

Politechnika Wrocławskas

Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów

Kierunek: **Automatyka i Robotyka**
Specjalność: **Robotyka**

PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

**Integracja i wizualizacja pomiarów otrzymywanych z czujników
wizyjnych, termowizyjnych i matrycowych czujników odległości**

Anton Labada

Promotor pracy:
dr inż. Bogdan Kreczmer
Katedra Cybernetyki i Robotyki

Słowa kluczowe: Wizualizacja danych pomiarowych, czujniki ToF, czujniki termowizyjne,
aplikacja zarządzająca, analiza danych

Spis treści

1 Wstęp	3
2 Cel i założenia	5
3 Opis czujników	7
3.1 Czujnik termowizyjny AMG8833	7
3.2 Czujnik termowizyjny MLX90640	8
3.3 Czujnik odległościowy matrycowy VL53L5CX	9
3.4 Camera	10
4 Analiza problemu	11
5 Projekt rozbudowy stanowiska wielosensorycznego	13
5.1 Układ komponentów stanowiska wielosensorycznego	13
5.2 Komunikacja	14
5.3 Projekt aplikacji zarządzającej stanowiskiem pomiarowym	14
6 Realizacja wielosensorycznego stanowiska pomiarowego	17
6.1 Sprzętowa część stanowiska wielosensorycznego	17
6.2 Oprogramowanie stanowiska wielosensorycznego	18
7 Testy i eksperymenty	25
7.1 Cele i zadania pomiarowe	25
7.1.1 Zbadanie wzajemnych zakłóceń czujników ToF	25
7.1.2 Zbadanie wpływu rozdzielczości na wykrywanie krawędzi obiektu .	29
7.1.3 Zbadanie rozróżnialności dwóch obiektów	36
7.1.4 Zbadanie zmiany kąta ustawienia ścianki	49
7.1.5 Zbadanie wpływu odległości na wskazania czujników termowizyjnych i ToF	52
7.1.6 Zbadanie wpływu nachylenia nagrzewanej powierzchni na wskazania czujników termowizyjnych	62
8 Podsumowanie i wnioski	69
Bibliografia	69

Rozdział 1

Wstęp

Wraz z dynamicznym rozwojem technologii sensorycznych oraz systemów pomiarowych, pojawia się coraz większe zapotrzebowanie na integrację różnorodnych czujników w ramach jednego stanowiska badawczego. Umożliwia to uzyskiwanie kompleksowych danych, które pozwalają na szczegółową analizę oraz wizualizację wyników pomiarowych. Takie podejście ma kluczowe znaczenie w badaniach naukowych oraz zastosowaniach przemysłowych, gdzie precyzja i wszechstronność pomiarów odgrywają istotną rolę.

Przedmiotem niniejszej pracy jest rozbudowa i udoskonalenie istniejącego stanowiska pomiarowego poprzez integrację dodatkowych komponentów sprzętowych, takich jak kamera wizyjna, oraz znaczne rozszerzenie funkcjonalności aplikacji zarządzającej stanowiskiem. W szczególności, w pracy skupiono się na wykorzystaniu czujników termowizyjnych AMG8833 i MLX90640, czujników odległości VL53L5CX oraz kamery Microsoft LifeCam Studio. Głównym celem było opracowanie kompleksowego systemu umożliwiającego rejestrację, analizę i wizualizację danych w czasie rzeczywistym.

Ważnym aspektem pracy była także modyfikacja komunikacji pomiędzy stanowiskiem a komputerem oraz implementacja nowych funkcjonalności w oprogramowaniu. System pomiarowy został wyposażony w mechanizmy wizualizacji wyników, umożliwiające porównanie danych z różnych czujników, ich zapis na dysku oraz analizę błędów danych pomiarowych.

Praca dostarcza także analizę potencjalnych błędów związanych z wykorzystaniem czujników oraz wskazuje na dalsze kierunki rozwoju, takie jak optymalizacja kodu aplikacji w celu zwiększenia wydajności przetwarzania danych. Uzyskane rezultaty mogą stanowić podstawę dla dalszych badań oraz wdrożeń w zakresie wielosensorycznych systemów pomiarowych.

Rozdział 2

Cel i założenia

Odczyty z czujników niskiej rozdzielczości, takich jak czujniki termowizyjne, czy też matrycowe czujniki odległości, są trudne do interpretacji. Nie pozwala to na wyrobienie właściwych intuicji co ich funkcjonowania. Istotnie też utrudnia zbadanie ich charakterystyk.

Celem niniejszej pracy jest rozbudowa stanowiska pomiarowego pozwalającego otrzymać dane z czujników termowizyjnych AMG8833 i MLX90640 oraz czujników odległości VL53L5CX. Stanowisko to powstało w ramach dyplomowej pracy inżynierskiej [2]. Rozbudowa stanowiska polega na dołączeniu i odpowiednim zintegrowaniu prostego systemu wizyjnego. Należy też przebudować i rozbudować wcześniejsze oprogramowanie. Powinno ono umożliwiać wszechstronną wizualizację danych pomiarowych zarówno w połączeniu z obrazem wizyjnym sceny, jak też bez niego. Powinno też pozwalać na realizację pojedynczych pomiarów, tworzenie na ich podstawie wykresów oraz składowanie wspomnianych danych w pliku. Realizacja pomiarów powinna być możliwa na żądanie użytkownika lub periodycznie o zadany okresie na ustalonym horyzoncie czasowym. Powinno być też możliwe arbitralne zadanie momentów czasu, w których wykonane będą odpowiednie pomiary. Realizacja pomiarów powinna łączyć się z możliwością zapisu obrazu. Zakłada się również, że oprogramowanie będzie pozwalało wzajemnie porównać otrzymane dane pomiarowe z różnych czujników.

Jako rozszerzenie przewidywane jest także dodanie do stanowiska obsługi czujnika VL53L8CH oraz czujnika temperatury.

Rozdział 3

Opis czujników

W tym rozdziale opisuje się zestaw czujników i urządzeń, wykorzystanych do realizacji zadania.

3.1 Czujnik termowizyjny AMG8833

Ten czujnik termiczny od firmy Panasonic to matryca 8×8 sensorów IR, umożliwiająca precyzyjny pomiar temperatury w czasie rzeczywistym. Po podłączeniu do mikrokontrolera lub Raspberry Pi, czujnik generuje tablicę zawierającą 64 indywidualne odczyty temperatury na podczerwień, przesyłane za pomocą interfejsu I2C. Urządzenie funkcjonuje na zasadzie detekcji promieniowania cieplnego, podobnie jak zaawansowane kamery termowizyjne, lecz w kompaktowej formie, ułatwiającej integrację z różnorodnymi systemami elektronicznymi. Zakres pomiarowy czujnika wynosi od 0°C do 80°C (32°F do 176°F), a jego dokładność to $\pm 2,5^\circ\text{C}$ ($4,5^\circ\text{F}$), co czyni go odpowiednim do zastosowań wymagających precyzyjnego monitorowania zmian temperatury. Czujnik jest w stanie wykryć obecność człowieka na odległość do 7 metrów, co sprawia, że doskonale nadaje się do implementacji w systemach detekcji obecności. Maksymalna częstotliwość odświeżania wynosząca 10 Hz pozwala na płynne i ciągłe śledzenie zmian w polu widzenia czujnika, co umożliwia zastosowanie go w konstrukcji własnych detektorów osób lub kompaktowych kamer termicznych [5].



Rysunek 3.1 Moduł czujnika AMG8833

3.2 Czujnik termowizyjny MLX90640

Czujnik MLX90640 to kompaktowa i niedroga matryca termiczna IR o rozdzielczości 32x24 piksele, zamknięta w standardowej obudowie TO39 z 4 wyprowadzeniami. Dzięki łatwości integracji i fabrycznej kalibracji, doskonale nadaje się do zastosowań przemysłowych i konsumentycznych. Czujnik charakteryzuje się współczynnikiem równoważnej różnicy temperatury szumów (NETD) na poziomie 0,1K RMS przy częstotliwości odświeżania 1Hz, co zapewnia wysoką precyzję pomiarów. Urządzenie obsługuje cyfrowy interfejs komunikacyjny I2C, a częstotliwość odświeżania jest programowalna w zakresie od 0,5Hz do 64Hz, co pozwala na elastyczne dostosowanie do wymagań projektu. Czujnik jest zasilany 3,3V i pobiera prąd poniżej 23mA, co czyni go energooszczędnym rozwiązaniem. Urządzenie oferuje kąt widzenia $55^\circ \times 35^\circ$. Zakres temperatur pracy wynosi od -40°C do 85°C, a czujnik może monitorować obiekty w zakresie od -40°C do 300°C [3].



Rysunek 3.2 Moduł czujnika MLX90640

3.3 Czujnik odległościowy matrycowy VL53L5CX

Czujnik VL53L5CX to zaawansowany sensor pomiaru odległości Time-of-Flight (ToF) należący do rodziny produktów ST FlightSense. Umieszczony w kompaktowej obudowie umożliwiającej montaż metodą reflow, czujnik integruje macierz SPAD, fizyczne filtry podczerwieni oraz elementy optyczne dyfrakcyjne (DOE), co zapewnia doskonałą wydajność pomiarową w różnych warunkach oświetlenia oraz przy zastosowaniu różnorodnych materiałów pokrywających. Czujnik oferuje precyzyjny pomiar w odległości do 400 cm i może działać z dużą szybkością – nawet do 60 Hz, co czyni go najszybszym, wielostrefowym, miniaturowym czujnikiem ToF dostępnym na rynku. Możliwe jest wykonywanie pomiarów wielostrefowych do 8×8 stref z szerokim kątem widzenia 65° (diagonalnie), który może zostać zredukowany za pomocą oprogramowania [8].



Rysunek 3.3 Moduł czujnika VL53L5CX

3.4 Camera

Microsoft LifeCam Studio to kamera internetowa umożliwiająca rejestrację obrazu w rozdzielcości Full HD (1920×1080) z wykorzystaniem matrycy CMOS o wysokiej czułości. Dzięki szerokokątnemu polu widzenia i funkcji automatycznego ustawiania ostrości, urządzenie pozwala na precyzyjne monitorowanie większych obszarów w czasie rzeczywistym. Kamera wykorzystuje technologię TrueColor, która automatycznie optymalizuje jasność i kontrast obrazu, zapewniając wysoką jakość w różnych warunkach oświetleniowych.

Urządzenie komunikuje się za pomocą interfejsu USB, co ułatwia integrację z systemem pomiarowym. Solidna konstrukcja i regulowany uchwyt umożliwiają stabilny montaż na obudowie stanowiska pomiarowego. Wbudowany mikrofon może być wykorzystany w aplikacjach wymagających rejestracji dźwięku [4].



Rysunek 3.4 Camera Microsoft LifeCam Studio

Rozdział 4

Analiza problemu

W realizacji założonych celów kluczowym wyzwaniem jest zaprojektowanie aplikacji zarządzającej stanowiskiem pomiarowym, która umożliwia zbieranie, rejestrację oraz wizualizację danych z różnych typów czujników. Projektowana aplikacja musi uwzględniać zarówno dane z czujników VL53L5CX, jak i termowizyjnych, a także zapewniać możliwość ich analizy w czasie rzeczywistym. Poniżej przedstawiono szczegółowe rozwiązania dotyczące realizacji założeń, potencjalnych wyzwań technicznych oraz proponowanych rozwiązań.

Jednym z kluczowych celów jest zaprojektowanie interfejsu użytkownika, który pozwoli na intuicyjną obsługę aplikacji. Wymagane funkcje obejmują możliwość przełączania trybów pracy, takie jak jednocześnie zbieranie danych z dwóch czujników VL53L5CX lub dwóch czujników termowizyjnych. Wprowadzenie tych trybów wiąże się z koniecznością modyfikacji oprogramowania mikrokontrolera. Oczekuje się, że wprowadzenie takich funkcji znaczowo poprawi możliwości analityczne użytkownika, ale jednocześnie wymaga odpowiedniego zarządzania przepływem danych, aby uniknąć przeciążeń systemu.

Kolejnym wyzwaniem jest stworzenie efektywnych metod wizualizacji danych. Wśród możliwych rozwiązań rozważane są tabele prezentujące szczegółowe informacje o błędach pomiarowych, diagramy obrazujące wartości średnie z danych pomiarowych oraz obrazy pochodzące bezpośrednio z czujników. W przypadku wizualizacji obrazów z czujników typu VL53L5CX konieczne może być wprowadzenie filtracji, na przykład z wykorzystaniem filtra Gaussa, aby zredukować zakłócenia i poprawić czytelność wyników. Wizualizacja danych termowizyjnych będzie wymagała dodatkowych modyfikacji ze względu na różnice w rozdzielczości czujników, co może wiązać się z dodatkowymi ograniczeniami technicznymi.

Rejestracja danych pomiarowych powinna być realizowana zarówno na żądanie użytkownika, jak i według ustalonego harmonogramu. W obu przypadkach dane muszą być zapisywane w formacie umożliwiającym ich późniejszą analizę, na przykład w plikach tekstowych (*.txt). Kluczowe jest uwzględnienie możliwości przechowywania zarówno surowych danych, jak i wyników ich przetwarzania, takich jak średnie wartości, odchylenia standardowe czy błędy średniokwadratowe. Oczekuje się, że użytkownik będzie mógł wybrać zakres danych do zapisania oraz sposób ich przetwarzania za pomocą interfejsu aplikacji.

Rozdział 5

Projekt rozbudowy stanowiska wielosensorycznego

Projekt rozbudowy stanowiska wielosensorycznego obejmuje integrację części elektronicznej oraz mechanicznej w celu zapewnienia jego pełnej funkcjonalności. Stanowisko to jest kontynuacją projektu zrealizowanego w ramach wcześniejszej pracy dyplomowej inżynierskiej [2], w której zaprojektowano i wdrożono podstawową wersję urządzenia, obejmującą czujniki pomiarowe oraz odpowiednią obudowę.

Część elektroniczna stanowiska składa się z płytki sterującej, czujników pomiarowych oraz kamery rejestrującej obraz. Natomiast część mechaniczna dotyczy obudowy, która zapewnia stabilność konstrukcji oraz odpowiednie rozmieszczenie komponentów. Rozbudowa obejmowała również implementację dodatkowych funkcji pomiarowych.

Stanowisko wielosensoryczne zostało zaprojektowane w taki sposób, aby umożliwić jego komunikację z komputerem PC poprzez dwa niezależne połączenia USB: jedno dedykowane zasadniczej części pomiarowej (płytnka STM32L476RG Nucleo oraz czujniki), a drugie służące do obsługi kamery. Dzięki temu możliwe jest jednoczesne przetwarzanie danych z czujników oraz obrazu rejestrowanego przez kamerę.

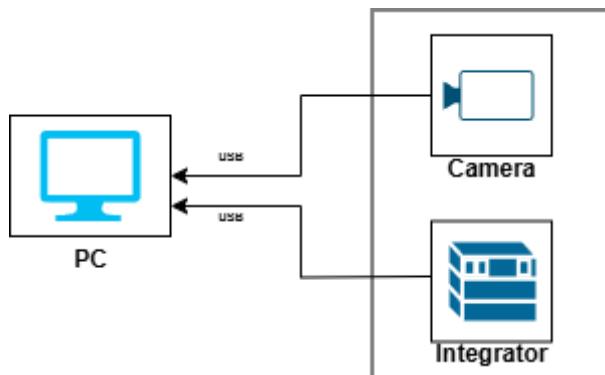
5.1 Układ komponentów stanowiska wielosensorycznego

Stanowisko wielosensoryczne bazuje na zintegrowanym systemie, który został stworzony w ramach wcześniej zrealizowanej dyplomowej pracy inżynierskiej [2]. System ten stanowi podstawowy komponent projektu i został wykorzystany jako fundament do dalszej rozbudowy urządzenia, obejmującej dodanie kamery, rejestrującej obraz.

Wewnątrz obudowy stanowiska umieszczono mikrokontroler STM32L476RG Nucleo, pełniący funkcję centralnej jednostki sterującej. Do mikrokontrolera podłączono następujące czujniki:

- dwa czujniki VL53L5CX, które zapewniają precyzyjne pomiary odległości,
- termowizyjny czujnik AMG8833 o rozdzielczości 8×8 pikseli,
- termowizyjny czujnik MLX90640 o rozdzielczości 32×24 piksele.

Poniższy rysunek przedstawia uproszczony schemat połączenia stanowiska z komputerem PC:



Rysunek 5.1 Schemat blokowy stanowiska integratora sensorów termowizyjnych i sensorów odległości

5.2 Komunikacja

W ramach modyfikacji kodu mikrokontrolera STM32 wprowadzono dwie nowe opcje odczytu danych: jednoczesny odczyt z dwóch czujników VL53L5CX (oznaczenie trybu „H”) oraz jednoczesny odczyt z dwóch czujników termowizyjnych (oznaczenie trybu „I”). Dostosowanie to zwiększa szybkość działania aplikacji, umożliwiając przetwarzanie większej ilości danych w krótszym czasie, co poprawia wydajność systemu i pozwala na bardziej płynną pracę w trybach wymagających jednoczesnej analizy danych z wielu źródeł.

Zaimplementowano ten mechanizm w oparciu o istniejące funkcje mikrokontrolera. Odczyt działa w następujący sposób: aplikacja przesyła odpowiedni symbol za pośrednictwem interfejsu UART do mikrokontrolera. Po rozpoznaniu symbolu, np. „H”, w głównej pętli mikrokontrolera wywoływane są funkcje „get_result_VL53L5CX1()” oraz „get_result_VL53L5CX2()”, które odpowiadają za przesłanie odczytanych danych z czujników odległościowych do aplikacji. Analogiczny mechanizm zaimplementowano dla czujników termowizyjnych. W tym przypadku aplikacja przesyła symbol „I”, co skutkuje wywołaniem funkcji „get_result_Mlx90640()” oraz „get_result_AMG8833()”, odpowiedzialnych za przesłanie danych z odpowiednich czujników termowizyjnych.

Protokół komunikacji pozostał bez zmian, bo dla każdej zdefiniowanej funkcji rodzaju „get_result_...” w mikrokontrolerze wcześniej były stworzone unikalne bramki danych, które mają symbol rozpoczęcia transmisji, sumę kontrolną, dane z czujników w postaci tablicy jednowymiarowej oraz symbol końca transmisji razem z przejściem na nową linię.

5.3 Projekt aplikacji zarządzającej stanowiskiem pomiarowym

W aplikacji zarządzającej stanowiskiem pomiarowym zrealizowano zestaw klas w języku C++ [9] odpowiedzialnych za różne aspekty funkcjonalności programu. Poniżej przedstawiono ich opis oraz sposób wykorzystania:

Klasa **Main** – odpowiada za uruchomienie aplikacji. Inicjalizuje pozostałe komponenty i uruchamia główne okno programu.

Klasa **MainWindow** – to główne okno aplikacji, które pełni rolę centralnego interfejsu użytkownika. Umożliwia łączenie się z mikrokontrolerem, wybór trybu pracy, zapisywanie danych pomiarowych dla poszczególnych czujników, wybór języka aplikacji (pol-

ski lub angielski) oraz otwieranie zaawansowanych okien pomiarowych, takich jak wizualizacja danych i analiza błędów.

Klasa **Table** – to okno wywoływanie z **MainWindow**, zaprojektowane do wizualizacji pomiarów z czujników VL53L5CX. Umożliwia wyświetlanie danych z dwóch czujników jednocześnie lub osobno, w zależności od wybranego trybu w **MainWindow**. Dane pomiarowe mogą być zapisywane w plikach o rozszerzeniu (*.dat). Klasa oferuje funkcję realizacji serii pomiarów (do 50 pomiarów, z możliwością rozszerzenia), a także prezentację danych w tabelach informujących o błędach (maksymalne odchylenie lub błąd średniokwadratowy, w zależności od wyboru w polu **comboBox**). Dodatkowo umożliwia zmianę trybu wyświetlania obrazów z czujników oraz obrazu z kamery.

Klasa **Table_Termo** – jest kopią **Table**, dostosowaną do wizualizacji pomiarów z czujników termowizyjnych AMG8833 i MLX90640. Udostępnia te same funkcje co **Table**, z uwzględnieniem specyfiki danych termowizyjnych.

Klasa **DataDisplay** typu **QWidget** – została stworzona do wyświetlania obrazów z czujników. Oferuje funkcje obliczania koloru każdego piksela w zależności od wartości liczbowej, renderowania obrazu poprzez rysowanie pikseli oraz wyświetlania podpowiedzi z wartością piksela po najechaniu kursorem myszy.

Klasa **DataDisplayText** – jest rozszerzoną wersją **DataDisplay**. Dodatkowo wyświetla wartości liczbowe w każdym pikselu, dodaje siatkę oddzielającą piksele oraz ustawia kolory napisów w zależności od rodzaju czujnika (czerwony dla VL53L5CX, biały dla termowizyjnych).

Klasa **Gauss** typu **QWidget** – bazuje się na **DataDisplay**, zawiera implementację filtra Gaussa[1], który zwiększa rozdzielcość obrazu 8×8 i przetwarza obraz w celu uzyskania płynniejszych przejść tonalnych.

Klasa **CameraWidget** typu **QWidget** – służy do wyświetlania obrazu z kamery i obsługuje transmisję video w czasie rzeczywistym[7]. Zarówno umożliwia użytkownikowi przemieszczać się po obrazie za pomocą przycisków oraz zwiększać i zmniejszać obraz z kamery.

Klasa **TableChart** typu **QWidget** – została zaprojektowana do wyświetlania wykresów wartości średnich dla czujników o rozdzielcości 8×8 . Posiada funkcję skalowania osi OY.

Klasa **TableChartMLX** – to wersja **TableChart** dla czujników o rozdzielcości 32×24 . Udostępnia również funkcję skalowania osi OY.

Wszystkie klasy zostały zaprojektowane w sposób modularny, co umożliwia ich efektywne wykorzystanie w aplikacji oraz łatwą rozbudowę funkcjonalności w przyszłości[7].



Rysunek 5.2 Diagram klas [6]

Rozdział 6

Realizacja wielosensorycznego stanowiska pomiarowego

Celem realizacji stanowiska wielosensorycznego było rozszerzenie istniejącej konstrukcji poprzez dodanie nowych elementów, które umożliwiają jednoczesną rejestrację obrazu wideo oraz danych pomiarowych z czujników. Przed rozpoczęciem prac stanowisko obejmowało obudowę z mikrokontrolerem STM32L476RG Nucleo, do którego podłączone były czujniki odległościowe VL53L5CX, zapewniające precyzyjny pomiar odległości i czujniki termowizyjne AMG8833 i MLX90640, odpowiedzialne za rejestrację rozkładu temperatury. Wszystkie te elementy były już zintegrowane i w pełni funkcjonalne [2]. Rozbudowa polegała na dodaniu kamery Microsoft LifeCam Studio, która umożliwia rejestrację obrazu wideo. Kamera łączy się z komputerem bezpośrednio przez interfejs USB, niezależnie od mikrokontrolera.

6.1 Sprzętowa część stanowiska wielosensorycznego

Na zewnętrznej stronie obudowy zamocowano kamerę, która umożliwia rejestrację obrazu z otoczenia. Kamera została umieszczona w stabilnym uchwycie, zapewniającym odpowiedni kąt widzenia i trwałość konstrukcji [4]. Takie rozwiązanie umożliwia jednoczesną rejestrację obrazów wideo oraz danych pomiarowych z czujników, co znacząco rozszerza funkcjonalność stanowiska.

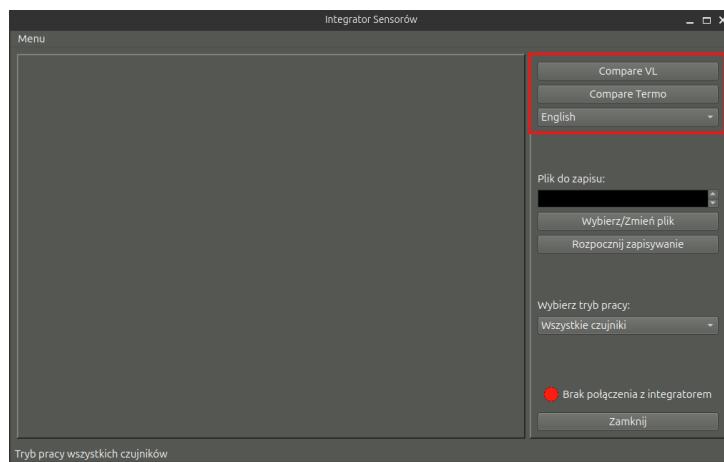


Rysunek 6.1 Zdjęcie stanowiska pomiarowego

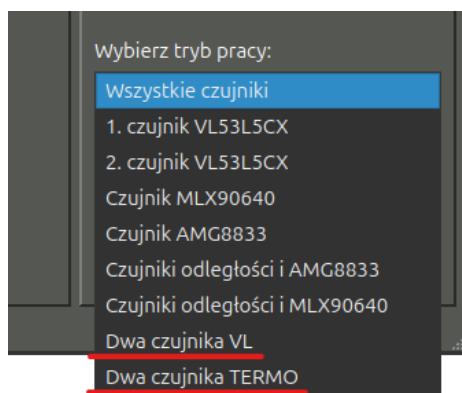
6.2 Oprogramowanie stanowiska wielosensorycznego

Za podstawę oprogramowania została wzięta wersja programu inż. Grzegorza Pióro [2], która już miała zaimplementowane okno główne oraz podstawowe mechanizmy komunikacji z integratorem oraz wyświetlania danych pomiarowych.

Projekt aplikacji zarządzającej stanowiskiem pomiarowym obejmuje implementację funkcjonalności pozwalających na zarządzanie danymi pomiarowymi, ich wizualizację oraz zapis w odpowiednim formacie plików na dysku. W interfejsie głównym (klasa `MainWindow`) znajdują się dwa przyciski: `Compare VL` i `Compare TERMO`, które otwierają okna umożliwiające porównanie danych z czujników VL53L5CX oraz termowizyjnych. Aplikacja umożliwia również zmianę języka pomiędzy polskim i angielskim, jak pokazano na rysunkach 6.2 i 6.3. W zakładce *Tryb pracy* dodano funkcje pobierania danych z dwóch czujników VL53L5CX jednocześnie oraz dwóch czujników termowizyjnych, co wymagało ingerencji w kod mikrokontrolera [8].

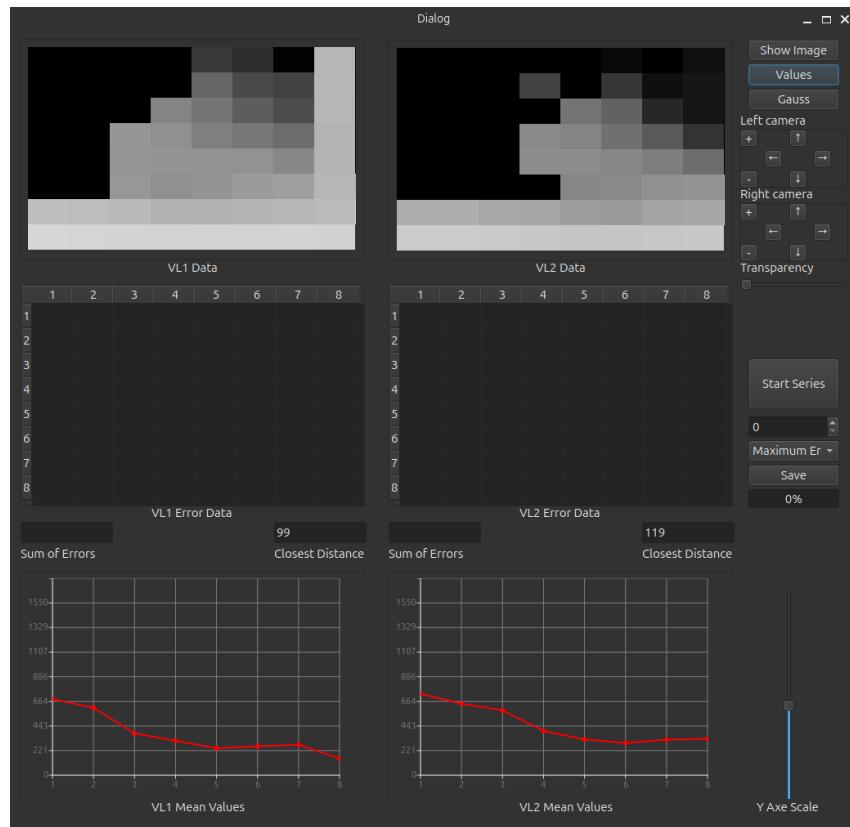


Rysunek 6.2 Zmiany w głównym oknie



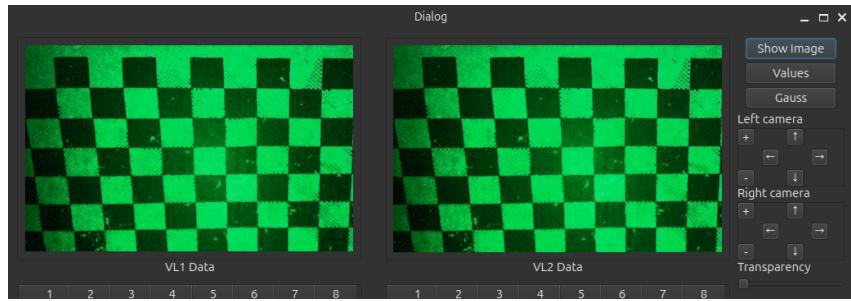
Rysunek 6.3 Nowe tryby pracy

Dla potrzeb analizy danych z czujników VL53L5CX stworzono okno *Dane z czujników VL*, obsługiwane przez klasę do `zmiany_table.cpp`. Okno to umożliwia wyświetlanie obrazów z czujników VL53L5CX, prezentację błędów pomiarowych w formie tabel oraz wizualizację średnich wartości z poszczególnych kolumn w postaci diagramów. Pod tabelami błędów znajdują się pola informujące o sumie wszystkich błędów oraz najbliższym punkcie. Interfejs okna zawiera także elementy sterujące, takie jak przyciski, suwaki oraz pola wyboru, które pozwalają na precyzyjne zarządzanie danymi. Okno pokazano na rysunku 6.4.



Rysunek 6.4 Nowe okno dla czujników VL53L5CX

Funkcja przycisku **Wyświetl Obraz** polega na wyświetlaniu widget'u, który przekazuje obraz z kamery zamontowanej na stanowisku pomiarowym (rys. 6.5). Obsługę widget'u zapewnia klasa `CameraWidget`, wykorzystująca biblioteki Qt, takie jak `QCameraDevice`, `QImage` oraz `QMediaCaptureSession`[7]. Po lewej stronie wyświetlacza obrazu dodano przyciski nawigacyjne, które umożliwiają przemieszczanie się po obrazie z kamery oraz zmianę jego skali. Strzałki \leftarrow , \rightarrow , \uparrow , \downarrow pozwalają na przesuwanie widoku obrazu w lewo, prawo, w górę oraz w dół. Dodatkowo przyciski $+$ i $-$ umożliwiają odpowiednio powiększenie lub zmniejszenie obrazu, co pozwala użytkownikowi na dokładniejszą analizę wybranych fragmentów.

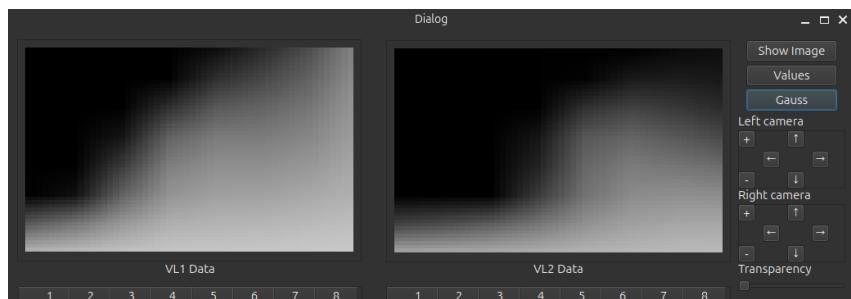


Rysunek 6.5 Przykład graficznej realizacji obiektu klasy CameraWidget

Przyciski **Wartości** i **Gauss** odpowiadają za prezentację obrazu z czujników VL53L5CX z dodatkowymi informacjami. Funkcjonalność powiązana z przyciskiem **Wartości** powoduje wyświetlenie wartości odległości wyrażonych w milimetrach, które odpowiadają poszczególnym pikselom matrycy czujnika VL53L5CX (rys. 6.6). Z kolei funkcja **Gauss** nakłada filtr Gaussa, wygładzając dane i poprawiając ich czytelność poprzez zastosowanie wag macierzy Gaussa 5×5 . Filtr obsługuje krawędzie siatki oraz interpolację, co zapewnia estetyczny efekt wizualny (rys. 6.7).



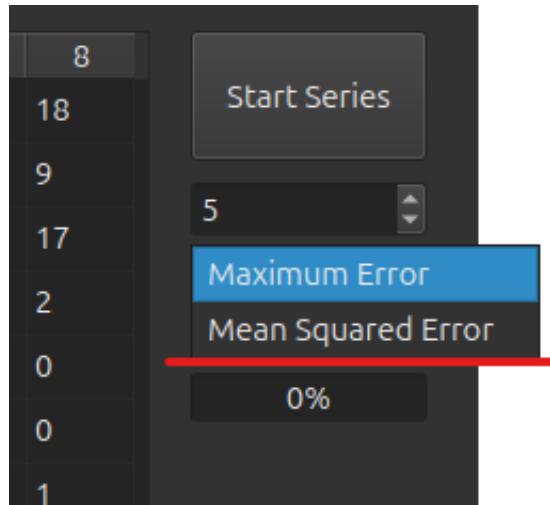
Rysunek 6.6 Przykład wyświetlonych wartości pomiarów odległości z lewego i prawego czujnika VL53L5CX



Rysunek 6.7 Przykład wizualizacji danych pomiarowych z zastosowaniem funkcji gaussowskiej

Przycisk **Rozpocznij Serię** umożliwia przeprowadzenie serii pomiarów, z maksymalną liczbą wynoszącą 50. Użytkownik może określić liczbę pomiarów oraz wybrać rodzaj obliczeń, takich jak odchylenie maksymalne od średniej czy błąd średniokwadratowy, korzystając z pola wyboru **comboBox** (rys. 6.8). Wyniki są następnie zapisywane w tabelach błędów, dedykowanych dla każdego z czujników VL53L5CX (rys. 6.9). Funkcja zapisu danych jest realizowana przez przycisk **Zapisz**, który umożliwia eksport wyników pomiarów do katalogu o automatycznie generowanej nazwie, zawierającej datę oraz czas wykonania

pomiaru (np. „, ,data-2024-12-01_09_05’’). W katalogu tworzone są pliki o rozszerzeniu (*.dat), osobne dla każdego czujnika: „, ,v15315cx-1.dat’’, „, ,v15315cx-2.dat’’, „, ,amg8833.dat’’ oraz „, ,mlx90640.dat’’. Każdy plik zawiera dane pomiarowe z unikalnymi identyfikatorami przypisanymi do każdego wierszu, co ułatwia nawigację oraz analizę danych w przyszłości. Status wykonywania serii pomiarów wyświetlany jest na pasku postępu pod przyciskiem **Zapisz**.



Rysunek 6.8 Wybór typu błędów, które mają być obliczane

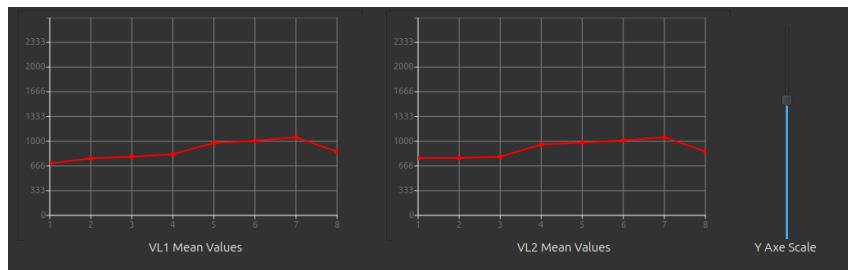
VL1 Error Data	VL2 Error Data
1 11 11 7 13 13 33 39 21	1 11 28 14 16 4 57 2018 18
2 6 6 7 11 7 15 12 17	2 6 4 8 15 18 12 17 9
3 26 11 17 14 24 6 26 22	3 6 9 10 13 16 17 30 17
4 39 110 58 728 41 21 22 1	4 24 82 24 43 287 18 37 2
5 0 0 1 1 0 1 0 1	5 0 0 1 1 1 1 1 0
6 1 0 1 1 0 1 0 0	6 1 0 0 0 1 0 0 0
7 0 0 1 1 0 0 0 1	7 0 1 1 1 1 0 0 1
8 0 0 0 1 1 0 0 0	8 1 1 0 0 0 0 1 1

Below the tables are summary statistics:

VL1 Error Data	VL2 Error Data
1408	2906
Sum of Errors	Closest Distance
49	64

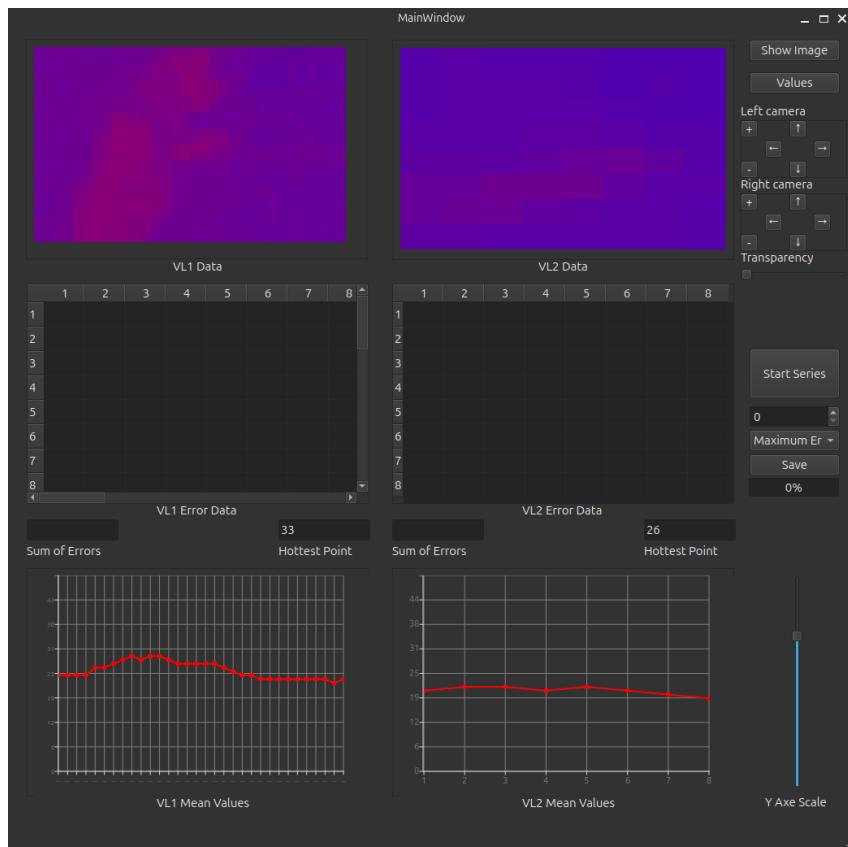
Rysunek 6.9 Tabele z wyznaczonymi maksymalnymi wartościami błędów

Suwak Skalowanie Osi OY pozwala na zmianę maksymalnej wartości osi OY na diagramach, co ułatwia ich analizę (rys. 6.10).



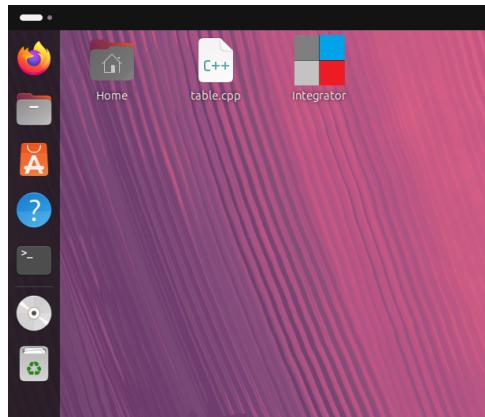
Rysunek 6.10 Sekcja diagramów

W przypadku danych z czujników termowizyjnych MLX90640 i AMG8833 stworzono dedykowane okno porównawcze obsługiwane przez klasę `table_termo`. Jest ono adaptacją okna dla czujników VL53L5CX, jednak z uwzględnieniem specyfiki czujników termowizyjnych, takich jak rozdzielcość (rys. 6.11). Czujnik MLX90640, dzięki rozdzielcości 32×24 piksele, wymaga dostosowanych tabel i diagramów. W tym przypadku zrezygnowano z filtra Gaussa, pozostawiając jedynie podstawowe funkcje analizy danych.



Rysunek 6.11 Okno do porównania danych z czujników termowizyjnych

W celu zwiększenia wygody użytkownika aplikacja została również wyposażona w ikonę na pulpicie, za pomocą której można szybko uruchomić program. Rozwiązanie to zapewnia intuicyjny dostęp do aplikacji, co jest szczególnie istotne w środowisku, gdzie narzędzie ma być używane w sposób regularny i efektywny [1].



Rysunek 6.12 Skrót na pulpicie umożliwiający szybkie uruchomienie programu

Aplikacja stanowi kompleksowe narzędzie umożliwiające użytkownikowi nie tylko obsługę i wizualizację danych pomiarowych, lecz także ich szczegółową analizę i zapis w wygodnym formacie. Dzięki zastosowanym rozwiązaniom możliwe jest skuteczne zarządzanie danymi zarówno z czujników VL53L5CX, jak i termowizyjnych.

Rozdział 7

Testy i eksperymenty

Opis zrealizowanych i zdokumentowanych (zdjęcia, dane pomiarowe) eksperymentów, które demonstrują najważniejsze cechy skonstruowanego urządzenia oraz najistotniejsze cechy wykorzystywanych sensorów.

7.1 Cele i zadania pomiarowe

Niniejszy podrozdział zawiera opis scenariuszy przebiegów eksperymentów, które mają być podstawą ćwiczeń laboratoryjnych. Ich realizacja warunkuje przebieg niezbędnych pomiarów.

7.1.1 Zbadanie wzajemnych zakłóceń czujników ToF

Celem tego zadania pomiarowego jest stwierdzenie, czy pracujące jednocześnie dwa czujniki mogą wzajemnie się zakłócać.

1. Wykonanie serii pomiarów osobno za pomocą każdego z czujników.
2. W osobnych oknach wskazanie maksymalnych wartości błędów i błędów średnio-kwadratowych.
Powinieneś też być wyznaczona suma tych błędów dla każdego z czujników. Po tym kroku użytkownik powinien móc ze składować wszystkie dane pomiarowe, tzn.
3. W kolejnym kroku należy przeprowadzić analogiczne pomiary z równocześnie włączonymi dwoma czujnikami.
4. Analogicznie jak wcześniej, użytkownik powinien móc zeskładować dane do pliku.

Wymagane funkcjonalności aplikacji:

- Tryby wizualizacji:
 - rastrowa z wykorzystaniem barw,
 - ciągła (gaussowska) z wykorzystaniem barw,
 - wartości pomiarów.
- Okna wizualizujące dane powinno mieć możliwość zmiany trybu wizualizacji.

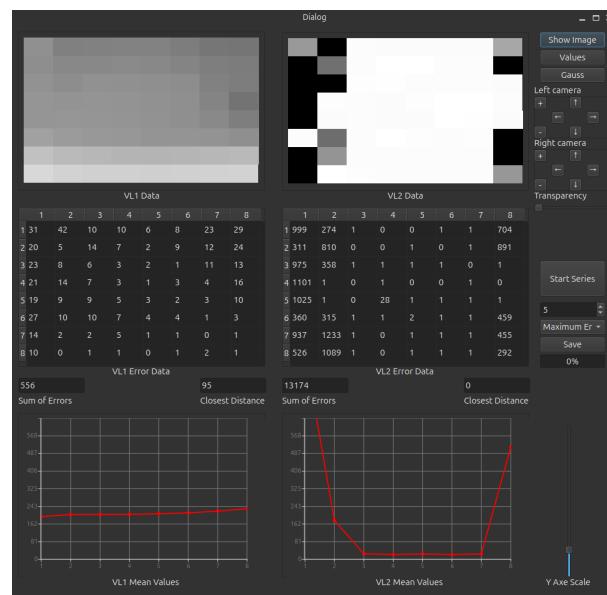
Wyniki testów

Dla potrzeb eksperymentu ścianka została umieszczona w odległości 20 cm od czujników. Najpierw wykonano pomiary za pomocą pierwszego czujnika, przy wyłączonym drugim.

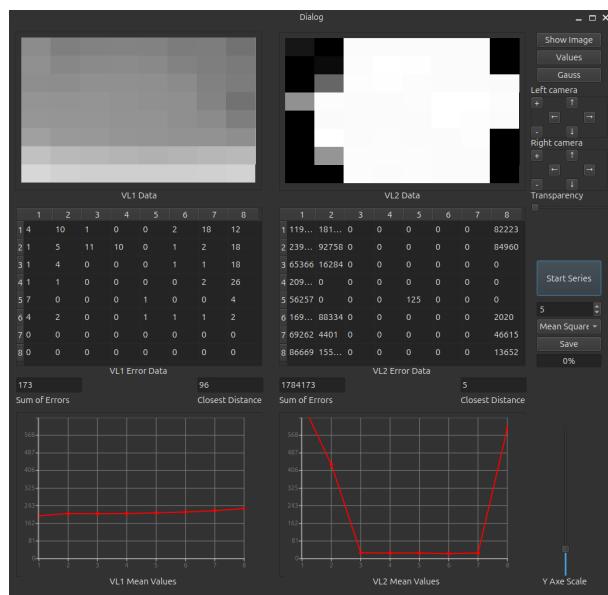


Rysunek 7.1 Widok badanej sceny

Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach poniżej.

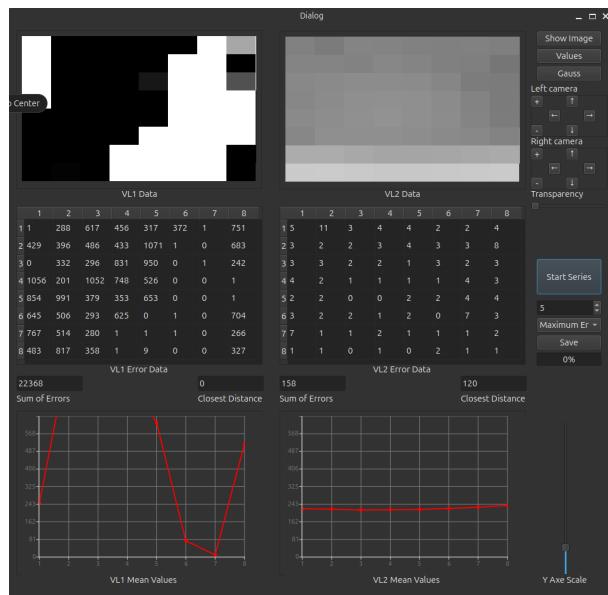


Rysunek 7.2 Dane dla pierwszego czujnika, maksymalne odchylenie

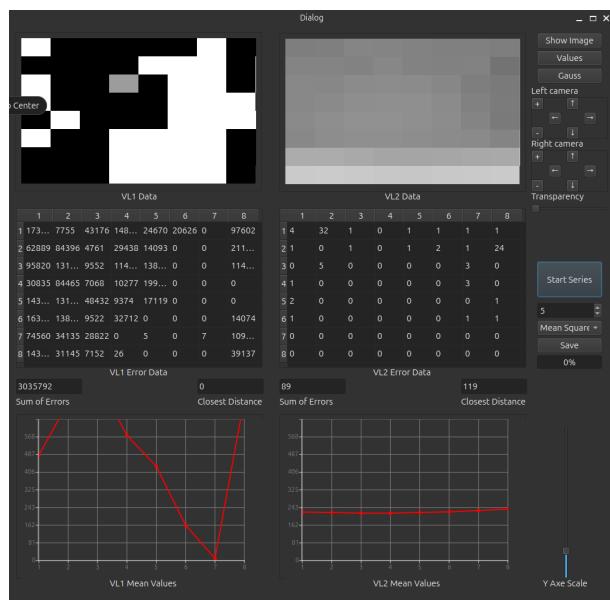


Rysunek 7.3 Dane dla pierwszego czujnika, błąd średniokwadratowy

Następnie aktywowano drugi czujnik, wyłączając pierwszy, i przeprowadzono analogiczne pomiary. Wyniki zarejestrowane dla drugiego czujnika również przedstawiono poniżej, stosując te same metody wizualizacji.

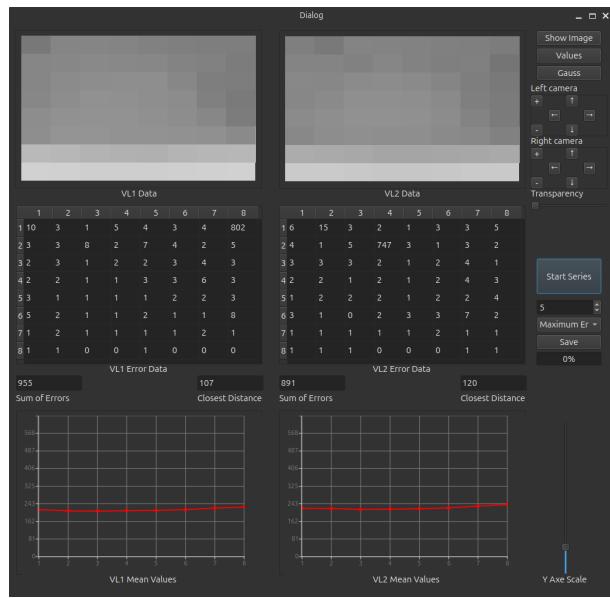


Rysunek 7.4 Dane dla drugiego czujnika, maksymalne odchylenie

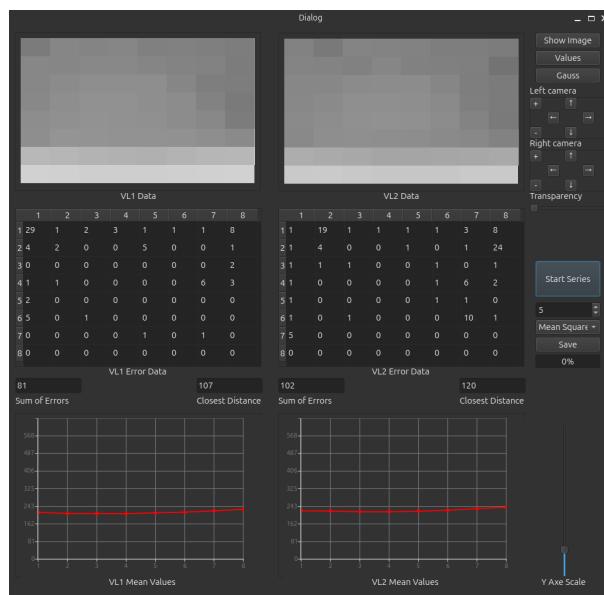


Rysunek 7.5 Dane dla drugiego czujnika, błąd średniokwadratowy

W kolejnym kroku oba czujniki zostały uruchomione jednocześnie. Wyniki pomiarów uzyskane przy pracy równoczesnej również zapisano i wizualizowano w sposób analogiczny.



Rysunek 7.6 Dane dla dwóch czujników, maksymalne odchylenie



Rysunek 7.7 Dane dla dwóch czujników, błąd średniokwadratowy

Dla każdego z czujników obliczono sumaryczne wartości błędów, w tym maksymalne odchylenia oraz błędy średniokwadratowe. Porównując dane z pomiarów pojedynczych z wynikami uzyskanymi przy równoczesnym działaniu obu czujników, zaobserwowano wyraźny wzrost błędów w trybie pracy równoczesnej. Dane potwierdzają, że jednoczesne działanie czujników prowadzi do mierzalnych zakłóceń, których wielkość jest zależna od stopnia pokrywania się ich pól detekcji.

7.1.2 Zbadanie wypływu rozdzieliczości na wykrywanie krawędzi obiektu

Celem pomiarów jest stwierdzenie jak dokładnie jest wykrywana krawędź ścianki. Pomiary powinny być przeprowadzone z wykorzystaniem dwóch czujników ToF. Pozwala to zobaczyć ten sam obiekt z nieco innego miejsca. Pomiary powinny być przeprowadzone osobno przez każdy z czujników.

Przebieg realizacji pomiaru:

- Ściankę należy ustawić w trzech odległościach oraz dla każdej odległości w co najmniej dwóch pozycjach odpowiadającym przesunięciom równolegle do urządzenia o 1 cm. Pierwsza pozycja powinna odpowiadać sytuacji, gdy dla pierwszego czujnika krawędź ścianki jest widoczna na granicy rastrow.
- Po przeprowadzeniu każdej serii pomiarów należy zeskładować otrzymane wartości na dysku. W pojedynczej serii dla danej pozycji ścianki powinno być wykonanych co najmniej 5 pomiarów.

Wymagane funkcjonalności aplikacji:

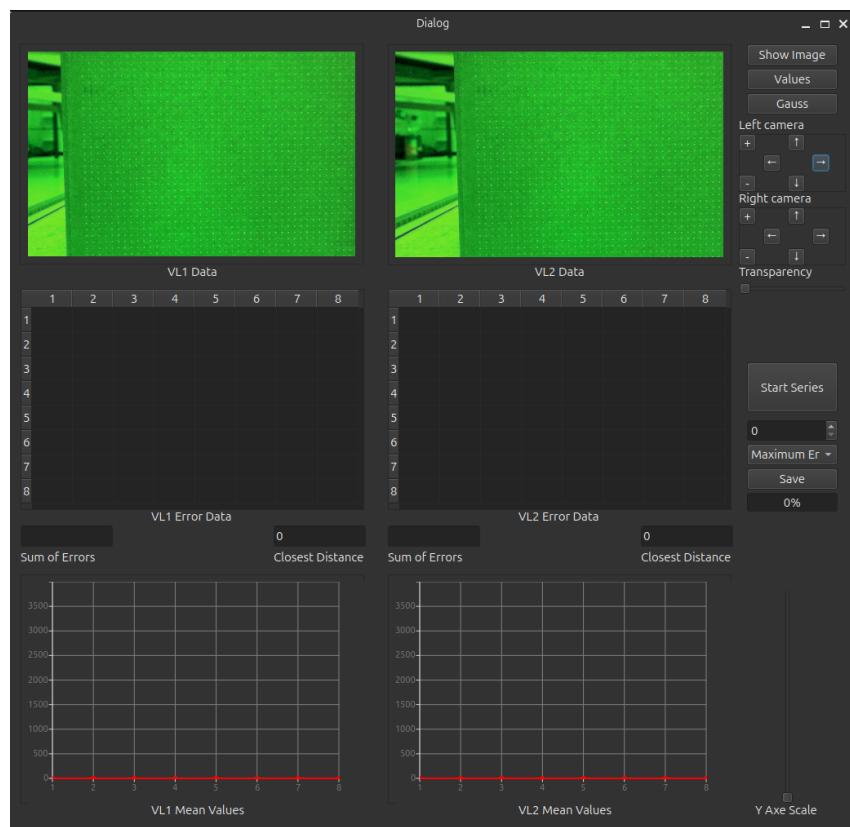
- Tryby wizualizacji:
 - rastrowa z wykorzystaniem barw,
 - ciągła (gaussowska) z wykorzystaniem barw,
 - wartości pomiarów,

- przenikanie obrazów
- Okna wizualizujące dane powinno mieć możliwość zmiany trybu wizualizacji.

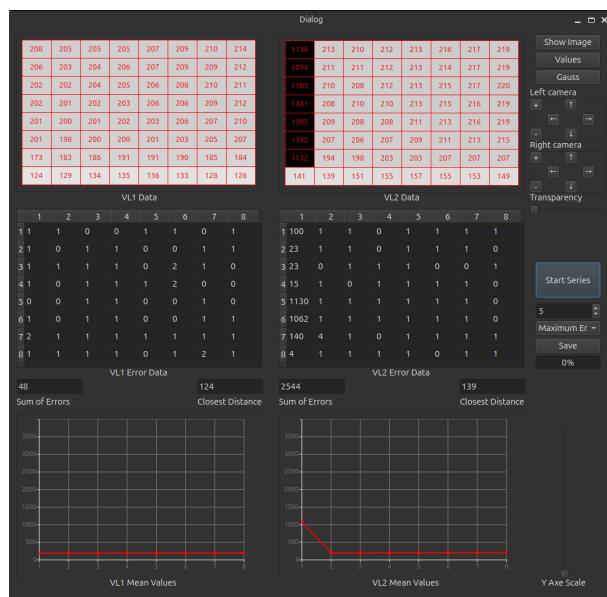
Wyniki testów

Testy przeprowadzono na trzech różnych dystansach: 20 cm, 40 cm oraz 80 cm. Ścianka została umieszczona w taki sposób, aby jej lewa krawędź znajdowała się na granicy rastrów pierwszego czujnika, a następnie przesunięta o 1 cm w prawo. W trakcie pomiarów zarejestrowano maksymalne odchylenia oraz błędy średniokwadratowe (MSE), co przedstawiono na poniższych rysunkach.

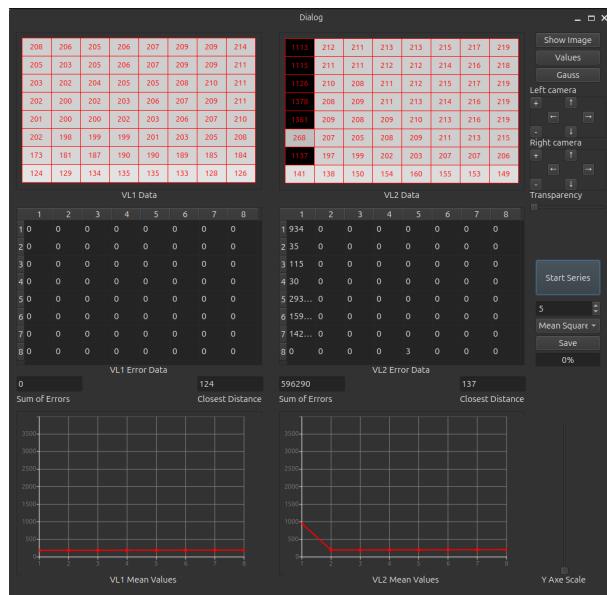
Dla dystansu 20 cm uzyskano następujące wyniki:



Rysunek 7.8 Obraz z zamontowanej kamery



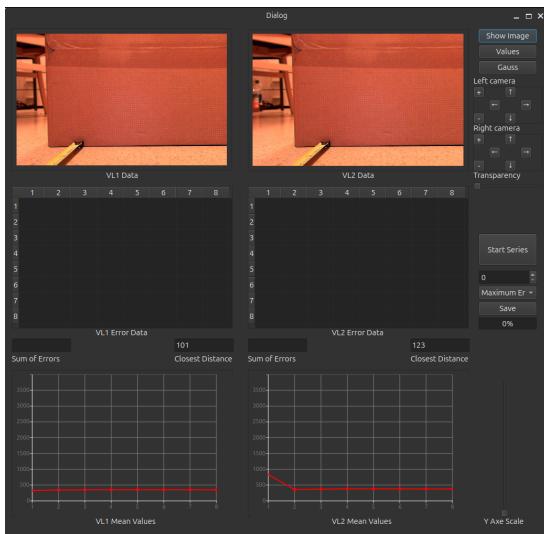
Rysunek 7.9 Dane dla dwóch czujników, maksymalne odchylenie dla początkowego ustawienia ścianki



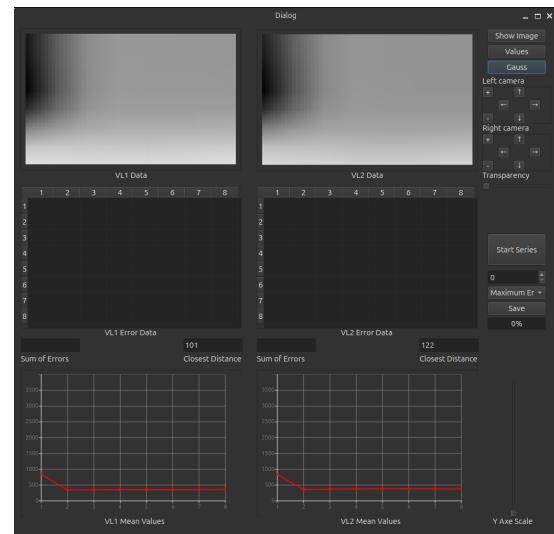
Rysunek 7.10 Dane dla dwóch czujników, błąd średniokwadratowy dla początkowego ustawienia ścianki

Jak widać, największe błędy występują w obszarach krawędziowych ścianki, co wynika z ograniczeń w odbiciu sygnału przez czujniki ToF.

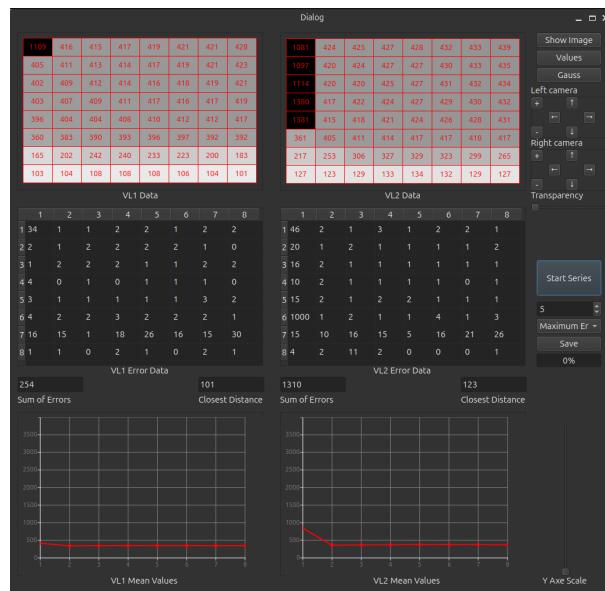
Przy zwiększeniu dystansu do 40 cm zaobserwowano:



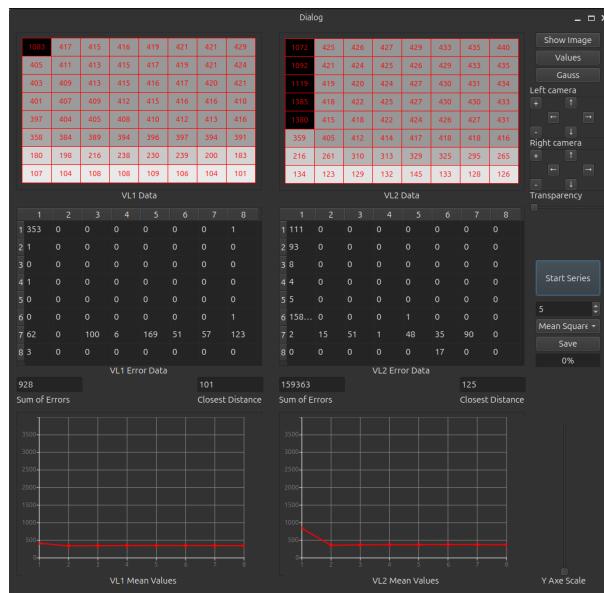
Rysunek 7.11 Obraz z kamery



Rysunek 7.12 Obraz z filtrem Gaussa

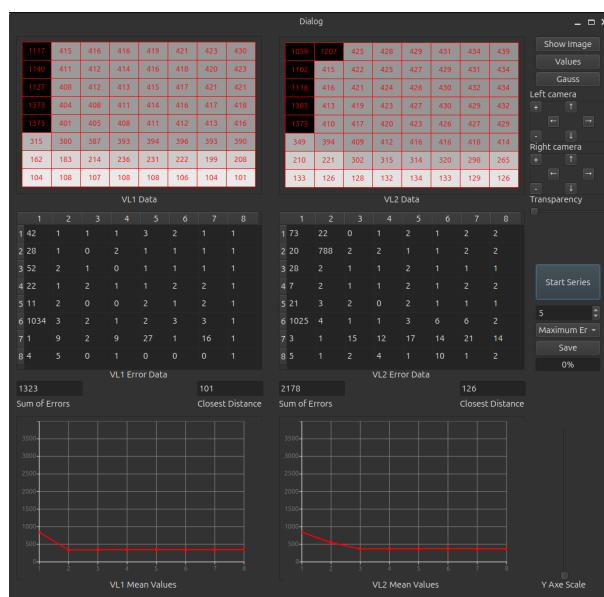


Rysunek 7.13 Dane dla dwóch czujników, maksymalne odchylenie dla początkowego ustalenia ścianki

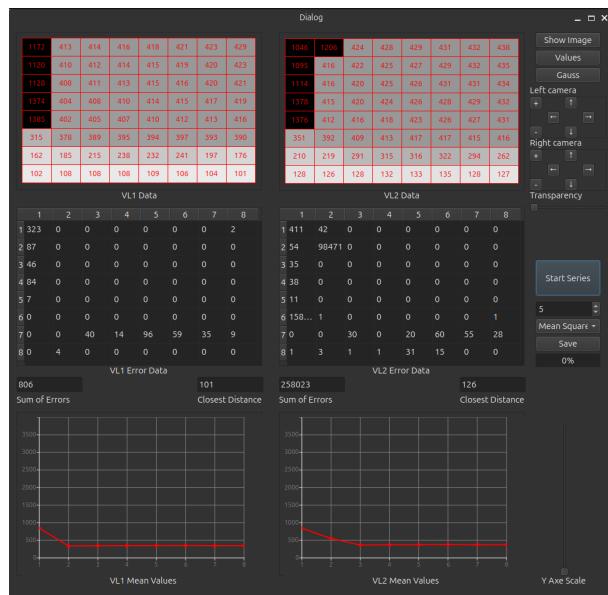


Rysunek 7.14 Dane dla dwóch czujników, błąd średniokwadratowy dla początkowego ustawienia ścianki

Przesunięcie ścianki o 1 cm skutkowało zwiększeniem błędów w obszarach krawędziowych.

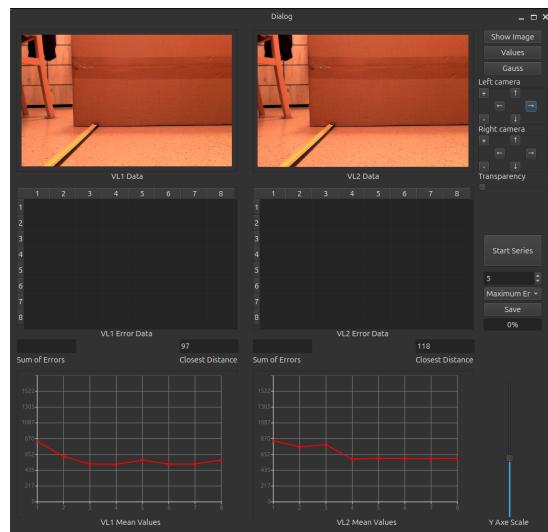


Rysunek 7.15 Dane dla dwóch czujników, maksymalne odchylenie po przesunięciu ścianki

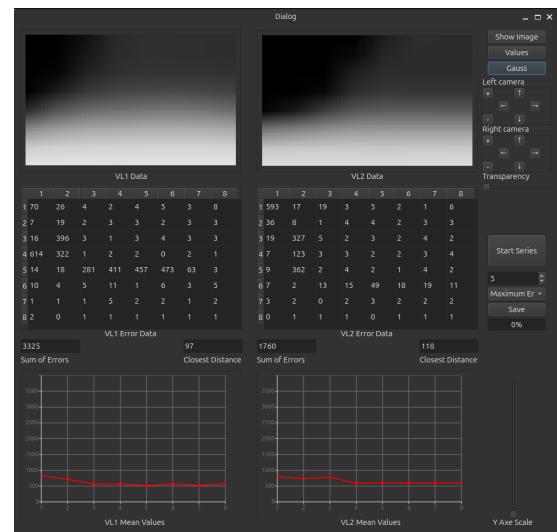


Rysunek 7.16 Dane dla dwóch czujników, błąd średniokwadratowy po przesunięciu ścianki

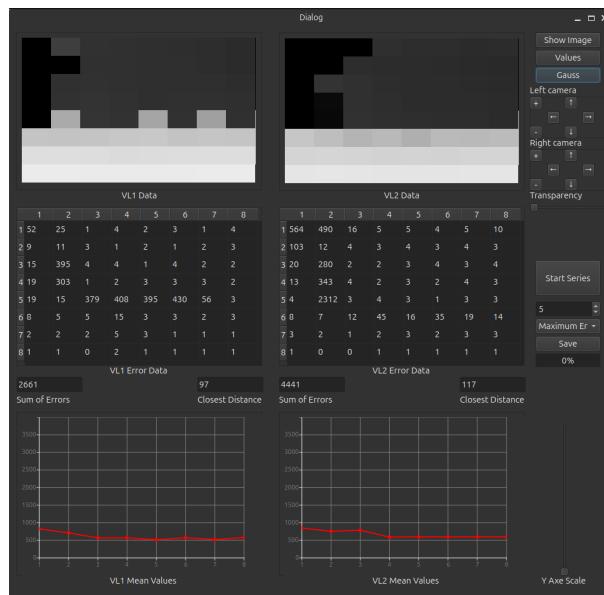
Dla dystansu 80 cm uzyskano podobne obserwacje, jednak wartości błędów były wyższe, co wynika z większego dystansu sygnału.



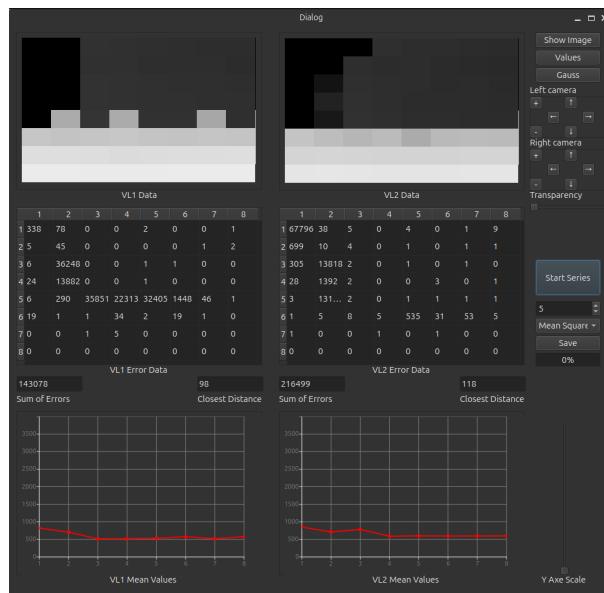
Rysunek 7.17 Obraz z kamery



Rysunek 7.18 Obraz z filtrem Gaussa

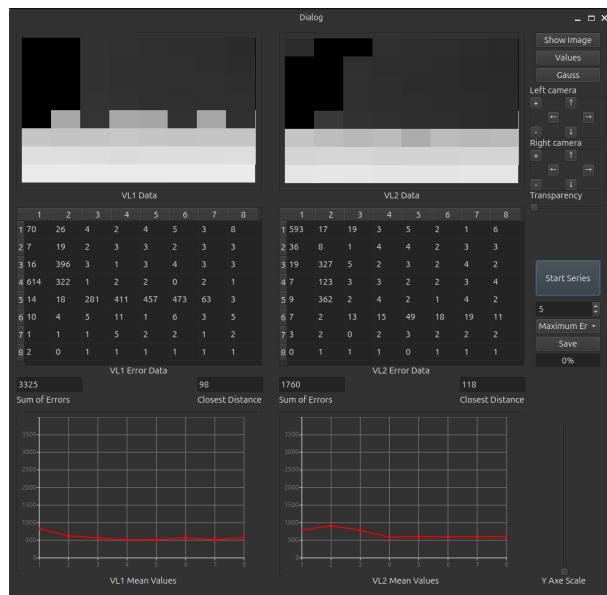


Rysunek 7.19 Dane dla dwóch czujników, maksymalne odchylenie dla początkowego ustawienia ścianki

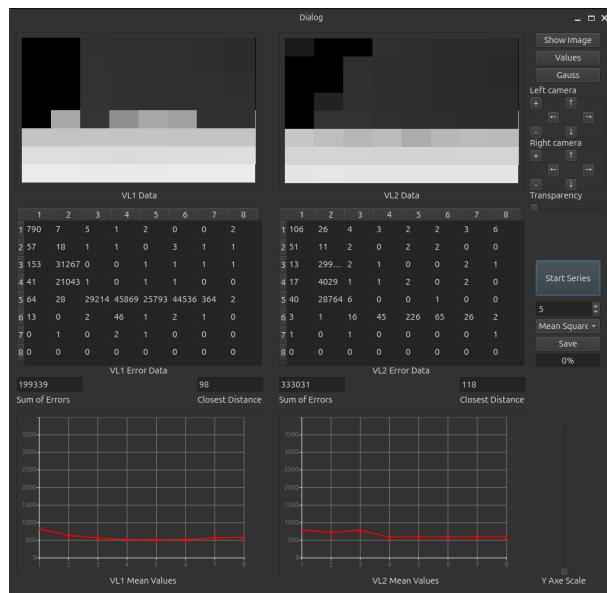


Rysunek 7.20 Dane dla dwóch czujników, błąd średniokwadratowy dla początkowego ustawienia ścianki

Przesunięcie o 1 cm dało następujące wyniki:



Rysunek 7.21 Dane dla dwóch czujników, maksymalne odchylenie po przesunięciu ścianki



Rysunek 7.22 Dane dla dwóch czujników, błąd średniokwadratowy po przesunięciu ścianki

Przeprowadzone testy potwierdziły, że największe błędy pojawiają się na krawędziach ścianki, co wynika z ograniczeń odbicia sygnału i efektów brzegowych. Wzrost dystansu zwiększa wartości błędów, co jest zgodne z oczekiwaniami dla czujników ToF. Również zauważono zwiększenie błędów w miejscach styku ściany z podłogą, co jest szczególnym przypadkiem efektu brzegowego.

7.1.3 Zbadanie rozróżnialności dwóch obiektów

Celem tego zadania jest stwierdzenie wpływu rozdzielczości czujników ToF na możliwość rozróżnienia dwóch obiektów. Pomiarów należy przeprowadzić dla dwóch białych ścianek

oraz dla dwóch aluminiowych rurek. Schemat przebiegu pomiarów w obu przypadkach jest taki sam.

Przebieg realizacji pomiaru:

- Należy ustawić dwie ścianki w jednej linii obok siebie z prześwitem równym 5 cm. Główicę czujnikową należy ustawić w trzech odległościach oraz dla każdej odległości w co najmniej dwóch pozycjach odpowiadającym przesunięciom równolegle do urządzenia o 1 cm. Pierwsza pozycja powinna odpowiadać sytuacji, gdy dla pierwszego czujnika krawędź lewej ścianki jest widoczna na granicy rastrów.
- Po przeprowadzeniu każdej serii pomiarów należy zeskalować otrzymane wartości na dysku. W pojedynczej serii dla danej pozycji ścianki powinno być wykonanych co najmniej 5 pomiarów.

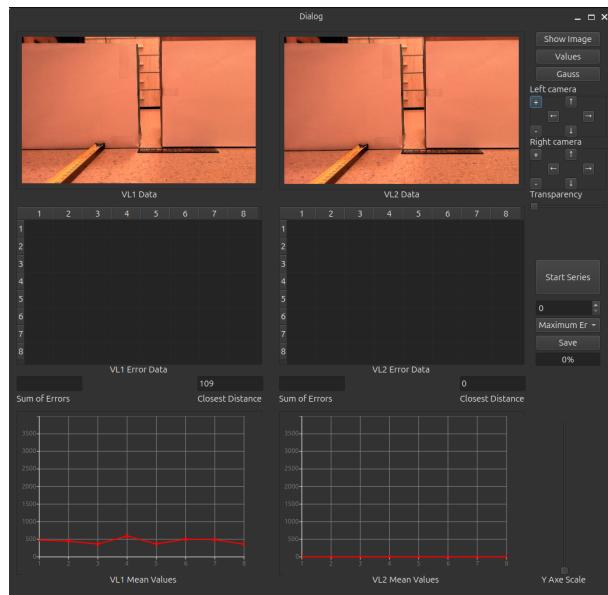
Wyniki testów

Dla przeprowadzenia tych testów ustawiono dwie ścianki w odległości 5 cm od siebie. Scena badawcza przedstawiona jest na poniższym rysunku:

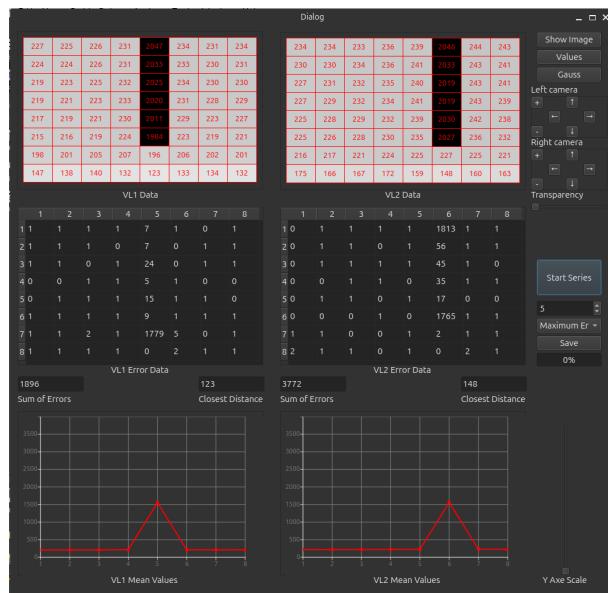


Rysunek 7.23 Widok badanej sceny

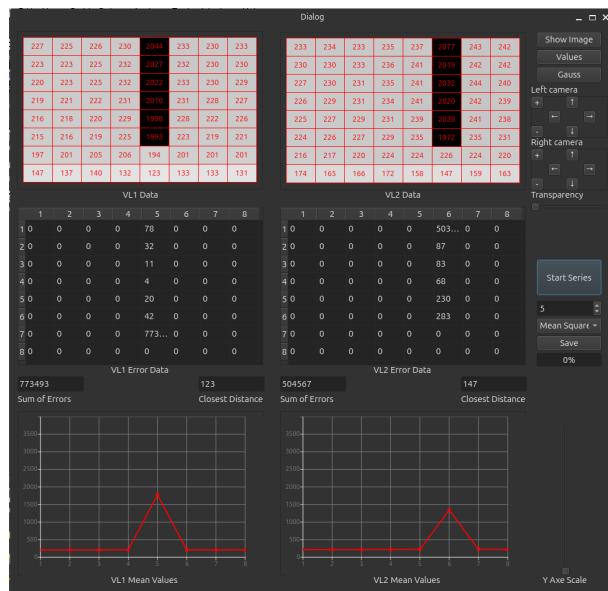
Najpierw przeprowadzono pomiary dla odległości 20 cm. Wyniki przedstawiono na poniższych rysunkach:



Rysunek 7.24 Widok badanej sceny z kamery przy dystansie 20 cm

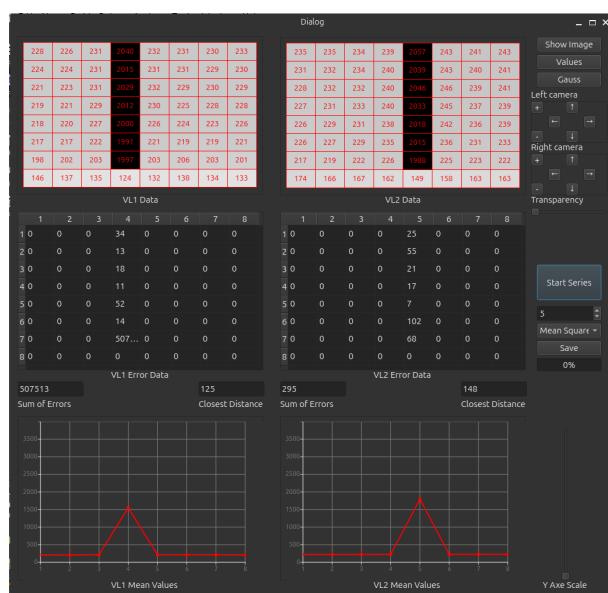


Rysunek 7.25 Maksymalne odchylenie dla dwóch czujników przy dystansie 20 cm

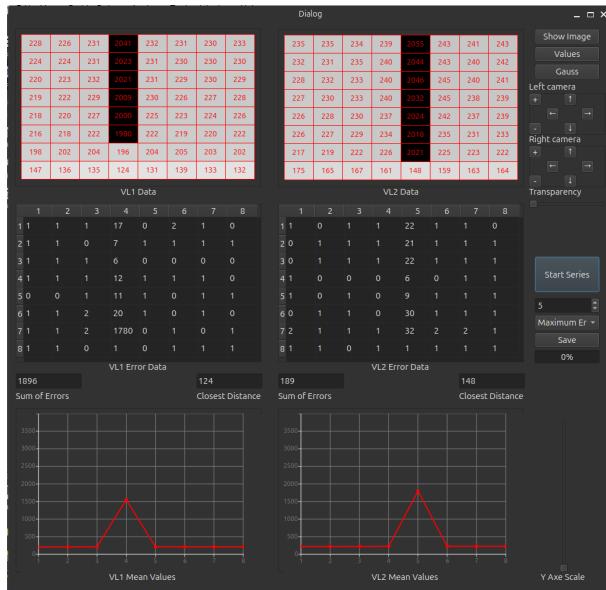


Rysunek 7.26 Błąd średniokwadratowy (MSE) dla dwóch czujników przy dystansie 20 cm

Po przesunięciu stanowiska o 1 cm w prawo, uzyskano następujące wyniki:

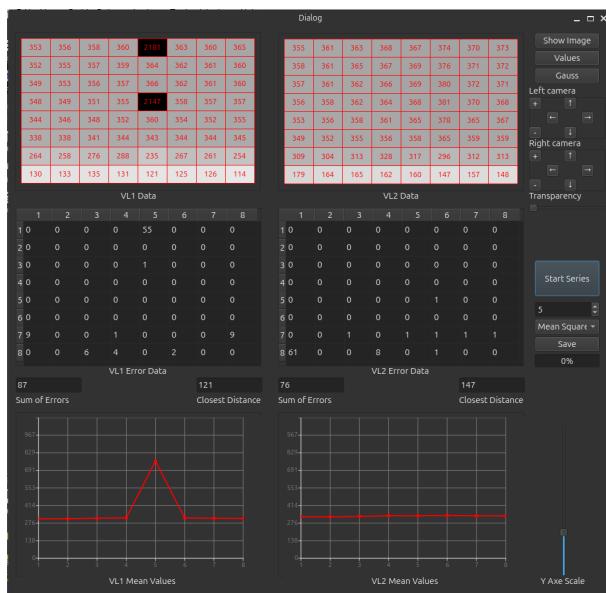


Rysunek 7.27 Maksymalne odchylenie po przesunięciu o 1 cm przy dystansie 20 cm



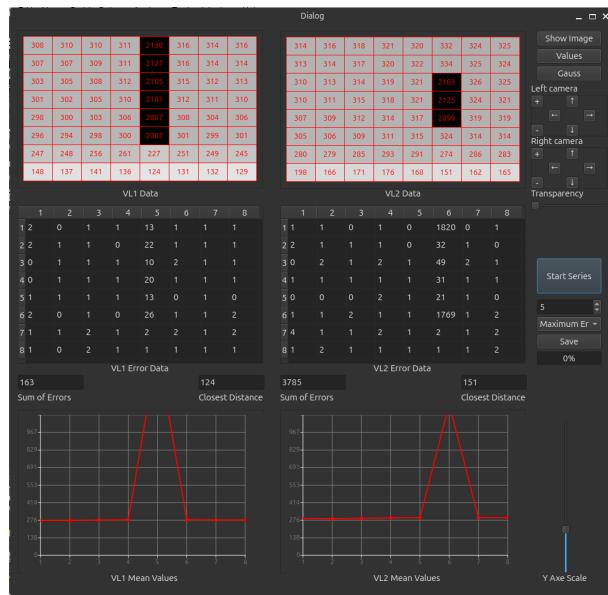
Rysunek 7.28 Błąd średniokwadratowy (MSE) po przesunięciu o 1 cm przy dystansie 20 cm

Podczas testów przy dystansie 40 cm, czujniki nie były w stanie rozróżnić dwóch ścianek. Minimalna odległość umożliwiająca rozróżnienie została określona eksperymentalnie na 35 cm. Poniżej przedstawiono wyniki:

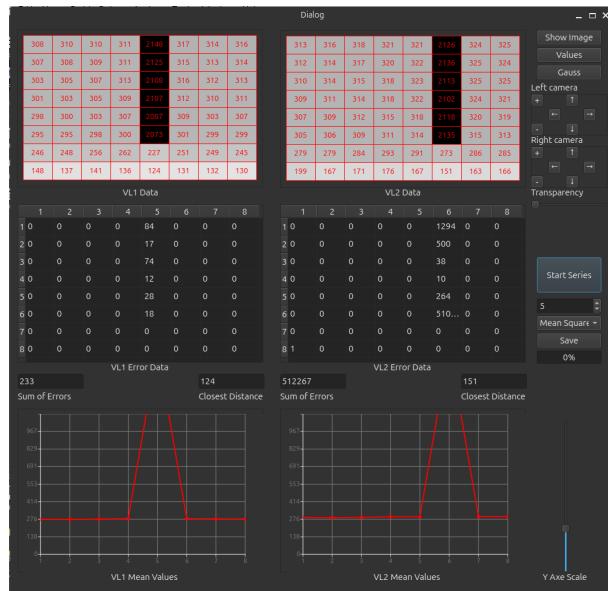


Rysunek 7.29 Dane dla dwóch czujników przy minimalnym dystansie 35 cm

Następnie przeprowadzono testy przy dystansie 30 cm. Wyniki przedstawiono poniżej:

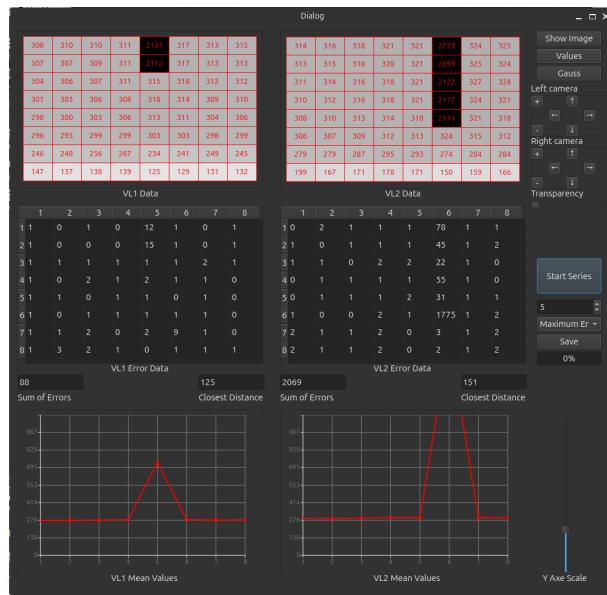


Rysunek 7.30 Maksymalne odchylenie przy dystansie 30 cm

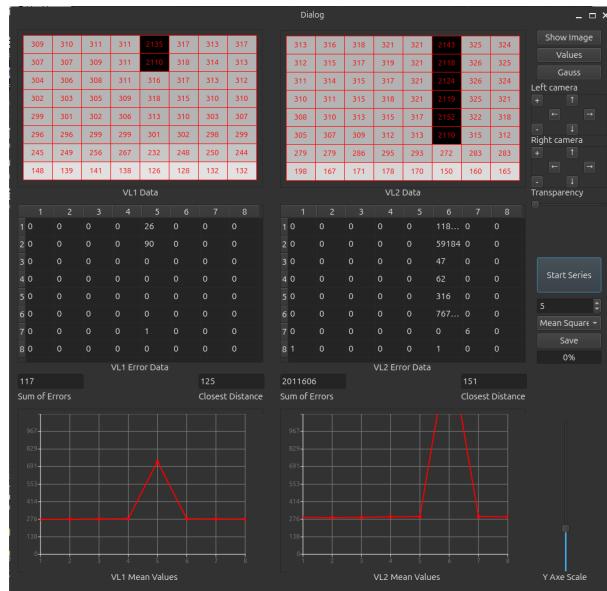


Rysunek 7.31 Błąd średniokwadratowy (MSE) przy dystansie 30 cm

Po przesunięciu stanowiska o 1 cm w prawo, wyniki wyglądają następująco:

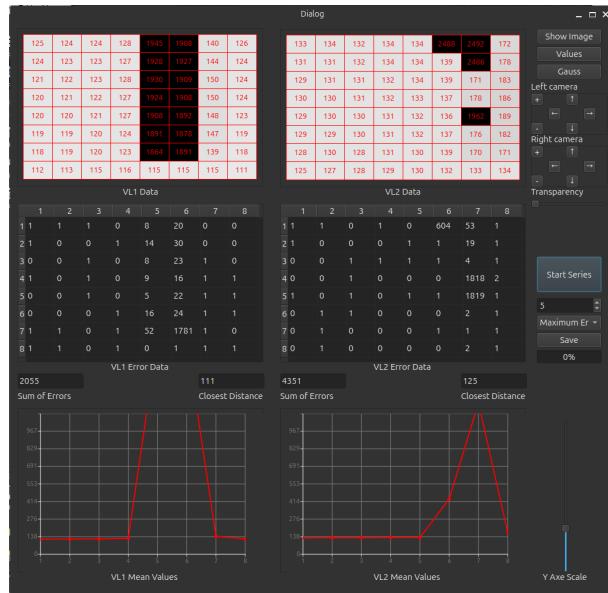


Rysunek 7.32 Maksymalne odchylenie po przesunięciu o 1 cm przy dystansie 30 cm

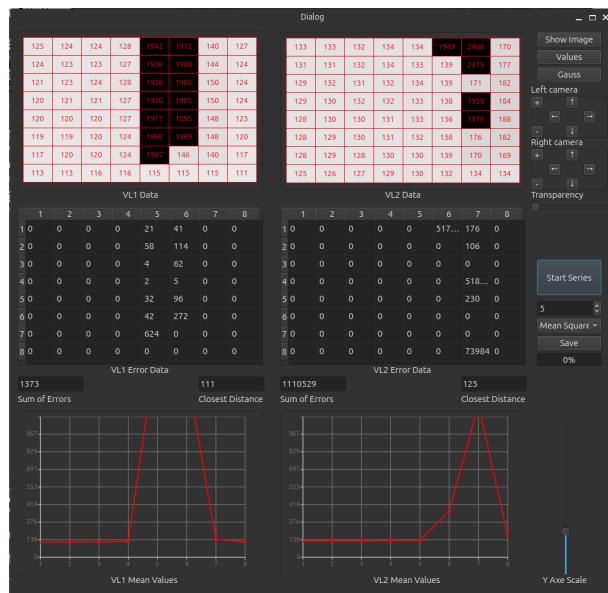


Rysunek 7.33 Błąd średniokwadratowy (MSE) po przesunięciu o 1 cm przy dystansie 30 cm

Na koniec przeprowadzono pomiary przy dystansie 10 cm. Wyniki są przedstawione poniżej:

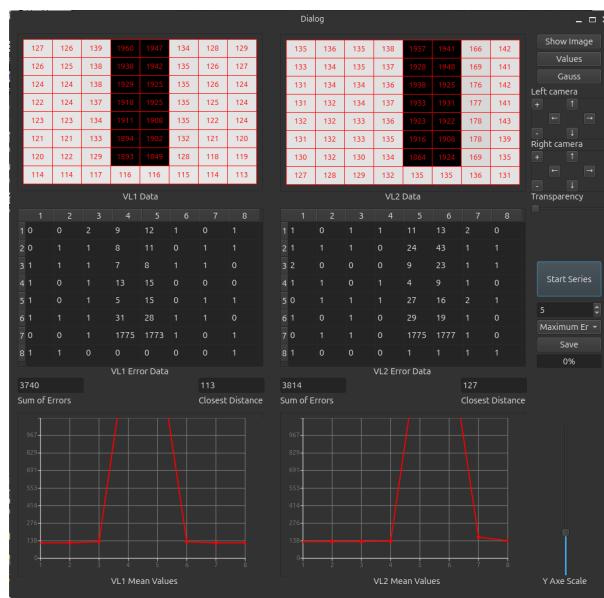


Rysunek 7.34 Maksymalne odchylenie przy dystansie 10 cm

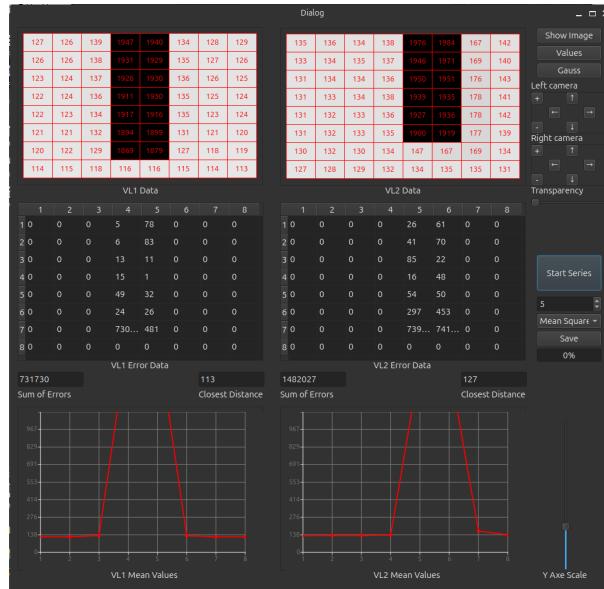


Rysunek 7.35 Błąd średniokwadratowy (MSE) przy dystansie 10 cm

Po przesunięciu stanowiska o 1 cm w prawo:



Rysunek 7.36 Maksymalne odchylenie po przesunięciu o 1 cm przy dystansie 10 cm



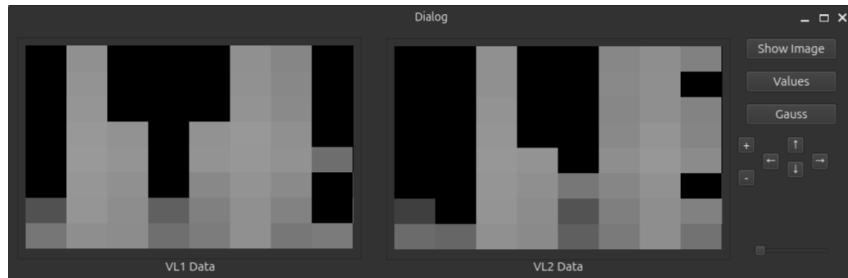
Rysunek 7.37 Błąd średniokwadratowy (MSE) po przesunięciu o 1 cm przy dystansie 10 cm

Dla przeprowadzenia testów z innym obiektem zastosowano dwie aluminiowe rury ustawione w odległości 5 cm od siebie. Obraz badanej sceny pokazany niżej:



Rysunek 7.38 Obraz z czujników przy odległości 20 cm

Najpierw przeprowadzono pomiary dla odległości 20 cm. Wyniki przedstawiono poniżej:



Rysunek 7.39 Obraz z czujników przy odległości 20 cm

M1:E1 Max Error Table:								
M1:E1:R1	44	1	49	17	3	2928	2794	195
M1:E1:R2	14	3	29	34	1	2514	140	222
M1:E1:R3	52	1	17	24	1	2	2420	24
M1:E1:R4	1	1	16	51	1	0	22	47
M1:E1:R5	1	0	26	32	0	1	2319	1691
M1:E1:R6	3	2	1121	2622	1	3	2345	2780
M1:E1:R7	3	0	2476	2420	2	5	4	1594
M1:E1:R8	3	1	2	1	1	1	2	1984

M1:MSE1 MSE Table:								
M1:MSE1:R1	200	0	217	34	0	1882657	887629	2942
M1:MSE1:R2	16	0	109	109	0	1458607	1523	3336
M1:MSE1:R3	278	0	28	73	0	0	1055768	52
M1:MSE1:R4	0	0	26	249	0	0	82	179
M1:MSE1:R5	0	0	69	93	0	0	828223	678965
M1:MSE1:R6	0	0	92448	590507	0	0	1340568	394187
M1:MSE1:R7	0	0	550369	526448	0	1	1	628710
M1:MSE1:R8	1	0	0	0	0	0	0	700492

Rysunek 7.40 Błędy dla pierwszego czujnika przy odległości 20 cm

Po przesunięciu stanowiska o 1 cm w prawo, uzyskano następujące wyniki:

M1:E1 Max Error Table:								
M1:E1:R1	19	2	34	14	2542	1	3	2547
M1:E1:R2	13	1	19	16	2676	1	2302	182
M1:E1:R3	13	1	27	26	2826	1	9	2524
M1:E1:R4	18	0	85	44	0	1	1	67
M1:E1:R5	14	1	83	23	1	1	2124	1687
M1:E1:R6	105	2	4	925	2	1	2694	1640
M1:E1:R7	2268	2	5	2512	2	2	4	1628
M1:E1:R8	4	2	2	1	1	2	3	1994

M1:MSE1 MSE Table:								
M1:MSE1:R1	35	0	131	14	1507126	0	1	996884
M1:MSE1:R2	16	0	40	27	1106706	0	1111119	2201
M1:MSE1:R3	14	0	70	48	1857923	0	6	562851
M1:MSE1:R4	33	0	547	129	0	0	0	360
M1:MSE1:R5	24	0	582	43	0	0	405599	657327
M1:MSE1:R6	1027	0	1	104792	0	0	1023659	411369
M1:MSE1:R7	816774	0	1	1255502	0	0	1	645129
M1:MSE1:R8	1	0	0	0	0	0	808145	

Rysunek 7.42 Błędy dla pierwszego czujnika po przesunięciu o 1 cm

M1:E2 Max Error Table:								
M1:E2:R1	22	2517	1	12	89	2	4	2411
M1:E2:R2	13	47	921	20	2694	1	3	2528
M1:E2:R3	15	2540	2632	29	191	1	1	1827
M1:E2:R4	11	1	1	45	58	1	2	2527
M1:E2:R5	20	2	1	35	1835	1	1	1733
M1:E2:R6	157	2446	2	1418	3	2	2	38
M1:E2:R7	13	3	1	2546	2506	2	3	1659
M1:E2:R8	4	2	2	3	3	3	6	3

M1:MSE2 MSE Table:								
M1:MSE2:R1	54	1308931	0	10	557	0	2	1123700
M1:MSE2:R2	19	249	76176	49	597954	0	0	1481203
M1:MSE2:R3	16	1576045	623257	86	2649	0	0	503902
M1:MSE2:R4	12	0	0	153	333	0	0	1301893
M1:MSE2:R5	31	0	0	115	532916	0	0	471801
M1:MSE2:R6	1911	538364	0	292329	0	0	0	143
M1:MSE2:R7	14	0	0	1029529	561509	0	0	239735
M1:MSE2:R8	1	0	0	1	1	1	2	0

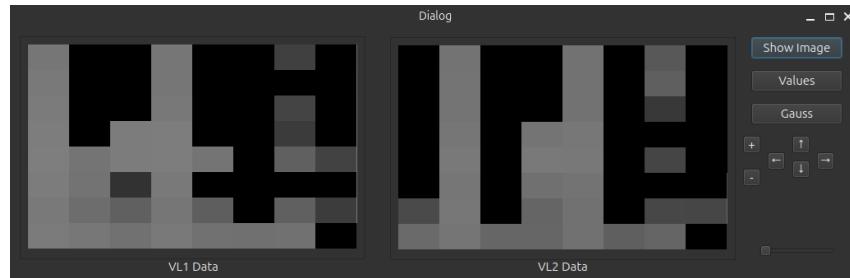
Rysunek 7.41 Błędy dla drugiego czujnika przy odległości 20 cm

M1:E2 Max Error Table:								
M1:E2:R1	27	37	2	17	182	3	3	1851
M1:E2:R2	15	12	2	62	100	2	1	2498
M1:E2:R3	12	16	2	47	123	2465	1	1859
M1:E2:R4	18	17	1	53	49	1	1	2552
M1:E2:R5	18	61	1	2	1866	1	0	1764
M1:E2:R6	256	58	2	2	451	2	2	61
M1:E2:R7	13	2380	1	2	2642	2	1	1665
M1:E2:R8	2187	2381	3	2	2	1	2	2

M1:MSE2 MSE Table:								
M1:MSE2:R1	69	94	0	32	2360	0	0	307311
M1:MSE2:R2	24	13	0	302	1521	0	0	1055168
M1:MSE2:R3	9	22	0	241	1928	546515	0	671657
M1:MSE2:R4	22	30	0	340	174	0	0	530853
M1:MSE2:R5	29	400	0	0	531082	0	0	490860
M1:MSE2:R6	5041	225	0	0	41232	0	0	341
M1:MSE2:R7	18	501186	0	0	1058973	0	0	244916
M1:MSE2:R8	429550	875948	0	0	0	0	0	0

Rysunek 7.43 Błędy dla drugiego czujnika po przesunięciu o 1 cm

Przeprowadzono pomiary dla odległości 25 cm. Wyniki przedstawiono poniżej:



Rysunek 7.44 Obraz z czujników przy odległości 25 cm

M1:E1 Max Error Table:							
M1:E1:R1	7	40	51	2	100	56	2417
M1:E1:R2	2	23	40	2	61	45	138
M1:E1:R3	1	17	32	1	51	89	1805
M1:E1:R4	1	52	1	0	76	61	16
M1:E1:R5	0	1237	1	1	2446	84	2298
M1:E1:R6	1	6	3	1	2396	81	2623
M1:E1:R7	4	3	3	4	2	2310	1663
M1:E1:R8	2	4	2	1	4	2	1684
M1:E1:R9	5	115	206	0	654	266	778099
M1:MSE1:R1	0	45	140	0	271	190	1340
M1:MSE1:R2	0	30	95	0	217	771	665977
M1:MSE1:R3	0	269	0	0	598	233	21
M1:MSE1:R4	0	338476	0	0	515635	619	1187469
M1:MSE1:R5	0	3	1	0	852212	378	1176833
M1:MSE1:R6	2	0	1	1	451499	558833	688512
M1:MSE1:R7	0	1	0	0	581225	483	

Rysunek 7.45 Błędy dla pierwszego czujnika przy odległości 25 cm

Po przesunięciu o 1 cm:

M1:E1 Max Error Table:							
M1:E1:R1	50	2527	51	2599	2927	52	2547
M1:E1:R2	27	164	24	2583	2531	36	2409
M1:E1:R3	28	1	14	2	49	56	26
M1:E1:R4	2	1	38	2	1	70	1671
M1:E1:R5	1	1	32	1	1	42	2258
M1:E1:R6	5	2	1093	2	2413	85	2660
M1:E1:R7	2	1	6	3	4	2372	8
M1:E1:R8	2	1	2	1	4	2	3
M1:MSE1:R1	181	1298931	212	607205	747886	210	580166
M1:MSE1:R2	78	2042	47	1051316	1265430	138	898535
M1:MSE1:R3	0	23	0	256	367	78	676
M1:MSE1:R4	0	0	155	0	0	374	247655
M1:MSE1:R5	0	0	109	0	0	256	1201791
M1:MSE1:R6	2	0	103106	0	914224	622	1212893
M1:MSE1:R7	0	0	2	0	1	452461	8
M1:MSE1:R8	0	0	0	1	0	0	746

Rysunek 7.47 Błędy dla pierwszego czujnika po przesunięciu o 1 cm

M1:E2 Max Error Table:							
M1:E2:R1	32	2	35	44	2780	247	2677
M1:E2:R2	18	2	64	41	4	76	2467
M1:E2:R3	13	2	30	68	3	38	2344
M1:E2:R4	29	2	27	2	1	49	2397
M1:E2:R5	30	1	28	1	1	2446	2292
M1:E2:R6	2371	2	1762	4	2	99	2376
M1:E2:R7	2369	2	2540	3	3	2320	25
M1:E2:R8	4	2	1	3	2	2	3
M1:MSE2:R1	85	0	90	168	1235210	9755	1542212
M1:MSE2:R2	37	0	321	154	1	664	1426151
M1:MSE2:R3	10	0	65	377	0	84	491180
M1:MSE2:R4	102	0	57	0	0	244	1312247
M1:MSE2:R5	67	0	67	0	0	522431	816591
M1:MSE2:R6	716902	0	574962	1	0	684	1122310
M1:MSE2:R7	500064	0	1541359	1	0	848555	76
M1:MSE2:R8	1	0	0	0	0	1	9391

Rysunek 7.46 Błędy dla drugiego czujnika przy odległości 25 cm

M1:E2 Max Error Table:							
M1:E2:R1	26	2573	45	13	2	2833	2611
M1:E2:R2	14	2492	38	22	2	2516	2398
M1:E2:R3	12	2	52	29	2	67	2401
M1:E2:R4	16	0	60	48	1	2489	2369
M1:E2:R5	18	1	1	28	1	1	25
M1:E2:R6	116	2	4	1835	1	2453	2354
M1:E2:R7	2315	1	2	5	2	5	2403
M1:E2:R8	4	2	3	4	1	3	2049
M1:MSE2:R1	180	22	0	680108	1599151	1112981	
M1:MSE2:R2	104	47	0	555979	879105	938	
M1:MSE2:R3	14	0	228	80	0	523	847361
M1:MSE2:R4	33	0	257	195	0	544695	1253911
M1:MSE2:R5	25	0	81	0	0	78	1155630
M1:MSE2:R6	1607	0	713017	0	1199814	1359899	974764
M1:MSE2:R7	480074	0	0	4	0	2	515289
M1:MSE2:R8	1	0	1	0	0	1	883497

Rysunek 7.48 Błędy dla drugiego czujnika po przesunięciu o 1 cm

Przeprowadzono pomiary dla odległości 35 cm, które przedstawiono poniżej:



Rysunek 7.49 Obraz z czujników przy odległości 35 cm

M1:E1 Max Error Table:								
M1:E1:R1	32	64	43	2546	104	320	2507	2521
M1:E1:R2	15	3	26	2858	57	52	2554	99
M1:E1:R3	19	2	35	3	28	2430	1748	87
M1:E1:R4	242	2	1	1	91	69	139	49
M1:E1:R5	5	1	2	1	2392	101	2294	2191
M1:E1:R6	12	3	6	3	2396	218	1737	2786
M1:E1:R7	4	2	5	3	2382	2395	1659	175
M1:E1:R8	4	2	2	3	4	4	1780	20

M1:MSE1 MSE Table:								
M1:MSE1:R1	81	432	152	1002347	636	11694	1312833	1177633
M1:MSE1:R2	25	0	54	1931062	212	183	539300	881
M1:MSE1:R3	34	0	92	1	70	1314818	271240	431
M1:MSE1:R4	1241329	0	0	0	577	569	1196	232
M1:MSE1:R5	2	0	0	0	894143	850	879191	299794
M1:MSE1:R6	12	0	4	1	506145	3339	674631	672221
M1:MSE1:R7	1	0	2	0	1151747	1272576	637866	3685
M1:MSE1:R8	1	0	0	0	1	1	454765	37

Rysunek 7.50 Błędy dla pierwszego czujnika przy odległości 35 cm

Po przesunięciu o 1 cm:

M1:E1 Max Error Table:								
M1:E1:R1	26	2567	46	2867	287	2869	2560	2140
M1:E1:R2	17	4	44	2452	2508	2494	2535	232
M1:E1:R3	19	2	17	3	44	2407	1873	2489
M1:E1:R4	28	3	2	1	2461	95	55	2367
M1:E1:R5	29	1	3	1	2448	2387	1791	77
M1:E1:R6	2382	2	11	2	2465	115	1715	2740
M1:E1:R7	2394	1	4	2	2367	2315	1680	40
M1:E1:R8	4	1	1	3	4	3	1801	45

M1:MSE1 MSE Table:								
M1:MSE1:R1	46	1530588	202	1587929	6955	711687	997685	406343
M1:MSE1:R2	24	1	143	539737	984995	976850	1461136	4047
M1:MSE1:R3	46	0	33	0	187	872850	667698	944848
M1:MSE1:R4	30	0	0	0	523686	985	362	492395
M1:MSE1:R5	55	0	1	0	916590	493663	477692	624
M1:MSE1:R6	1167968	0	9	0	1380522	1214	468141	1513538
M1:MSE1:R7	888856	0	1	0	503438	829460	567384	136
M1:MSE1:R8	1	0	0	1	0	719180	159	

Rysunek 7.52 Błędy dla pierwszego czujnika po przesunięciu o 1 cm

M1:E2 Max Error Table:								
M1:E2:R1	25	2531	30	2554	2766	218	2502	2062
M1:E2:R2	18	50	60	2578	2493	61	2392	75
M1:E2:R3	15	3	17	2668	2491	54	54	81
M1:E2:R4	15	4	24	1	2	68	2372	19
M1:E2:R5	27	1	3	1	2	2440	66	2511
M1:E2:R6	2233	4	6	3	414	2367	30	2844
M1:E2:R7	18	3	4	3	2332	48	2911	
M1:E2:R8	5	2	2	2	4	5	41	

M1:MSE2 MSE Table:								
M1:MSE2:R1	56	561569	109	1016436	654514	5403	829198	851010
M1:MSE2:R2	37	194	233	586024	555835	346	509031	560
M1:MSE2:R3	16	0	28	614396	1443237	172	429	591
M1:MSE2:R4	18	1	43	0	0	465	1011149	39
M1:MSE2:R5	56	0	0	0	0	0	510002	295
M1:MSE2:R6	731943	1	4	1	15189	488528	114	1253981
M1:MSE2:R7	8	0	1	1	1	1115225	297	742098
M1:MSE2:R8	1	0	0	0	0	1	2	143

Rysunek 7.51 Błędy dla drugiego czujnika przy odległości 35 cm

M1:E2 Max Error Table:								
M1:E2:R1	26	45	15	24	2766	226	2592	2146
M1:E2:R2	24	29	39	20	2525	2486	2470	82
M1:E2:R3	14	35	44	35	2468	32	62	2440
M1:E2:R4	19	3	2	3	2	2423	2315	33
M1:E2:R5	18	1	2	2	2	2405	47	2495
M1:E2:R6	2249	2	2	3	5	2388	27	2841
M1:E2:R7	2340	1	2	5	2	2360	31	69
M1:E2:R8	5	3	1	2	2	4	1737	34

M1:MSE2 MSE Table:								
M1:MSE2:R1	60	146	18	77	1483235	3793	1230089	1007755
M1:MSE2:R2	40	95	113	43	967123	1265337	545698	649
M1:MSE2:R3	20	90	193	133	961231	108	249	518730
M1:MSE2:R4	25	0	0	0	0	524291	668242	87
M1:MSE2:R5	10	0	0	0	0	1188794	183	1256265
M1:MSE2:R6	413336	0	0	0	2	501362	92	1247486
M1:MSE2:R7	861314	0	0	1	0	854535	63	399
M1:MSE2:R8	1	0	0	0	1	270644	117	

Rysunek 7.53 Błędy dla drugiego czujnika po przesunięciu o 1 cm

Przeprowadzone testy z zastosowaniem aluminiowych rur wykazały, że:

- Największe błędy występują w obszarze pomiędzy obiektami (rurami lub ściankami), co jest związane z efektami brzegowymi oraz zakłócieniami sygnału ToF.
- Minimalna odległość umożliwiająca rozróżnienie dwóch obiektów (rur lub ścianek) wynosi 35 cm.
- Przy mniejszych odległościach (10 cm i 20 cm) czujniki wykazują większą precyzję w centralnym obszarze, jednak błędy na krawędziach pozostają istotne.
- Aluminiowe rury bardziej odbijają sygnały ToF w porównaniu do ścianek, co skutkuje intensywniejszymi błędami w obszarach brzegowych.

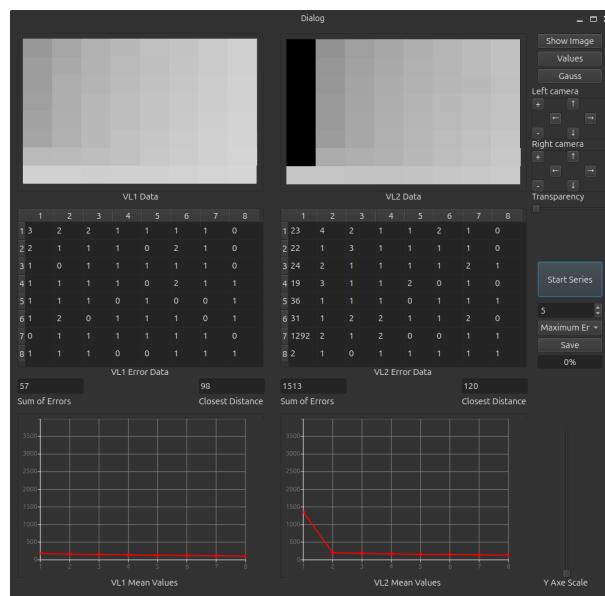
7.1.4 Zbadanie zmiany kąta ustawienia ścianki

Celem tego zadania jest stwierdzenie wpływu rozdzielczości czujników ToF oraz efektów brzegowych na jakość aproksymowania nachylonej ścianki przez fragment płaszczyzny. Przebieg realizacji pomiaru:

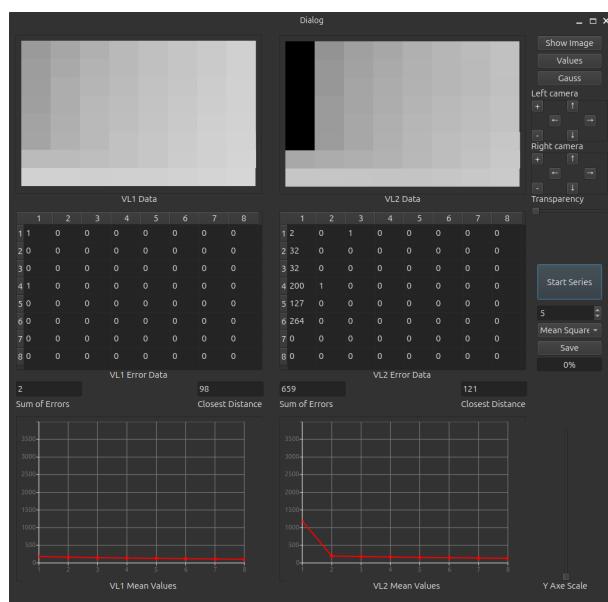
- Ściankę należy ustawić pod kątem 45° w trzech odległościach.
- Po przeprowadzeniu każdej serii pomiarów dla poszczególnych odległości należy ze składować otrzymane wartości na dysku. W pojedynczej serii dla danej pozycji ścianki powinno być wykonanych co najmniej 5 pomiarów.

Wyniki testów

Pierwszy pomiar wykonano przy odległości 10 cm od ścianki. Wyniki przedstawiono na poniższych rysunkach.

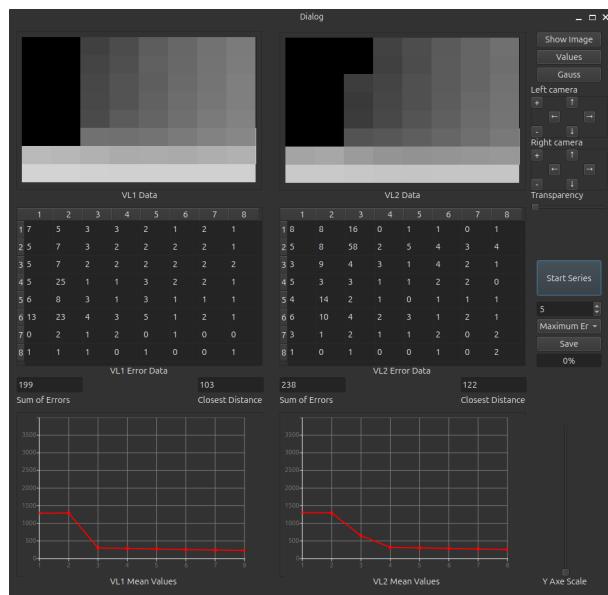


Rysunek 7.54 Badanie ścianki na odległości 10 cm, maxymalne odchylenie

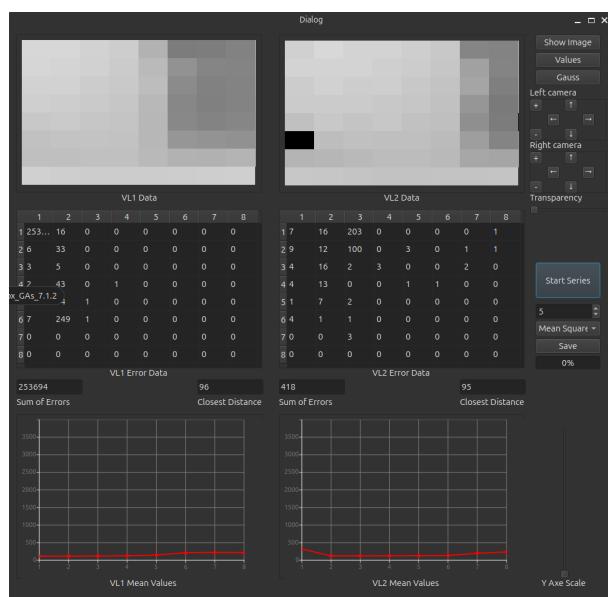


Rysunek 7.55 Badanie ścianki na odległości 10 cm, błąd średniokwadratowy

Kolejny pomiar wykonano po zwiększeniu odległości do 30 cm.

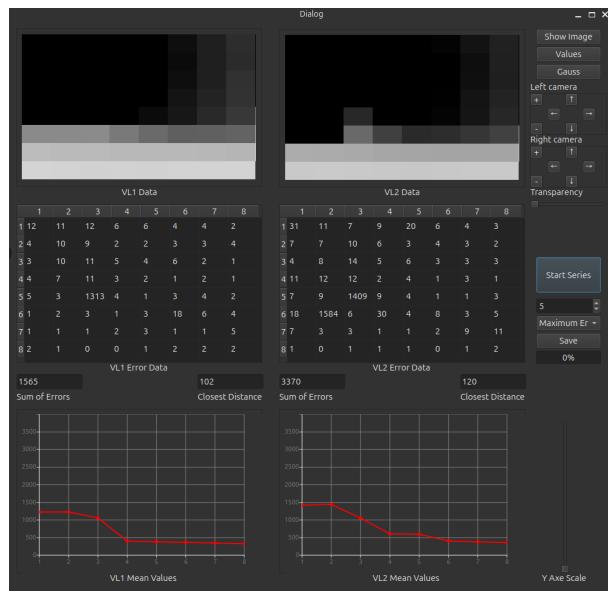


Rysunek 7.56 Badanie ścianki na odległości 30 cm, maxymalne odchylenie

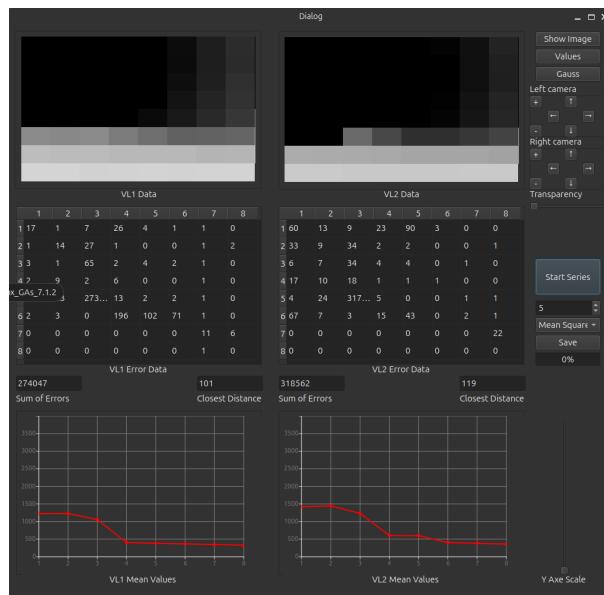


Rysunek 7.57 Badanie ścianki na odległość 30 cm, błąd średniokwadratowy

Ostatni pomiar przeprowadzono dla odległości 50 cm.



Rysunek 7.58 Badanie ścianki na odległość 50 cm, maxymalne odchylenie



Rysunek 7.59 Badanie ścianki na odległość 50 cm, błąd średniokwadratowy

Zebrane wyniki pokazują wzrost błędów wraz z rosnącą odlegością ścianki od czujników, co potwierdza wpływ efektów brzegowych i zmniejszoną precyzję aproksymacji płaszczyzny w większych dystansach.

7.1.5 Zbadanie wpływu odległości na wskazania czujników termowizyjnych i ToF

Celem tego zadania stopnia zniekształcenia pomiarów spowodowanych ograniczoną rozdzielczością czujników. Wpływ rozdzielczości zwiększa się wraz z odlegością badanego obiektu od czujnika. W ramach ćwiczenia należy zbadać charakter tych zmian, jak też wpływ wydzielanego ciepła na wskazania czujników ToF.

Przebieg realizacji pomiaru:

- Pomiar realizowane są w dwóch fazach. W pierwszej fazie wyznaczane są obrazy głębi za pomocą czujników ToF i obrazy termowizyjne do obiektu w wybranych trzech odległościach.
- W drugiej fazie pomiary te są powtarzane dla tych samych odległości po uprzednim nagrzaniu obiektu do zadanej temperatury.
- Po przeprowadzeniu każdej serii pomiarów dla poszczególnych odległości należy ze składować otrzymane wartości na dysku. W pojedynczej serii dla danej pozycji ścianki powinno być wykonanych co najmniej 5 pomiarów.

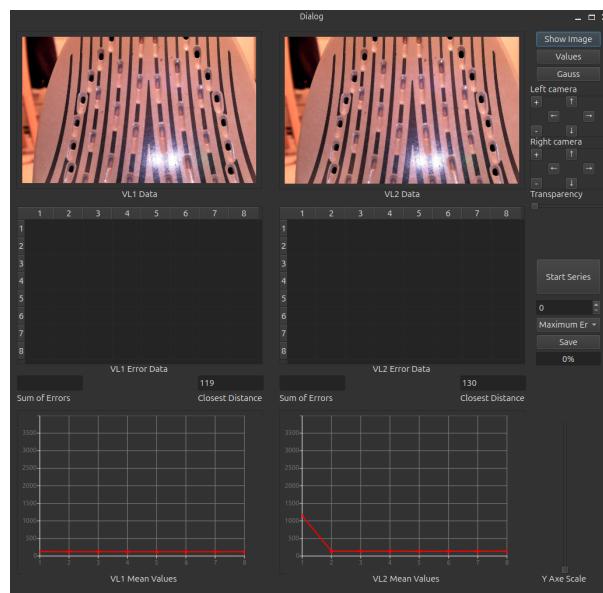
Wyniki testów

Jak opisano wyżej, pomiary były realizowane w dwie fazy: najpierw obiekt nie był nagrzany, a następnie po nagrzaniu.

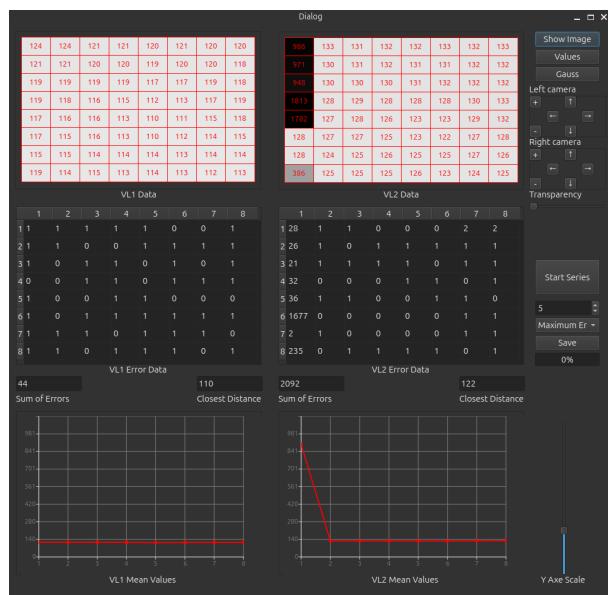


Rysunek 7.60 Widok badanej sceny

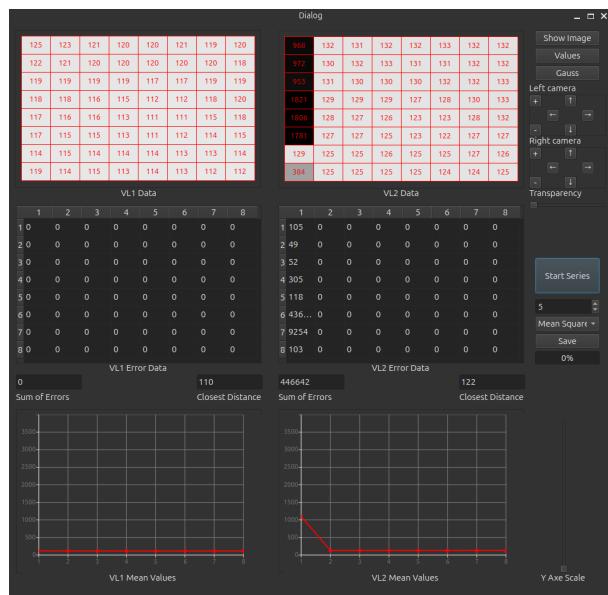
Pierwsza seria dla odległości 10 cm:



Rysunek 7.61 Widok z kamery przed nagrzaniem obiektu dla odległości 10 cm

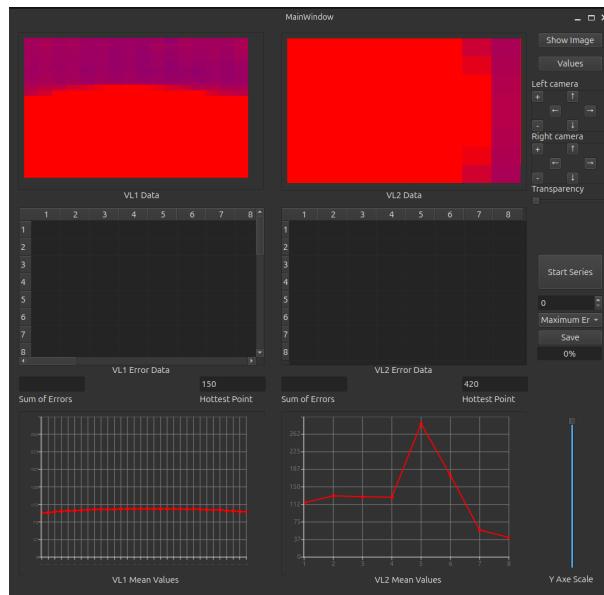


Rysunek 7.62 Maksymalne odchylenie przed nagrzaniem dla odległości 10 cm

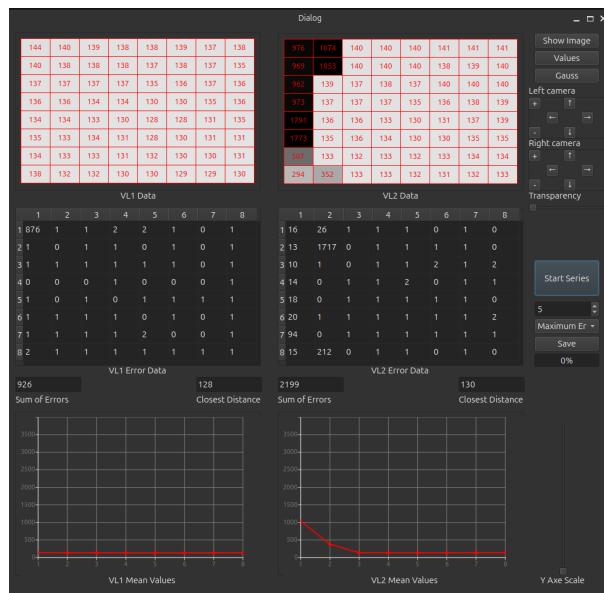


Rysunek 7.63 Błąd średniokwadratowy przed nagrzaniem dla odległości 10 cm

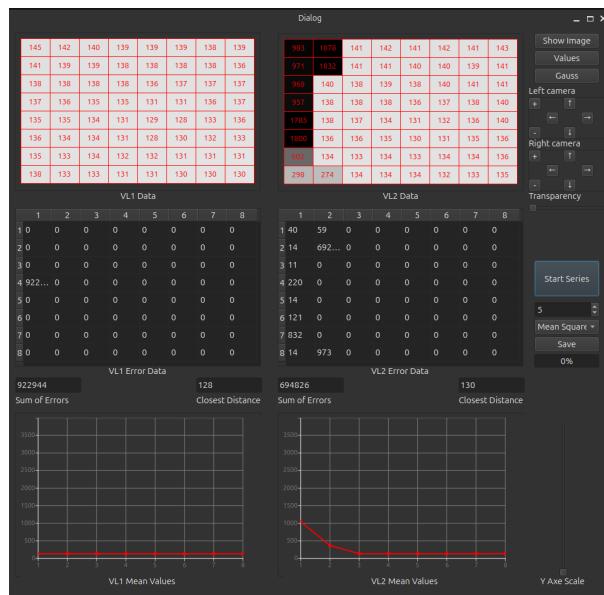
Po nagrzaniu obiektu:



Rysunek 7.64 Obraz termowizyjny dla odległości 10 cm

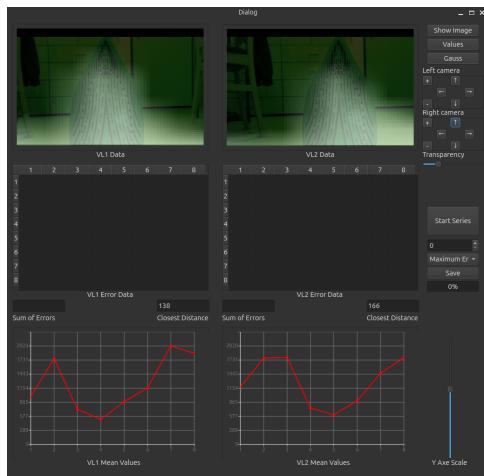


Rysunek 7.65 Maksymalne odchylenie po nagrzaniu dla odległości 10 cm

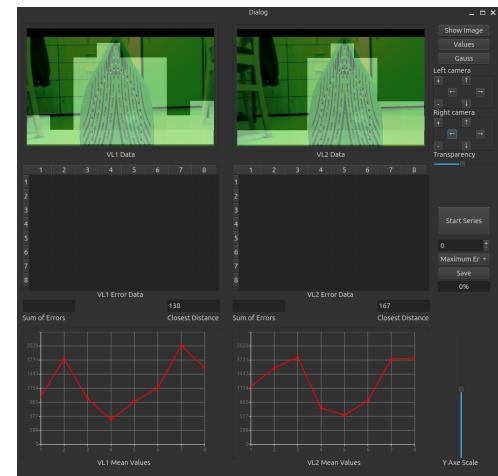


Rysunek 7.66 Błąd średniokwadratowy po nagrzaniu dla odległości 10 cm

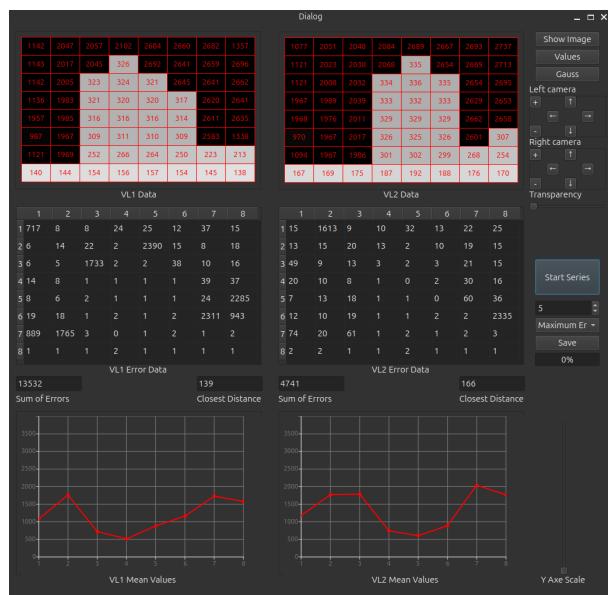
Druga seria dla odległości 30 cm:



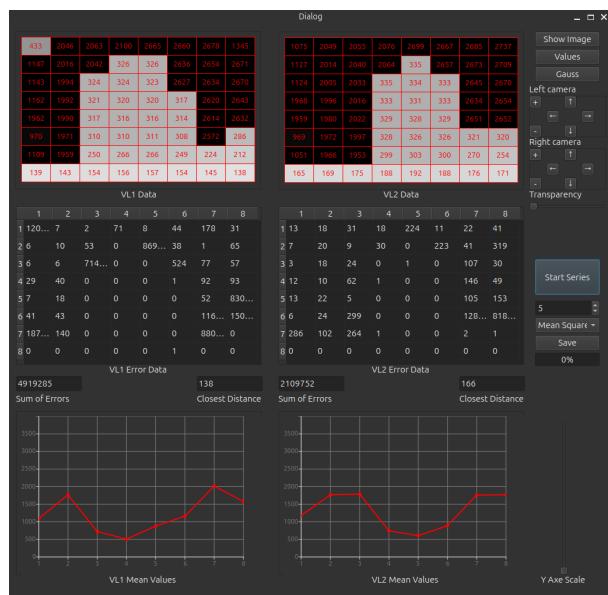
Rysunek 7.67 Widok widgetów z filtrem Gaussa i półprzezroczystości dla odległości 30 cm



Rysunek 7.68 Widok widgetów z filtrem półprzezroczystości dla odległości 30 cm

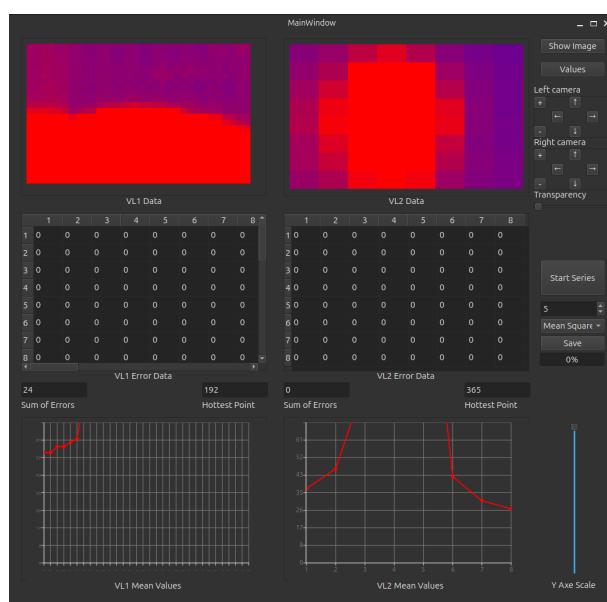


Rysunek 7.69 Maksymalne odchylenie przed nagrzaniem dla odległości 30 cm

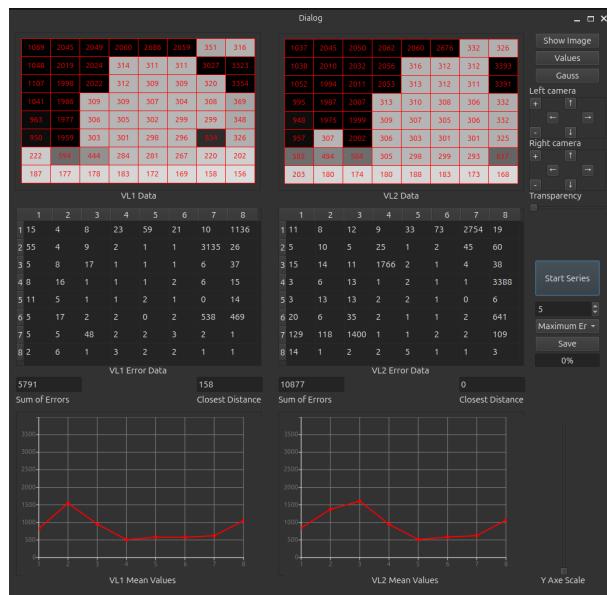


Rysunek 7.70 Błąd średniokwadratowy przed nagrzaniem dla odległości 30 cm

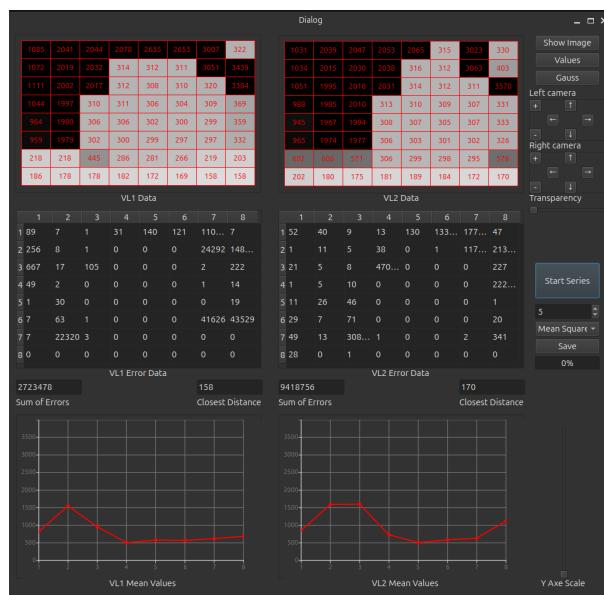
Po nagrzaniu obiektu:



Rysunek 7.71 Obraz termowizyjny dla odległości 30 cm

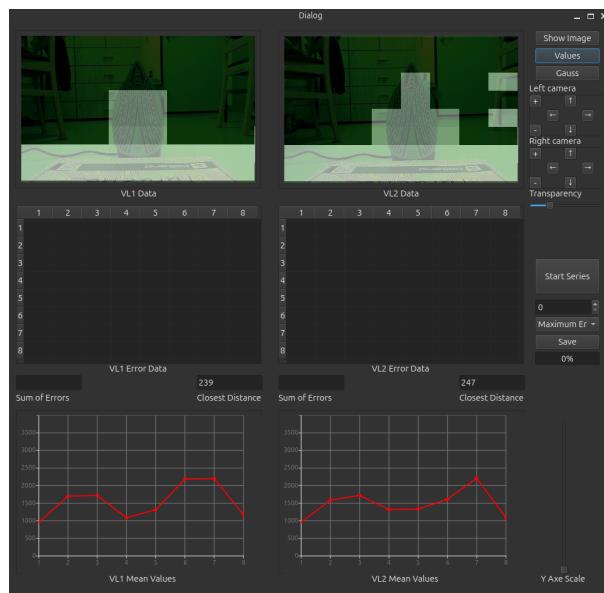


Rysunek 7.72 Maksymalne odchylenie po nagrzaniu dla odległości 30 cm

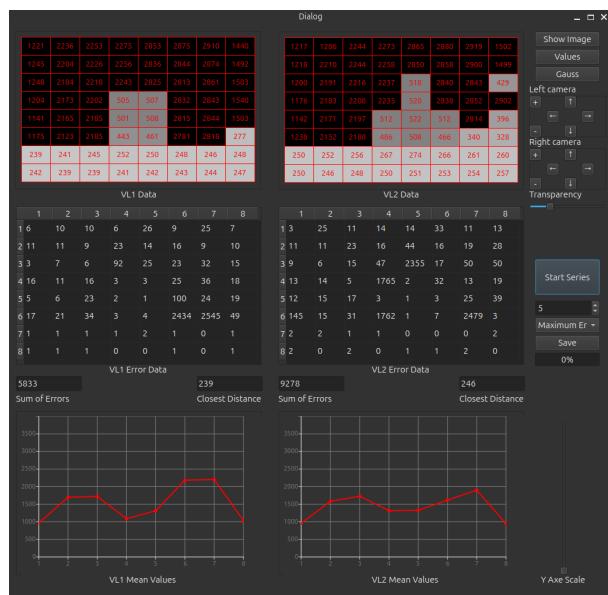


Rysunek 7.73 Błąd średniokwadratowy po nagrzaniu dla odległości 30 cm

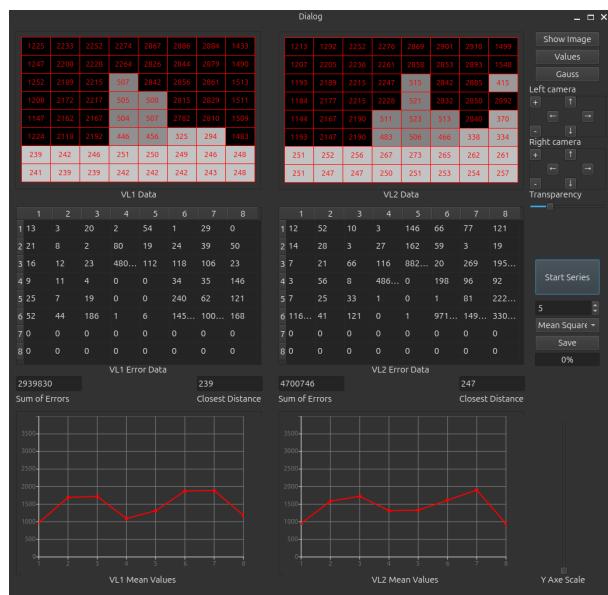
Trzecia seria dla odległości 50 cm:



Rysunek 7.74 Widok widgetów z filtrem półprzezroczystości dla odległości 50 cm

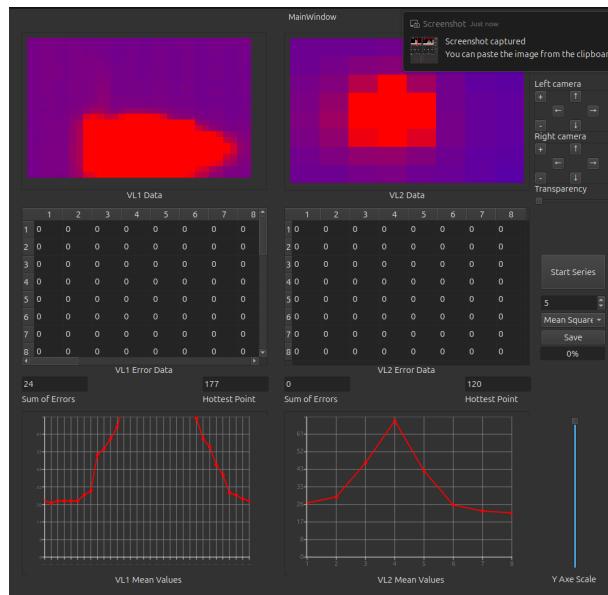


Rysunek 7.75 Maksymalne odchylenie przed nagrzaniem dla odległości 50 cm

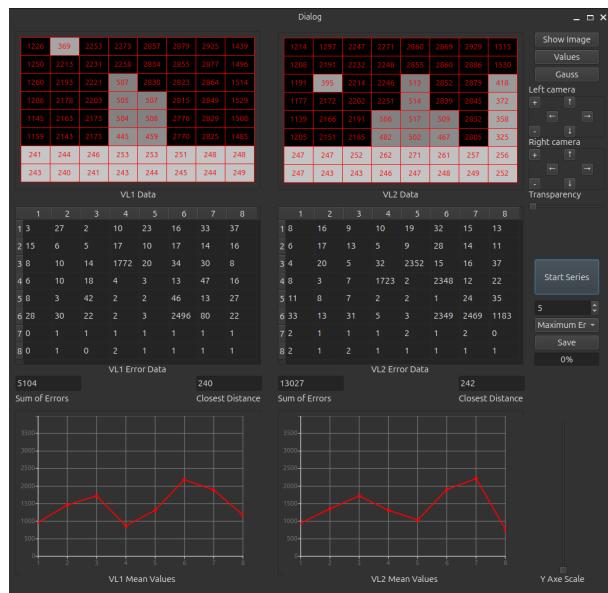


Rysunek 7.76 Błąd średniokwadratowy przed nagrzaniem dla odległości 50 cm

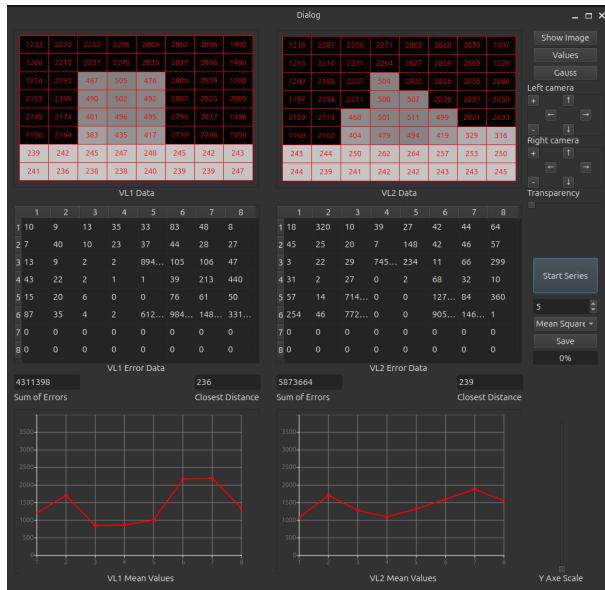
Po nagrzaniu obiektu:



Rysunek 7.77 Obraz termowizyjny dla odległości 50 cm



Rysunek 7.78 Maksymalne odchylenie po nagrzaniu dla odległości 50 cm



Rysunek 7.79 Błąd średniokwadratowy po nagrzaniu dla odległości 50 cm

Ze wszystkich zebranych danych można wnioskować, że poziom nagrzania badanego obiektu nie wpływa na wskazania czujników ToF. Wszystkie zaobserwowane błędy są wynikiem efektów brzegowych, a także potencjalnych zakłóceń związanych z rozpraszaniem sygnału przy większych odległościach.

7.1.6 Zbadanie wpływu nachylenia nagrzewanej powierzchni na wskazania czujników termowizyjnych

Celem tego zadania stopnia znieksztalconia pomiarów spowodowanych ograniczoną rozzielcością czujników, jak też zmianą orientacji obiektu.

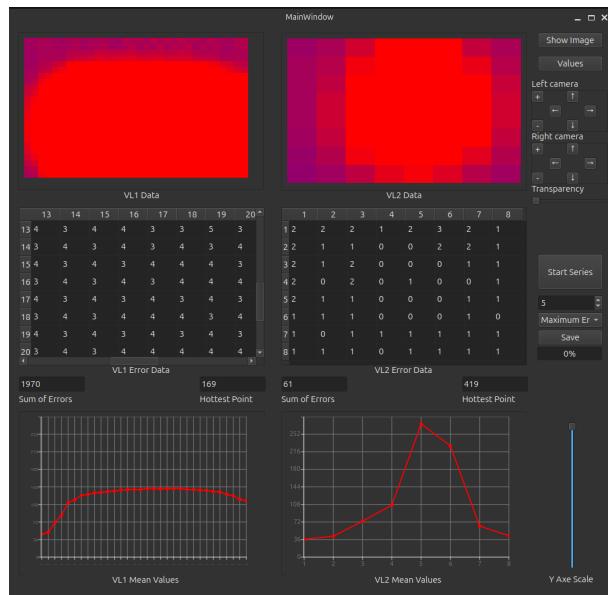
Przebieg realizacji pomiaru:

- W zadanych dwóch odległościach obiekt o podgrzewanej powierzchni należy ustawić w trzech różnych orientacjach względem osi optycznej czujników, tzn. 0° , 30° i 60° ,
- Po przeprowadzeniu każdej serii pomiarów dla poszczególnych odległości i orientacji obiektów należy zeskładować otrzymane wartości na dysku. W pojedynczej serii dla danej pozycji ścianki powinno być wykonanych co najmniej 5 pomiarów.

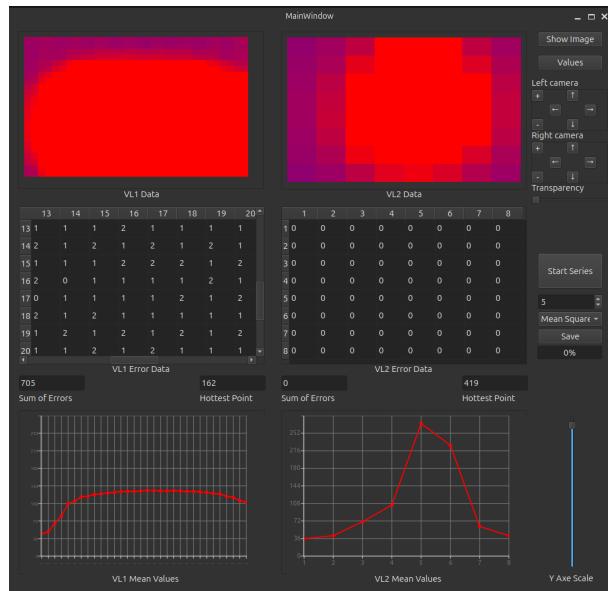
Wyniki testów

Testy były realizowane na tym samym obiekcie, z tą różnicą, że był on ustawiany pod różnymi kątami względem osi optycznej stanowiska pomiarowego.

Odległość 20 cm, kąt 0° :

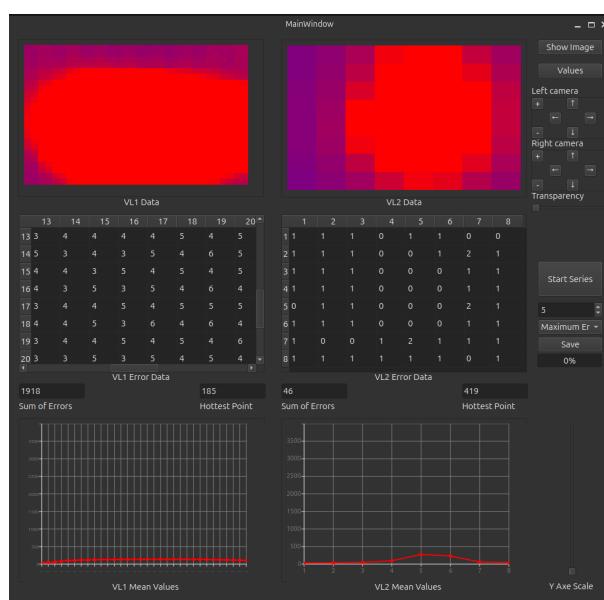


Rysunek 7.80 Maksymalne odchylenie dla odległości 20 cm i kąta 0°

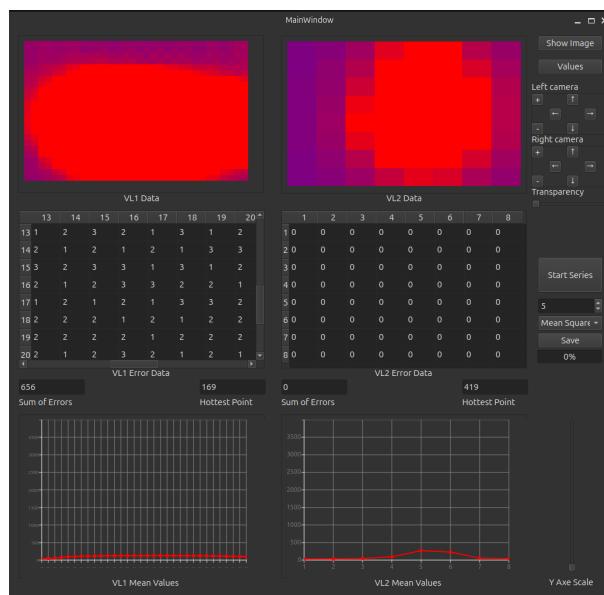


Rysunek 7.81 Błąd średniokwadratowy dla odległości 20 cm i kąta 0°

Odległość 20 cm, kąt 30°:

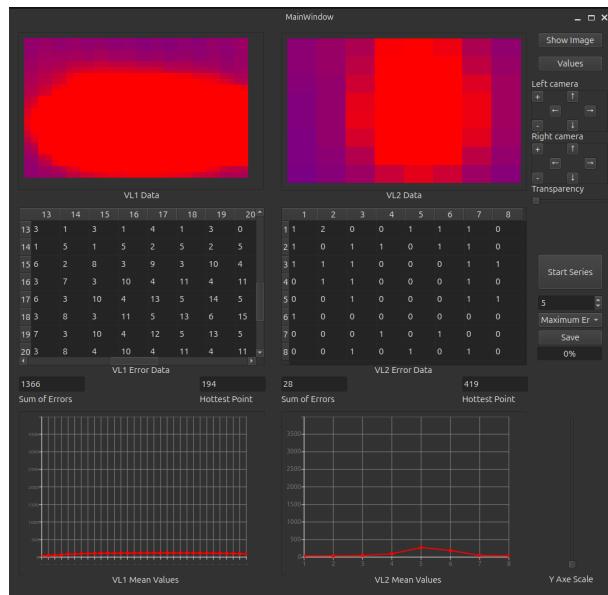


Rysunek 7.82 Maksymalne odchylenie dla odległości 20 cm i kąta 30°

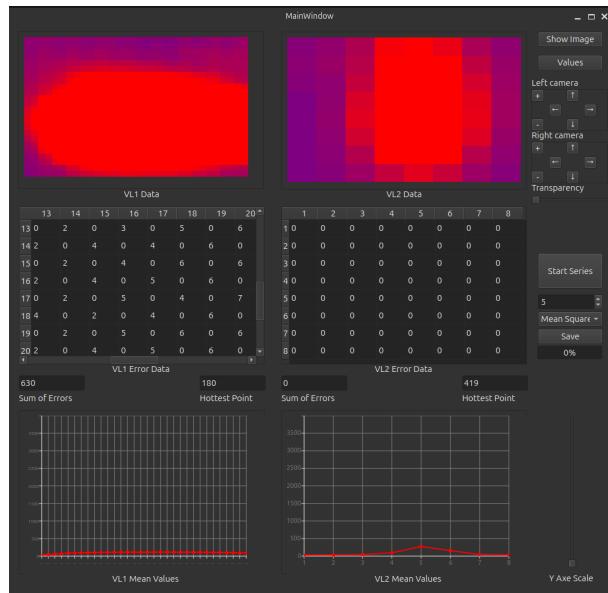


Rysunek 7.83 Błąd średniokwadratowy dla odległości 20 cm i kąta 30°

Odległość 20 cm, kąt 60° :

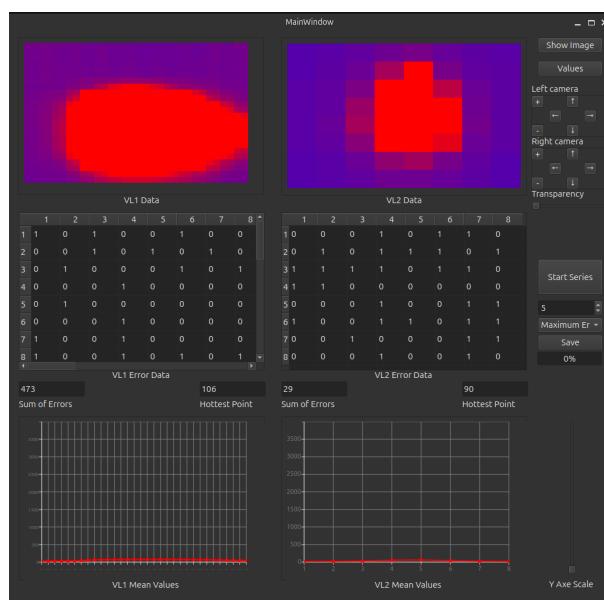


Rysunek 7.84 Maksymalne odchylenie dla odległości 20 cm i kąta 60°

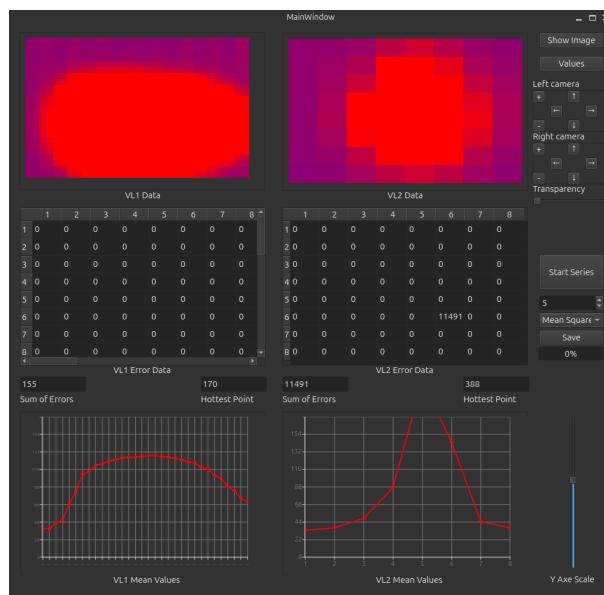


Rysunek 7.85 Błąd średniokwadratowy dla odległości 20 cm i kąta 60°

Odległość 30 cm, kąt 0°:

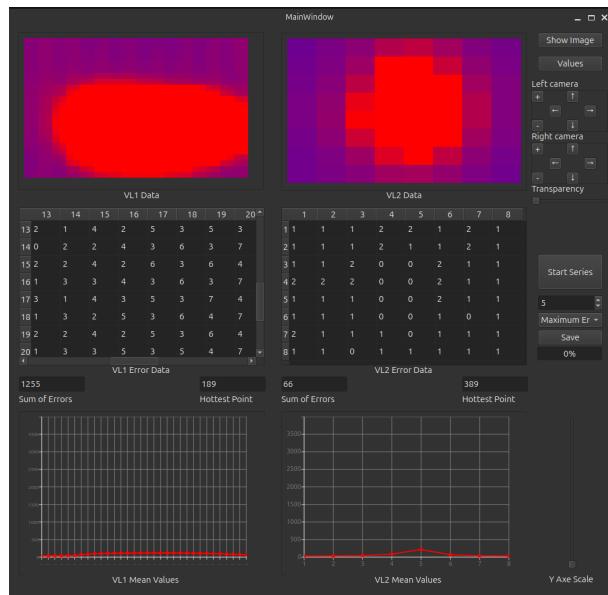


Rysunek 7.86 Maksymalne odchylenie dla odległości 30 cm i kąta 0°

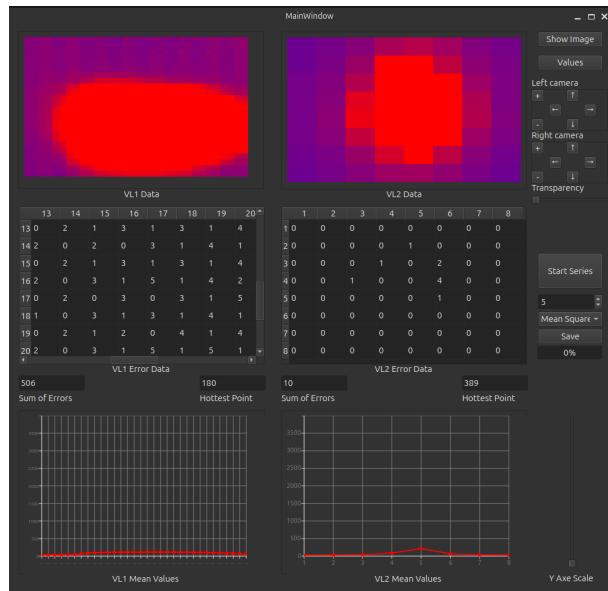


Rysunek 7.87 Błąd średniokwadratowy dla odległości 30 cm i kąta 0°

Odległość 30 cm, kąt 30° :

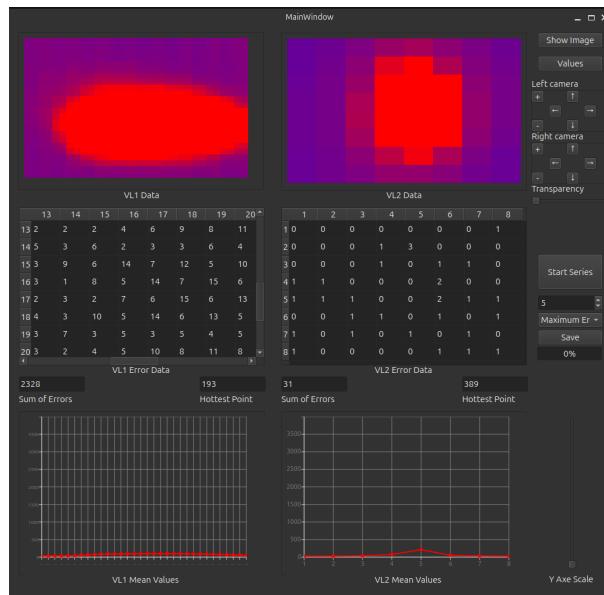


Rysunek 7.88 Maksymalne odchylenie dla odległości 30 cm i kąta 30°

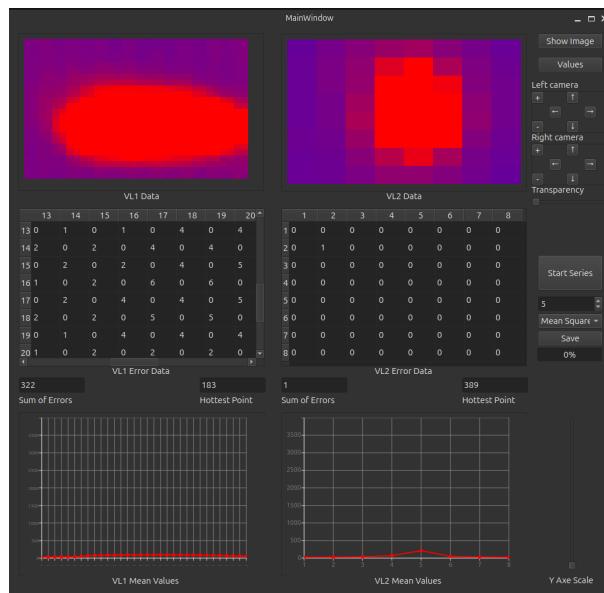


Rysunek 7.89 Błąd średniokwadratowy dla odległości 30 cm i kąta 30°

Odległość 30 cm, kąt 60°:



Rysunek 7.90 Maksymalne odchylenie dla odległości 30 cm i kąta 60°



Rysunek 7.91 Błąd średniokwadratowy dla odległości 30 cm i kąta 60°

W wyniku obrotu nagrzanej powierzchni można zauważyc nieznaczne powiększenie błędów, co jest najprawdopodobniej związane z ograniczoną rozdzielczością czujników termowizyjnych oraz specyfiką odświeżania danych przez sensory.

Rozdział 8

Podsumowanie i wnioski

W ramach realizacji niniejszej pracy udało się rozbudować stanowisko pomiarowe poprzez dodanie kamery Microsoft LifeCam Studio, która umożliwia rejestrację obrazu w czasie rzeczywistym. Rozbudowa obejmowała także modyfikację komunikacji pomiędzy urządzeniem a komputerem, co pozwoliło na jednoczesne przesyłanie danych z czujników oraz obrazu wideo. Istotnym elementem pracy było znaczne rozszerzenie aplikacji zarządzającej stanowiskiem pomiarowym, która obecnie oferuje szereg zaawansowanych funkcji, takich jak wizualizacja danych w różnych formatach (rastrowej, ciągłej z filtrem Gaussa, czy z wartościami pomiarów), porównywanie wyników pomiarów z różnych czujników oraz możliwość zapisu danych pomiarowych na dysku w celu ich dalszej analizy. Aplikacja pozwala również na prowadzenie serii pomiarów i ich prezentację w sposób czytelny dla użytkownika.

W trakcie testowania aplikacji zaobserwowano jednak kilka błędów związanych z obsługą klasy `CameraWidget`. Na niektórych rysunkach można zauważyc przypadkowe włączenie filtra o zielonym kolorze, co jest wynikiem błędu samej kamery, a nie oprogramowania. Dodatkowo zdarza się, że nie wszystkie widget'y związane z kamerą uruchamiają się poprawnie, co prowadzi do sytuacji, w której niektóre elementy graficzne wyświetlały statyczny obraz zamiast dynamicznego wideo. Powyższe problemy można tymczasowo rozwiązać poprzez ponowne uruchomienie aplikacji, co przywraca jej pełną funkcjonalność.

Zaobserwowano również, że translacja wideo z kamery znacząco obciąża działanie programu, co wpływa na czas obliczania różnych rodzajów błędów oraz ich dokładność. Z tego względu optymalizacja kodu w zakresie przetwarzania obrazu z kamery wydaje się koniecznym kierunkiem dalszego rozwoju.

Wszystkie założone cele pracy zostały zrealizowane, z wyjątkiem dodania nowych czujników do stanowiska. Wynika to z faktu, że większość czasu poświęcono na tworzenie oraz rozwój oprogramowania dla istniejącego stanowiska pomiarowego, które w znacznym stopniu wzbogacono o nowe funkcjonalności i udoskonalono pod względem użytkowym.

Pomimo wymienionych problemów, oprogramowanie w obecnym stanie umożliwia prowadzenie różnorodnych eksperymentów badawczych, w tym analizę właściwości czujników ToF oraz termowizyjnych. Aplikacja pozwala na szczegółową analizę otrzymanych wyników, ich przejrzystą wizualizację oraz zapis wszystkich niezbędnych danych na dysku w celu dalszej, bardziej szczegółowej analizy. Rozbudowane możliwości stanowiska pomiarowego i aplikacji czynią je użytecznym narzędziem zarówno w kontekście badań naukowych, jak i praktycznych zastosowań przemysłowych.

Literatura

- [1] Geek for Geeks, *Implementing Algorithms in C++ – Widgets and Filters*, dostęp online: <https://www.geeksforgeeks.org>, [dostęp: 15.11.2024].
- [2] Grzegorz Pióro, *Integracja matrycowych czujników odległości i termowizyjnych*, Praca inżynierska, Politechnika Wrocławskiego, 2023.
- [3] Melexis, *MLX90640 Far Infrared Thermal Sensor Array*, dostęp online: <https://www.melexis.com>, [dostęp: 09.10.2024].
- [4] Microsoft, *Kamera LifeCam Studio – specyfikacja techniczna*, dostęp online: <https://www.microsoft.com>, [dostęp: 01.12.2024].
- [5] Panasonic, *AMG8833 Infrared Array Sensor Data Sheet*, dostęp online: <https://industrial.panasonic.com>, [dostęp: 13.10.2024].
- [6] PlantUML Documentation, *Tworzenie diagramów UML i innych*, dostęp online: <https://plantuml.com>, [dostęp: 08.12.2024].
- [7] Qt Documentation, *Tworzenie widgetów i interfejsów użytkownika w Qt*, dostęp online: <https://doc.qt.io>, [dostęp: 06.11.2024].
- [8] STMicroelectronics, *Dokumentacja techniczna czujnika VL53L5CX*, dostęp online: <https://www.st.com>, [dostęp: 09.10.2024].
- [9] Bjarne Stroustrup, *The C++ Programming Language*, Addison-Wesley, 2013.

Spis rysunków

3.1	Moduł czujnika AMG8833	7
3.2	Moduł czujnika MLX90640	8
3.3	Moduł czujnika VL53L5CX	9
3.4	Camera Microsoft LifeCam Studio	10
5.1	Schemat blokowy stanowiska integratora sensorów termowizyjnych i sensorów odległości	14
5.2	Diagram klas [6]	16
6.1	Zdjęcie stanowiska pomiarowego	17
6.2	Zmiany w głównym oknie	18
6.3	Nowe tryby pracy	18
6.4	Nowe okno dla czujników VL53L5CX	19
6.5	Przykład graficznej realizacji obiektu klasy CameraWidget	20
6.6	Przykład wyświetlonych wartości pomiarów odległości z lewego i prawego czujnika VL53L5CX	20
6.7	Przykład wizualizacji danych pomiarowych z zastosowaniem funkcji gaussowskiej	20
6.8	Wybór typu błędów, które mają być obliczane	21
6.9	Tabele z wyznaczonymi maksymalnymi wartościami błędów	21
6.10	Sekcja diagramów	22
6.11	Okno do porównania danych z czujników termowizyjnych	22
6.12	Skrót na pulpicie umożliwiający szybkie uruchomienie programu	23
7.1	Widok badanej sceny	26
7.2	Dane dla pierwszego czujnika, maksymalne odchylenie	26
7.3	Dane dla pierwszego czujnika, błąd średniokwadratowy	27
7.4	Dane dla drugiego czujnika, maksymalne odchylenie	27
7.5	Dane dla drugiego czujnika, błąd średniokwadratowy	28
7.6	Dane dla dwóch czujników, maksymalne odchylenie	28
7.7	Dane dla dwóch czujników, błąd średniokwadratowy	29
7.8	Obraz z zamontowanej kamery	30
7.9	Dane dla dwóch czujników, maksymalne odchylenie dla początkowego ustawienia ścianki	31
7.10	Dane dla dwóch czujników, błąd średniokwadratowy dla początkowego ustawienia ścianki	31
7.11	Obraz z kamery	32
7.12	Obraz z filtrem Gaussa	32
7.13	Dane dla dwóch czujników, maksymalne odchylenie dla początkowego ustawienia ścianki	32

7.14 Dane dla dwóch czujników, błąd średniokwadratowy dla początkowego ustalenia ścianki	33
7.15 Dane dla dwóch czujników, maksymalne odchylenie po przesunięciu ścianki	33
7.16 Dane dla dwóch czujników, błąd średniokwadratowy po przesunięciu ścianki	34
7.17 Obraz z kamery	34
7.18 Obraz z filtrem Gaussa	34
7.19 Dane dla dwóch czujników, maksymalne odchylenie dla początkowego ustalenia ścianki	35
7.20 Dane dla dwóch czujników, błąd średniokwadratowy dla początkowego ustalenia ścianki	35
7.21 Dane dla dwóch czujników, maksymalne odchylenie po przesunięciu ścianki	36
7.22 Dane dla dwóch czujników, błąd średniokwadratowy po przesunięciu ścianki	36
7.23 Widok badanej sceny	37
7.24 Widok badanej sceny z kamery przy dystansie 20 cm	38
7.25 Maksymalne odchylenie dla dwóch czujników przy dystansie 20 cm	38
7.26 Błąd średniokwadratowy (MSE) dla dwóch czujników przy dystansie 20 cm	39
7.27 Maksymalne odchylenie po przesunięciu o 1 cm przy dystansie 20 cm	39
7.28 Błąd średniokwadratowy (MSE) po przesunięciu o 1 cm przy dystansie 20 cm	40
7.29 Dane dla dwóch czujników przy minimalnym dystansie 35 cm	40
7.30 Maksymalne odchylenie przy dystansie 30 cm	41
7.31 Błąd średniokwadratowy (MSE) przy dystansie 30 cm	41
7.32 Maksymalne odchylenie po przesunięciu o 1 cm przy dystansie 30 cm	42
7.33 Błąd średniokwadratowy (MSE) po przesunięciu o 1 cm przy dystansie 30 cm	42
7.34 Maksymalne odchylenie przy dystansie 10 cm	43
7.35 Błąd średniokwadratowy (MSE) przy dystansie 10 cm	43
7.36 Maksymalne odchylenie po przesunięciu o 1 cm przy dystansie 10 cm	44
7.37 Błąd średniokwadratowy (MSE) po przesunięciu o 1 cm przy dystansie 10 cm	44
7.38 Obraz z czujników przy odległości 20 cm	45
7.39 Obraz z czujników przy odległości 20 cm	46
7.40 Błędy dla pierwszego czujnika przy odległości 20 cm	46
7.41 Błędy dla drugiego czujnika przy odległości 20 cm	46
7.42 Błędy dla pierwszego czujnika po przesunięciu o 1 cm	46
7.43 Błędy dla drugiego czujnika po przesunięciu o 1 cm	46
7.44 Obraz z czujników przy odległości 25 cm	47
7.45 Błędy dla pierwszego czujnika przy odległości 25 cm	47
7.46 Błędy dla drugiego czujnika przy odległości 25 cm	47
7.47 Błędy dla pierwszego czujnika po przesunięciu o 1 cm	47
7.48 Błędy dla drugiego czujnika po przesunięciu o 1 cm	47
7.49 Obraz z czujników przy odległości 35 cm	48
7.50 Błędy dla pierwszego czujnika przy odległości 35 cm	48
7.51 Błędy dla drugiego czujnika przy odległości 35 cm	48
7.52 Błędy dla pierwszego czujnika po przesunięciu o 1 cm	48
7.53 Błędy dla drugiego czujnika po przesunięciu o 1 cm	48
7.54 Badanie ścianki na odległość 10 cm, maxymalne odchylenie	49
7.55 Badanie ścianki na odległość 10 cm, błąd średniokwadratowy	50
7.56 Badanie ścianki na odległość 30 cm, maxymalne odchylenie	50
7.57 Badanie ścianki na odległość 30 cm, błąd średniokwadratowy	51
7.58 Badanie ścianki na odległość 50 cm, maxymalne odchylenie	51
7.59 Badanie ścianki na odległość 50 cm, błąd średniokwadratowy	52

7.60 Widok badanej sceny	53
7.61 Widok z kamery przed nagraniem obiektu dla odległości 10 cm	53
7.62 Maksymalne odchylenie przed nagraniem dla odległości 10 cm	54
7.63 Błąd średniokwadratowy przed nagraniem dla odległości 10 cm	54
7.64 Obraz termowizyjny dla odległości 10 cm	55
7.65 Maksymalne odchylenie po nagraniu dla odległości 10 cm	55
7.66 Błąd średniokwadratowy po nagraniu dla odległości 10 cm	56
7.67 Widok widgetów z filtrem Gaussa i półprzezroczystości dla odległości 30 cm	56
7.68 Widok widgetów z filtrem półprzezroczystości dla odległości 30 cm	56
7.69 Maksymalne odchylenie przed nagraniem dla odległości 30 cm	57
7.70 Błąd średniokwadratowy przed nagraniem dla odległości 30 cm	57
7.71 Obraz termowizyjny dla odległości 30 cm	58
7.72 Maksymalne odchylenie po nagraniu dla odległości 30 cm	58
7.73 Błąd średniokwadratowy po nagraniu dla odległości 30 cm	59
7.74 Widok widgetów z filtrem półprzezroczystości dla odległości 50 cm	59
7.75 Maksymalne odchylenie przed nagraniem dla odległości 50 cm	60
7.76 Błąd średniokwadratowy przed nagraniem dla odległości 50 cm	60
7.77 Obraz termowizyjny dla odległości 50 cm	61
7.78 Maksymalne odchylenie po nagraniu dla odległości 50 cm	61
7.79 Błąd średniokwadratowy po nagraniu dla odległości 50 cm	62
7.80 Maksymalne odchylenie dla odległości 20 cm i kąta 0°	63
7.81 Błąd średniokwadratowy dla odległości 20 cm i kąta 0°	63
7.82 Maksymalne odchylenie dla odległości 20 cm i kąta 30°	64
7.83 Błąd średniokwadratowy dla odległości 20 cm i kąta 30°	64
7.84 Maksymalne odchylenie dla odległości 20 cm i kąta 60°	65
7.85 Błąd średniokwadratowy dla odległości 20 cm i kąta 60°	65
7.86 Maksymalne odchylenie dla odległości 30 cm i kąta 0°	66
7.87 Błąd średniokwadratowy dla odległości 30 cm i kąta 0°	66
7.88 Maksymalne odchylenie dla odległości 30 cm i kąta 30°	67
7.89 Błąd średniokwadratowy dla odległości 30 cm i kąta 30°	67
7.90 Maksymalne odchylenie dla odległości 30 cm i kąta 60°	68
7.91 Błąd średniokwadratowy dla odległości 30 cm i kąta 60°	68