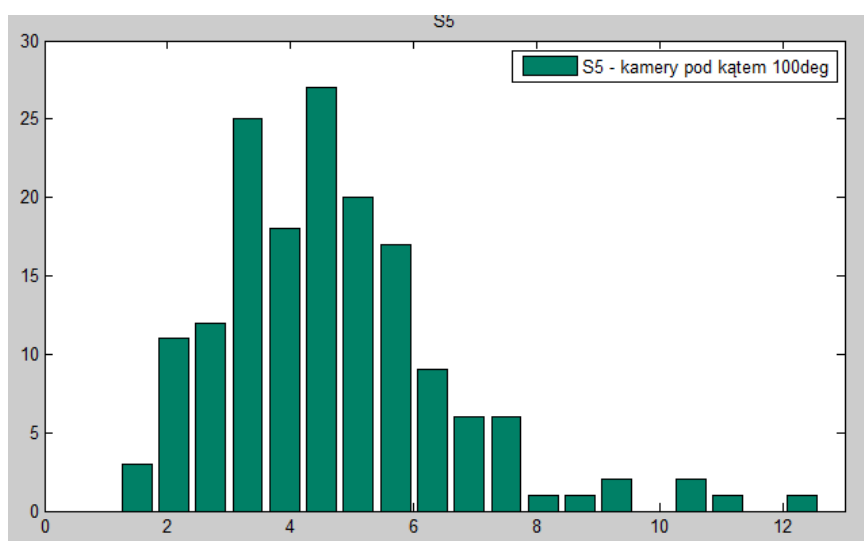
Rys. 7.8. Przykładowa trajektoria (C), widok z prawej kamery, na rysunek zostały naniesione środki obiektu wykryte przez algorytm na poszczególnych obrazach.



Rys. 7.9. Przykładowa trajektoria (C), wykres trajektorii odtworzonej przez algorytm.

Błąd	S5
Maksimum [mm]	12.2
Średnia arytmetyczna [mm]	4.6
Średnia kwadratowa [mm]	5.0
Mediana [mm]	4.4

Tab. 7.1. Zestawienie danych statystycznych dla testu układu kamer S5.



Rys. 7.10. Histogram przedstawiający rozkład błędów dla układu S5.

W ramach kontynuowania projektu można zaproponować dalsze zwiększanie dokładności pomiarów. Można spróbować wykonać inny wzorzec kalibracyjny, umożliwiający rozstawienie aparatów w taki sposób, aby osie optyczne przecinały się pod kątem 90° . Zwiększenie dokładności można również próbować osiągnąć poprzez użycie dwóch wzorców kalibracyjnych, z czego drugi służyłby analogicznie do płaszczyzny pomocniczej, do niwelowania błędów metody. System można też poszerzyć o dodatkową kamerę i zbadać dokładność tak zmodyfikowanego systemu. Oprócz zwiększania dokładności algorytm można rozwinąć tak, aby pracował na zarejestrowanych przebiegach, a po optymalizacji, można spróbować zaimplementować wersję działającą w czasie rzeczywistym.

8 Literatura

- [1]. Cyganek B.: „Komputerowe przetwarzanie obrazów trójwymiarowych”. Akademska Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2002.
- [2]. Ernst K., Kołodziejczyk J.: „Fizyka ping-ponga”, Materiały XXXVI Zjazdu Fizyków Polskich, Toruń, 2001.
- [3]. Fuksa S., Byrski W.: „Czteropunktowa metoda identyfikacji transformacji stereowizyjnej”, Automatyka / Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, 2005, T. 9, z. 3, s. 533—541.
- [4]. Gonzalez R. C., Woods R. E., Eddins S. L.: “Digital image processing using MATLAB”. Upper Saddle River, NJ : Pearson : Prentice-Hall, 2004.
- [5]. Mrozek B., Mrozek Z.: „MATLAB i Simulink : poradnik użytkownika : najbardziej efektywne narzędzie do rozwiązywania złożonych problemów matematycznych i ekonomicznych”. Helion, Gliwice 2004.
- [6]. Rotter P.: „Transformacje kinematyczne i wizyjne w robotyce” – wykłady.
- [7]. Sękowska M.: „Algebra wyższa” – wykłady.
- [8]. <http://pl.exilim.eu/pl/exilimhighspeed/exf1>.
- [9]. CASIO Digital Camera EX-F1 User's Guide.

Spis załączników:

Załącznik A - Specyfikacja techniczna aparatu Exilim EX-F1;

Załącznik B – Spis stworzonych programów w postaci m-plików;

Załącznik C – Płyta CD z elektroniczną wersją pracy, stworzonymi programami oraz wykonanymi zdjęciami testowymi;

Załącznik A - Specyfikacja techniczna aparatu Exilim EX-F1

(źródło: strona internetowa producenta).

EXILIM EX-F1

Dane Techniczne

Liczba Efektywnych Pikseli		6.00 milionów
Przetwornik Obrazu		Układ 1/1,8 cala high-speed CMOS (całkowita liczba pikseli 6,6 megapiksela)
Format Plików	Zdjęcia	RAW (DNG ^{*1}), JPEG (Exif Version 2.2), DCF 1.0 standard, zgodny z DPOF.
	Filmy	Format MOV, H.264/AVC, IMA-ADPCM (stereo)
Wbudowana pamięć Flash		Wedle specyfikacji
Nośniki		Karty pamięci SDHC Memory Card / SD Memory Card / MultiMediaCard / MultiMediaCardplus
Liczba rejestrowanych pikseli	Zdjęcia	RAW, 2816 x 2112, 2816 x 1872 (3:2), 2816 x 1586 (16:9), 2304 x 1728, 2048 x 1536, 1600 x 1200, 640 x 480
	Filmy STD	640 × 480 (30 klatek na sekundę)
	Filmy HD ^{*7}	1920 × 1080 (FHD HQ/FHD Normal, 60 klatek na sekundę), 1280 × 720 (HD LP, 30 kl/s)
	Filmy Hi-Speed	512 × 384 (300 kl/s), 432 × 192 (600 kl/s), 336 × 96 (1200 kl/s)
Pojemność Nagrywania (przy maksymalnej wielkości obrazu)		Wedle specyfikacji
Prędkość Działania		Wedle specyfikacji
	Tryb zdjęć seryjnych High-speed	Maksymalnie 60 klatek na sekundę
	Tryb zdjęć seryjnych z fleszem	Maksymalnie 7 klatek na sekundę

Obiektyw	Budowa	12 soczewek w dziewięciu grupach. W tym soczewka asferyczna
	Wartość F	Od F2.7 (W) do 4.6 (T)
	Ogniskowa	Od $f=7.3$ do 87.6mm Okolo 36 do 432 mm w standardzie filmu 35 mm
Zoom	Zoom optyczny	12X
	Zoom cyfrowy	4X (48X w połączeniu z zoomem optycznym)
Fokus	Rodzaj	Autofokus z detekcja kontrastu
	Tryby	Autofokus, Makro, Nieskończoność, Manualny
	Obszar Autofokusa	Punktowy, Dowolny, Auto Namierzanie
	Lampka wspomagająca AF	W standardzie
Zasięg ustawiania ostrości	Auto Focus	Od 40cm ^{*2} do ∞ (W)
	Makro	Od 5cm ^{*2} do 50cm (W)
	Nieskończoność	∞ (W)
	Manualny	Od 5cm ^{*2} do ∞ (W)
Ekspozycja	Pomiar	Wielopolowy, wyważony w środku
	Sterowanie	Automatyka programowana, Pierwszeństwo Ustawień Przysłony AE, Pierwszeństwo Prędkości Migawki AE, Manualna Ekspozycja
	Korekcja	-2EV to +2EV (w krokach, co 1/3 EV)
Rodzaj migawki		Migawka Elektroniczna CMOS, migawka mechaniczna
Czasy otwarcia migawki ^{*3}	Auto	Od 1 do 1/2000 sekundy
	Pierwszeństwo Przysłony AE	Od 1 do 1/2000 sekundy
	Pierwszeństwo Prędkości Migawki AE	Od 60 do 1/40000 sekundy
	Manualna Ekspozycja	Od 60 do 1/40000 sekundy
Przysłona ^{*4}	Pierwszeństwo przysłony AE	Od F2.7 (W) do F15 ^{*5} (W), auto przełączanie

	Manualna Ekspozycja	Od F2.7 (W) do F7.5 (W)
Balans bieli		Tryb Auto, Światło Dienne, zachmurzenie, Cień, Dzienny Fluorescencyjny Biały, Dzienny Fluorescencyjny, Tungsten, Manualne Ustawienie balansu bieli.
Czułość (SOS/REI) *6	Zdjęcia	Auto, ISO100, ISO200, ISO400, ISO800, ISO1600
	Filmy	Auto (Tryb High-Speed, gdy ustawiany jest ręcznie tryb naświetlania: ISO100, ISO200, ISO400, ISO800, ISO1600)
Inne funkcje nagrywania	Nagrywanie wsteczne zdjęć	Maksymalna prędkość: 60 klatek na sekundę, Maksymalna pojemność: 60 zdjęć
	Widok w trybie Slow Motion	2 sekundy o prędkości 30 klatek na sekundę
	Tryb Auto Przedziału	Przysłona, balans bieli, Fokus
	Funkcja BEST SHOT	W standardzie
	Tryb nagrywania dla serwisu YouTube™	W standardzie
	Funkcja rozpoznawania twarzy	W standardzie
Samowyzwalacz		10 sekund, 2sekundy, potrójny samowyzwalacz
Wbudowana lampa błyskowa	Tryby	Auto, Lampa błyskowa wyłączona, Lampa błyskowa włączona, redukcja efektu czerwonych oczu, Lampa błyskowa zewnętrzna
	Zasięg	Od 0.5 do 10.4m (W), od 1.1 do 6.3m (T)
Wizjer	Monitor	LCD TFT 2,8 cala / 230,160 punktów (959 x 240)
	Elektroniczny Wizjer	0,2 cala, równy 201,600 punktom
Czas i data	Czas i data	Zachowywany wraz z danymi o zdjęciach
	Funkcja nanoszenia czasu i daty na zdjęcie	Kalendarz

	Auto-naptár	Do 2049
	Czas na Świecie	162 miast w 32 strefach czasowych, nazwa miasta, data, czas, czas letni
Wejścia We-Wy		USB (kompatybilny z USB Hi-Speed) / złącze AV (NTSC / PAL), wyjście HDMI™ (Mini)*, złącze do podłączenia zewnętrznej lampy błyskowej, wejście stereo na mikrofon, wejście zasilacza (DC-IN)
Mikrofon		stereo
Głośnik		mono
Zasilanie		Akumulator litowy (NP-100) x 1, Zasilacz AC
Żywotność baterii		Wedle specyfikacji
Wymiary (wylączając rzuty)		127.7 (szerokość) x 79.6 (wysokość) x 130.1 (głębokość)mm
Waga (bez baterii i akcesoriów)		Od 671 g
Dołączone akcesoria		Akumulator Litowy (NP-100), Ładowarka, Kabel zasilający, Kabel USB, Dostosowany kabel AV, Pasek, Osłona na obiektyw, Kołnierza obiektyw, Zdalnie sterowana migawka, CD-ROM

*1. Format DNG jest jednym z formatów RAW i jest zalecany przez Adobe Systems jako standardowy plik obrazów

*2. Na zasięg ma wpływ zoom optyczny

*3. Prędkość migawki może się różnić w zależności od wybranego motywu BEST SHOT

*4. Użycie zoomu optycznego powoduje zmianę przesłony.

*5. Wartość przysłony wynosi F15, gdy używany jest filtr ND.

*6. SOS: Standard Output Sensitivity. REI: Recommended Exposure Index.

*7. Maksymalna długość filmu wynosi 29 minut

EXILIM jest zarejestrowanym znakiem towarowym CASIO COMPUTER CO., LTD.

Wszelkie pozostałe nazwy firm lub produktów są zarejestrowanymi znakami towarowymi lub znakami towarowymi tych firm.

Załącznik B - Spis stworzonych programów w postaci m-plików

main.m	- program główny, algorytm stereowizyjny;
f_p_search.m	- program do wyszukiwania obiektów na obrazach;
f_p_search_lt.m	- program do wyszukiwania pól wzorca pierwszego na obrazach;
f_p_search_st.m	- program do wyszukiwania pól wzorca drugiego na obrazach;
f_p_sort.m	- program do sortowania punktów wzorcowych;
f_make_pttransform.m	- program do identyfikacji transformacji płaskich;
f_pttransform.m	- program do wyznaczania odwzorowań, transformacja płaska;
f_l_intersection.m	- program do obliczania przybliżenia punktu przecięcia prostych.

**Załącznik C – Płyta DVD z elektroniczną wersją pracy,
stworzonymi programami oraz wykonanymi zdjęciami
testowymi**