



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA I
TECHNOLOGIE KOSMICZNE

ROZPRAWA DOKTORSKA

Wykorzystanie optyki sterowalnej w obrazowaniu
trójwymiarowym metodą SFF

Autor: mgr inż. Bartosz Lenty

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Andrzej Sioma, prof. AGH

Praca wykonana:
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Kraków, 2024



FIELD OF SCIENCE ENGINEERING AND TECHNOLOGY

SCIENTIFIC DISCIPLINE AUTOMATION, ELECTRONICS, ELECTRICAL
ENGINEERING AND SPACE TECHNOLOGIES

DOCTORAL THESIS

Integration of Controllable Optics into 3D Imaging via
the SFF Method

Author: mgr inż. Bartosz Lenty

First supervisor: dr hab. inż. Andrzej Sioma, prof. AGH

Completed at:
AGH University of Krakow
Faculty of Mechanical Engineering and Robotics

Kraków, 2024

Serdecznie dziękuję mojemu promotorowi Profesorowi Andrzejowi Siomie za opiekę promotorską, współpracę oraz wszelkie wskazówki udzielone podczas realizacji tej pracy.

Dziękuję również moim najbliższym za ich wsparcie, w szczególności Kasi i Milenie.

Streszczenie

Ciągły wzrost wydajności produkcji w przemyśle wymaga ciągłego utrzymywania parametrów jakościowych wyrobów. Stanowiska bazujące na kontroli statystycznej lub wizualnej nie są w stanie zapewnić skuteczniejszej kontroli jakości wykonania każdego produktu. Skutkiem tego jest postępująca automatyzacja zadań kontrolno-pomiarowych. Jednym ze sposobów automatyzacji procesu kontroli jakości wykonania produktu jest zastosowanie systemów wizyjnych. Systemy wizyjne bazują na optycznych metodach pomiarowych umożliwiających obrazowanie sceny dwuwymiarowej lub w przypadku systemów wizyjnych 3D również scen trójwymiarowych. Postępujący rozwój technologiczny w zakresie mechanizacji, automatyzacji i cyfryzacji powoduje również konieczność dostosowywania i ulepszania metod obrazowania stosowanych w systemach wizyjnych.

W niniejszej pracy zaproponowano rozwinięcie jednej z metod obrazowania trójwymiarowego – metody Shape from Focus (SFF). Jest to pasywna metoda optyczna, która do wyznaczenia głębi sceny używa informacji o ostrości punktów na obrazie dwuwymiarowym. W celu dostosowania metody SFF do poziomu gotowości technologicznej pozwalającej na jej wdrożenie na liniach produkcyjnych konieczne jest wprowadzenie szeregu modyfikacji. Modyfikacje zaproponowane w tej pracy związane są zarówno z częścią konstrukcyjną, jak i algorytmiczną procesu budowy obrazu 3D z wykorzystaniem tej metody.

W zakresie zmian konstrukcyjnych zaproponowano zastosowanie innowacyjnych rozwiązań z zakresu optyki sterowalnej. W ramach badań sprawdzono dostępne technologie optyki sterowalnej i wskazano soczewki płynne jako rozwiązanie umożliwiające poprawę parametrów użytkowych metody SFF. Następnie wyznaczono parametry elementów toru optycznego i oceniono ich wpływ na obrazowanie metodą SFF.

Prace i badania w zakresie przygotowania algorytmów budowy obrazu 3D obejmowały analizę metod estymacji ostrości na obrazie cyfrowym, algorytmów selekcji płaszczyzny ostrej oraz metod kalibracji. Przedmiotem badań było porównanie i dobór algorytmów poprawiających zarówno odporność metody SFF na zakłócenia występujące na liniach produkcyjnych, jak również wprowadzenie algorytmów kompensacyjnych poprawiających jakości odwzorowania sceny trójwymiarowej.

Abstract

The continuous increase in production efficiency in the industry necessitates the consistent maintenance of product quality parameters. Workstations relying on statistical or visual inspection cannot ensure sufficient quality control for every product. As a result, there is a growing trend toward the automation of inspection and measurement tasks. One approach to automating product quality control is the application of vision systems. Vision systems utilize optical measurement methods that enable imaging of two-dimensional scenes or three-dimensional scenes in the case of 3D vision systems. Ongoing technological advancements in mechanization, automation, and digitization also drive the need to adapt and enhance imaging methods used in vision systems.

This dissertation proposes the improvement of a three-dimensional imaging method—Shape from Focus (SFF). SFF is a passive optical method that determines scene depth using information about the sharpness of points in a 2D image. Several modifications are required to adapt the SFF method to a technological readiness level suitable for implementation on production lines. The modifications proposed in this work pertain to both the hardware design and the algorithmic aspects of constructing 3D images using this method.

In terms of hardware modifications, innovative solutions in the field of tunable optics were proposed. The research evaluated available controllable optics technologies and identified liquid lenses as a solution that enhances the operational parameters of the SFF method. Subsequently, the parameters of the optical path components were determined, and their impact on SFF imaging was assessed.

Research and development concerning preparing algorithms for 3D image construction included the analysis of sharpness estimation methods, algorithms for selecting the sharp plane, and calibration techniques. The study focused on comparing and selecting algorithms that improve the robustness of the SFF method against disturbances encountered on production lines, as well as introducing algorithms to improve the quality of three-dimensional scene reconstruction.

STRESZCZENIE.....	5
ABSTRACT	6
WYKAZ SKRÓTÓW I OZNACZEŃ	9
1 WSTĘP.....	12
1.1 Cel i zakres pracy.....	15
1.2 Tezy rozprawy	16
1.3 Plan prac badawczych	17
1.4 Struktura pracy.....	19
2 OBRAZOWANIE W ZADANIACH AUTOMATYZACJI	21
2.1 Rejestracja obrazu.....	21
2.2 Parametry optyczne system wizyjnego	24
2.3 Obraz 3D – reprezentacja sceny 3D	32
3 METODY OBRAZOWANIA 3D.....	35
3.1 Stereowizja.....	36
3.2 Pomiar czasu propagacji fal - Time of flight	41
3.3 Triangulacja laserowa	45
3.4 Metoda SFF - Shape from Focus.....	49
3.5 Metody obrazowania 3D – podsumowanie	53
4 MODYFIKACJA METODY SFF	55
4.1 Rejestracja stosu obrazów	55
4.2 Estymacja ostrości na obrazie cyfrowym	60
4.3 Porównanie wartości estymatora ostrości.....	61
4.4 Budowa mapy wysokości	64
4.5 Konwersja mapy wysokości na chmurę punktów 3D	66
5 ZASTOSOWANIE OPTYKI STEROWALNEJ W WIZJI MASZYNOWEJ	68
5.1 Obiektywy stałoogniskowe	68
5.2 Obiektywy zmienneogniskowe zmechanizowane.....	70
5.3 Obiektywy sterowalne	71
6 STANOWISKO BADAWCZE.....	81
6.1 Projekt mechaniczny stanowiska	82
6.2 Projekt układu sterowania	83
6.3 Projekt toru optycznego.....	85
6.4 System obrazowania	87

6.5	Podsumowanie.....	88
7	OCENA OSTROŚCI NA OBRAZIE CYFROWYM.....	92
7.1	Przegląd estymatorów wykorzystanych do oceny ostrości na obrazie	92
7.2	Metoda porównania zaproponowanych estymatorów	96
7.3	Algorytmy selekcji płaszczyzny ostrej.....	101
7.4	Wskaźniki zastosowane do porównania metod oceny ostrości.....	102
7.5	Omówienie wyników.....	103
7.5.1	<i>Algorytm selekcji płaszczyzny ostrej.....</i>	<i>103</i>
7.5.2	<i>Wpływ tekstury powierzchni</i>	<i>105</i>
7.5.3	<i>Wpływ rozmiaru jądra przekształcenia</i>	<i>107</i>
7.5.4	<i>Wpływ kontrastu</i>	<i>109</i>
7.5.5	<i>Wpływ geometrii oświetlenia</i>	<i>114</i>
8	TRANSFORMACJA OBRAZ – ŚWIAT.....	116
8.1	Eksperymentalne wyprowadzenie funkcji przejścia.....	117
9	KOMPENSACJA BŁĘDÓW OBRAZOWANIA	122
9.1	Zmiana powiększenia podczas rejestracji stosu obrazów	122
9.2	Aberracje optyczne	129
9.3	Zmiana natężenia oświetlenia powierzchni podczas rejestracji stosu obrazów	134
9.4	Mapa ufności.....	136
10	WERYFIKACJA METODY OBRAZOWANIA.....	140
10.1	Analiza geometrii otworu.....	140
11	PODSUMOWANIE	150
11.1	Kierunki dalszych badań.....	154
	BIBLIOGRAFIA.....	155
	ZAŁĄCZNIK I - MODEL MATEMATYCZNY ESTYMATORÓW.....	169

Wykaz skrótów i oznaczeń

ADC	–	<i>Analog-to-Digital Converter</i> – przetwornik analogowo-cyfrowy
AFE	–	<i>Absolute Fitting Error</i> – bezwzględny błąd dopasowania
BL	–	<i>Bar Light</i> – oświetlacz liniowy-matrycowy
CAD	–	<i>Computer Aided Design</i> - komputerowo wspomagane projektowanie
CCD	–	<i>Charge Coupled Device</i> , technologia produkcji układów scalonych używana w sensorach światłoczułych
CL	–	<i>Collimated Light</i> – oświetlacz emitujący światło skolimowane
CMOS	–	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i> , technologia produkcji układów scalonych używana w sensorach światłoczułych
CoC	–	<i>Circle of Confusion</i> – krążek rozmycia
CoG	–	<i>Center of Gravity</i> , algorytm
DL	–	<i>Doom Light</i> – oświetlacz kopułowy
DOF	–	<i>Depth of Focus</i> – głębia ostrości
DRL	–	<i>Direct Ring Light</i> – oświetlacz pierścieniowy świecący bezpośrednio na scenę – równoległe do osi optycznej
FOV	–	<i>Field of View</i> – pole widzenia systemu wizyjnego
FPS	–	<i>Frames per second</i> – liczba klatek na sekundę
HRL	–	<i>Horizontal Ring Light</i> – oświetlacz pierścieniowy, z diodami ułożonymi pod niewielkim kątem do osi optycznej
LIDAR	–	<i>Light Detection and Ranging</i> – technologia pomiaru odległości bazująca na wykorzystaniu światła
LTS	–	<i>Least Trimmed Squares</i> – metoda najmniejszych przycinanych kwadratów
MOS	–	metoda obrazowania trójwymiarowego wykorzystująca oświetlenie strukturalne
MTL	–	metoda obrazowania trójwymiarowego wykorzystująca triangulację laserową
NIR	–	<i>Near InfraRed</i> – pasmo promieniowania elektromagnetycznego w zakresie 780nm – 1.4μm

PDMS	–	<i>Poli(DiMetyloSiloksan)</i> , przezroczysty materiał używany do produkcji m.in. membran
PLC	–	<i>Programmable Logic Controller</i> – przemysłowy programowalny sterownik logiczny
QC	–	<i>Quality Control</i> – kontrola jakości wykonania
RGB	–	przestrzeń barw, w której kodowanie barw odbywa się przez mieszanie kolorów: czerwonego (<i>Red</i>), zielonego (<i>Green</i>) i niebieskiego (<i>Blue</i>)
RGB-D	–	sposób zapisu danych obrazu trójwymiarowego wraz z intensywnością w czterech kanałach – czerwony, zielony, niebieski oraz głębia
RMSE	–	<i>Root Mean Squared Error</i> – średnia kwadratowa błędu
ROI	–	<i>Region of Interest</i> – region zainteresowania
SFF	–	<i>Shape from Focus</i> , metoda obrazowania 3D bazująca na estymacji ostrości
SMA	–	<i>Shape Memory Alloy</i> – materiały z pamięcią kształtu
SNR	–	<i>Signal to Noise Ratio</i> – wskaźnik mocy sygnału do szumów
SWIR	–	<i>Short Wavelength InfraRed</i> – pasmo promieniowania elektromagnetycznego w zakresie 1.4μm – 2.5μm
ToF	–	<i>Time of Flight</i> – metoda obrazowania 3D bazująca na pomiarze czasu propagacji
UART	–	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> – interfejs komunikacyjny
UV	–	<i>UltraViolet</i> – pasmo promieniowania elektromagnetycznego w zakresie 100nm – 380nm
UV-A	–	podzakres promieniowania UV w zakresie 315nm – 380nm
UV-B	–	podzakres promieniowania UV w zakresie 280nm – 315nm
UV-C	–	podzakres promieniowania UV w zakresie 100nm – 280nm
VCA	–	<i>Voice Coil Actuator</i> – napęd VCA
VIS	–	<i>Visible Spectrum</i> – zakres promieniowania elektromagnetycznego w zakresie 380nm – 780nm

T_{prop}	–	czas propagacji fali elektromagnetycznej
P_o	–	punkt przejścia osi optycznej przez sensor kamery
R_s	–	rozdzielczość sensora
R_a	–	parametr chropowatości 2D opisujący średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej
S_a	–	parametr chropowatości 3D opisujący średnie arytmetyczne odchylenie wysokości od powierzchni średniej
W_k	–	wartość estymatora ostrości dla obrazu o indeksie k
c	–	prędkość fali elektromagnetycznej w ośrodku, dla powietrza przyjmuje się wartość 291 000 000 km/s
d	–	odległość w osi Z od początku układu współrzędnych
D	–	zakres przemieszczenia systemu wizyjnego w metodzie SFF
f	–	odległość ogniskowa
F	–	przysłona aperturowa
K	–	liczba warstw w stosie obrazów
k	–	numer warstwy w stosie obrazów
M	–	wysokość obrazu odpowiadająca liczbie wierszy
N	–	szerokość obrazu odpowiadająca liczbie kolumn
ΔX	–	rozdzielczość w osi Y
ΔY	–	rozdzielczość w osi X
ΔZ	–	rozdzielczość w osi Z
ΔZ_{PP}	–	rozdzielczość zmian położenia płaszczyzny przedmiotowej w osi Z
ε	–	średnica krążka rozmycia
n	–	współczynnik załamania światła
r	–	promieniem krzywizny soczewki
Φ	–	moc skupiająca
$\emptyset$	–	średnica otworu

1 Wstęp

Przemysł wytwórczy napędzany innowacjami w zakresie mechanizacji, automatyzacji oraz cyfryzacji dąży do zwiększenia efektywności produkcji [1]. Odbywa się to przez zwiększenie wydajności przy zachowaniu, a często poprawie jakości wytwarzanych produktów [2]. Współczesne zakłady produkcyjne potrzebują rozwoju i wdrożeń zaawansowanych i wielofunkcyjnych systemów kontroli jakości wykonania produktu [3]. Stosowane systemy bazujące na kontroli statystycznej lub wizualnej stają się nieefektywne przy rosnącej świadomości konsumenckiej wspartej regulacjami praw konsumenckich. Oczekiwane efekty możliwe są do osiągnięcia tylko poprzez ciągłą i wielooperacyjną kontrolę procesu produkcji [4]. Kontrola wszystkich wyrobów wymaga wprowadzenia na linię zautomatyzowanych systemów kontroli jakości wytwarzania umożliwiających weryfikację zarówno produktów gotowych, jak również prefabrykatów. Kontrola jakości musi zapewniać dotrzymywanie tolerancji, kształtów i stanu geometrycznego powierzchni [5]. Uwzględniając charakterystykę produkcji seryjnej systemy bezkontaktowe wyróżniają się rozbudowanymi możliwościami. Separacja fizyczna urządzenia pomiarowego oraz kontrolowanego elementu pozwala na redukcję zakłóceń mechanicznych, zmniejsza zużycie układu pomiarowego oraz zwiększa możliwość zabudowy na stanowiskach kontrolnych.

W ramach rozwoju bezkontaktowych systemów kontrolno-pomiarowych obserwowany jest dynamiczny rozwój systemów wizyjnych wykorzystujących różne metody obrazowania. Systemy wizyjne pozwalają na realizację pomiarów oraz kontrolę kluczowych cech produktów w reżimie analizy każdego produktu [6]. W zależności od wymogów funkcjonalnych [7], rozdzielczości pomiarowych [8] oraz zakresu oceny parametrów produktu [9] konieczny jest dobór metody obrazowania i jej parametrów pod kątem realizowanego zadania kontrolnego lub pomiarowego.

Dobór parametrów projektowanego rozwiązania powinien uwzględniać [10]:

- technologię rejestracji obrazu,
- oświetlenie,
- optykę,
- komunikację z systemami nadrzędnymi,

- środowisko programistyczne,
- wsparcie sprzętowe.

Systemy wizyjne umożliwiają również rejestrację obrazów trójwymiarowych zawierających informacje przestrzenne opisujące obserwowaną scenę [11]. Każda z obrazowanych powierzchni obiektu lub sceny na obrazie trójwymiarowym opisana jest zbiorem punktów wyznaczonych w układzie współrzędnych kamery [12], [13]. Pozwala to na znaczące rozszerzenie możliwości analizy parametrów obiektu [14] oraz detekcji defektów [15] produktu wskazanych w specyfikacji technicznej wyrobów [16], [17]. Kluczowym zadaniem w obrazowaniu trójwymiarowym jest więc wyznaczenie współrzędnych każdego z punktów takiego obrazu z założoną rozdzielczością pomiarową [18].

Literatura wskazuje szereg zjawisk fizycznych mogących znaleźć zastosowanie w pośrednim pomiarze parametrów głębi sceny, jak: ostrość [19], tekstura [20], [21], cień [22], [23], polaryzacja [24]. Są to jednak w większości podstawy teoretyczne lub koncepcje pozostające bez weryfikacji możliwości ich zastosowania na liniach przemysłowych [25]. Rysunek 1.1 prezentuje część metod obrazowania 3D z podziałem na metody aktywne oraz pasywne. Aktywnymi nazywane są metody wymagające wprowadzenia dedykowanego oświetlenia [26].



Rys. 1.1. Podział metod obrazowania trójwymiarowego [27]

Przeprowadzone badania i analizy potwierdzają możliwość praktycznych implementacji części metod obrazowania. Otwartym wyzwaniem badawczym jest opracowanie rozwiązania o potencjale wdrożeniowym z wykorzystaniem aktualnego poziomu technologii optoelektronicznych i informatycznych. Potencjał wdrożeniowy to możliwość opracowania metody i rozwiązania sprzętowego, pozwalającego na realizację obrazowania oraz realizację zadań kontrolnych i pomiarowych prowadzonych na liniach produkcyjnych i w przemysłowych laboratoriach pomiarowych. Wymaga to pokonania wielu ograniczeń technologicznych, konstrukcyjnych i algorytmicznych uwzględniających wymagane w przemyśle parametry pracy jak: rozdzielczość obrazowania, czas rejestracji i analizy obrazu oraz odporności na zakłócenia obecne w przestrzeni produkcyjnej. Zabudowa systemu obrazowania w maszynach lub na liniach produkcyjnych wiąże się z oddziaływaniem drgań generowanych przez układy napędowe oraz układy przenoszenia napędów. Dodatkowo należy ograniczyć lub wyeliminować wpływ: zmiany warunków oświetlenia, zapylenia, obecności oparów oraz zmian temperatury na pracę systemu obrazowania.

Aktualnie jedynie kilka metod obrazowania trójwymiarowego znajduje szerokie zastosowanie w postaci urządzeń wprowadzonych na rynek [28]. Każda z tych metod posiada ograniczenia wynikające ze sposobu pośredniego pomiaru głębi sceny. Wskazany zatem jest dalszy rozwój metod obrazowania trójwymiarowego uwzględniający innowacje naukowe i technologiczne w zakresie wykorzystania: nowych materiałów, nowych typów sensorów, innowacyjnych konstrukcji torów optycznych oraz przygotowania specjalizowanych algorytmów wyznaczania informacji przestrzennych.

1.1 Cel i zakres pracy

Celem pracy jest modyfikacja metody obrazowania trójwymiarowego SFF w zakresie zmiany sposobu rejestracji stosu obrazów oraz uwzględnienia tej zmiany w algorytmach rekonstrukcji obrazów trójwymiarowych. Modyfikacja ta ma na celu poprawę parametrów obrazowania i wykorzystanie metody SFF w budowie przemysłowych systemów kontrolno-pomiarowych.

Zadanie obejmuje modyfikację toru optycznego w metodzie SFF z wykorzystaniem optyki sterowalnej. Pozwoli to na usunięcie z toru optycznego napędów elektrycznych oraz układów przeniesienia napędu, co zredukuje zakłócenia wynikające z ich pracy oraz pozwoli na skrócenie czasu akwizycji stosu obrazów wykorzystywanych do rekonstrukcji informacji przestrzennych.

Zadanie obejmuje również opracowanie zestawu algorytmów umożliwiających budowę obrazów trójwymiarowych uwzględniających zmianę sposobu rejestracji stosu obrazów. Opracowane zostaną również algorytmy kompensacji zakłóceń obrazu związane z charakterystyką i parametrami pracy soczewki płynnej. Wyniki obrazowania prezentowane będą na wybranych przykładach typowych operacji kontrolnych i pomiarowych realizowanych w przemysłowych systemach zapewnienia jakości.

Zakres pracy obejmuje dodatkowo wykonanie projektu oraz uruchomienie prototypowego stanowiska badawczego. Stanowisko zostanie wykorzystane do realizacji badań doświadczalnych z wykorzystaniem optyki sterowalnej pod kątem identyfikacji charakterystyki pracy soczewki płynnej. W pracy zwrócono szczególną uwagę na wykorzystanie soczewek płynnych do konfiguracji systemu obrazowania o zmiennych i sterowanych parametrach optycznych. Praca zawiera analizę parametrów pracy tego typu soczewek oraz identyfikację mechanizmów powstawania błędów odwzorowania sceny wpływających na jakość obrazowania trójwymiarowego. Dla przyjętej konfiguracji toru optycznego zaproponowano autorskie algorytmy kompensacji zniekształceń obrazu wynikających z zastosowania soczewki płynnej.

Badania wykonano dla różnego typu obiektów i materiałów stosowanych w procesach wytwarzania. Do realizacji badań dobrano materiały o różnych parametrach struktury geometrycznej powierzchni (SGP). Pozwoliło to na sprawdzenie jakości obrazowania dla różnych interakcji dobrego oświetlenia z powierzchnią badanych materiałów. W badaniach wykorzystano: płyty stalowe, drewno oraz tworzywa sztuczne wytwarzane metodami addytywnymi. Dla dobranych materiałów w ramach badań zidentyfikowano i wskazano parametry SGP. Przeprowadzone badania wykonano w celu weryfikacji opracowanej modyfikacji metody SFF w obrazowaniu materiałów o różnych parametrach SGP wykorzystywanych w przemyśle wytwórczym.

1.2 Tezy rozprawy

W pracy postawiono dwie tezy badawcze:

- I. Zastosowanie optyki sterowalnej oraz autorskich algorytmów rekonstrukcji obrazu w metodzie SFF pozwala na zmianę sposobu rejestracji stosu obrazów 2D oraz pozwala na rekonstrukcję sceny 3D.
- II. Wprowadzenie optyki sterowalnej do metody SFF pozwala na rozszerzenie zakresu parametrów obrazowania co umożliwia rozszerzenie zakresu możliwych do realizacji zadań kontrolnych i pomiarowych.

1.3 Plan prac badawczych

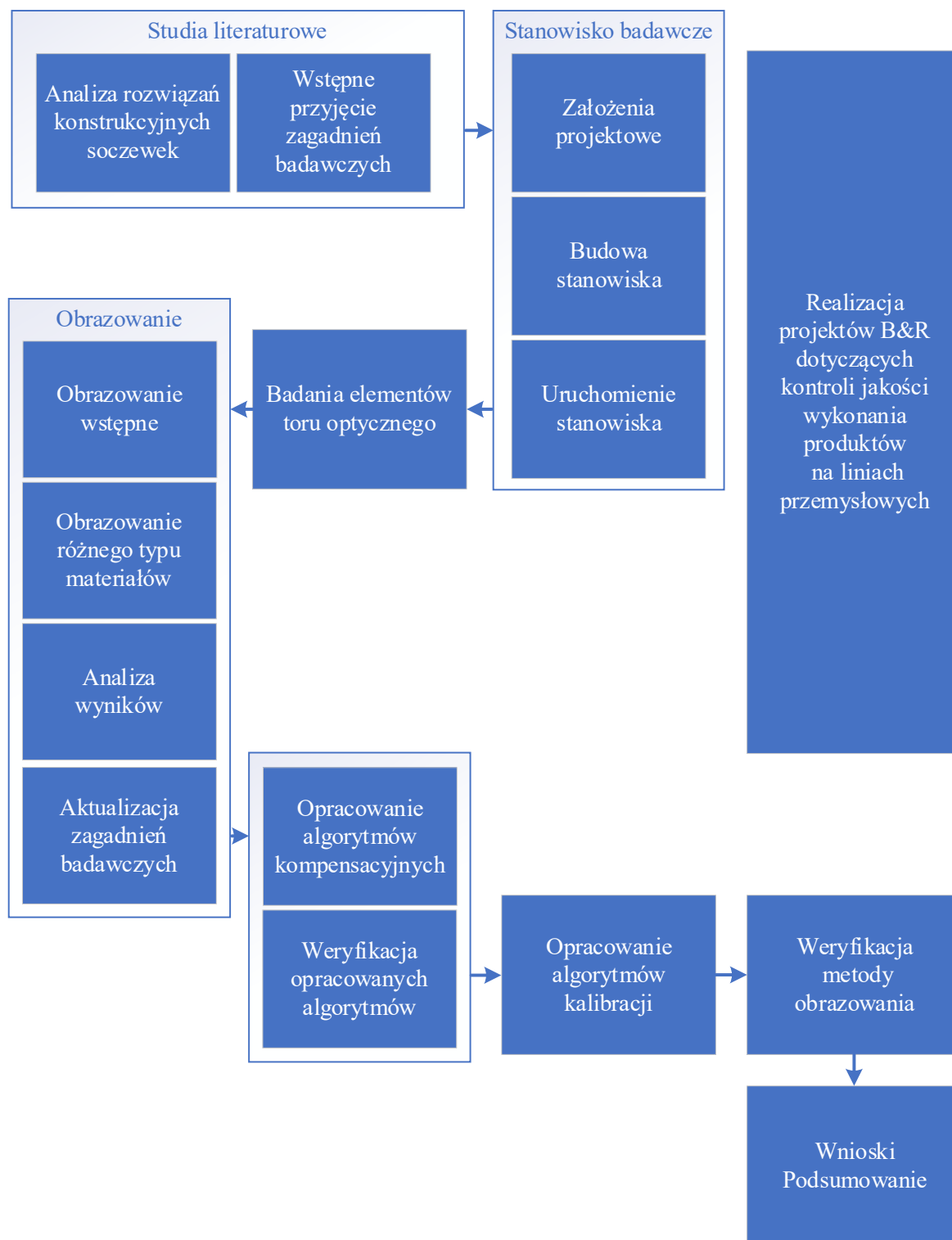
W rozdziale przedstawiono kolejne etapy badań, które przyjęto na podstawie wstępnej analizy tematyki i wyników uzyskanych z przeglądu literatury (Rys. 1.2). Na podstawie wykonanej analizy stanu wiedzy zidentyfikowano luki badawcze związane z parametrami użytkowymi metody SFF. Wskazano soczewki płynne jako rozwiązanie z zakresu optyki sterowalnej umożliwiające poprawę wskazanych parametrów. Następnie wybrano konstrukcję soczewek płynnych do zastosowania w planowanej modyfikacji metody SFF.

Uwzględniając konstrukcję soczewki rozpoczęto prace, których celem było opracowanie projektu, a następnie budowa i uruchomienie stanowiska umożliwiającego badania parametrów soczewki i opracowanie toru optycznego z jej wykorzystaniem.

W kolejnym etapie wykorzystano stanowisko badawcze do realizacji serii badań doświadczalnych umożliwiających weryfikację parametrów toru optycznego i oceny wpływu tych parametrów na rejestrowane obrazy. Badania realizowano dla różnego typu materiałów i przy wykorzystaniu dobranych typów oświetlenia przemysłowego.

Analiza przeprowadzonych badań doświadczalnych umożliwiła aktualizację zakresu zagadnień badawczych dotyczących, między innymi, algorytmów kompensacji zakłóceń oraz metod oceny ostrości w metodzie SFF. Realizacja tych zagadnień była kluczowa do poprawnej rekonstrukcji obrazu trójwymiarowego.

W kolejnym etapie badań opracowano algorytmy kalibracji obrazu trójwymiarowego. Algorytmy kalibracyjne zweryfikowano z wykorzystaniem wzorców pomiarowych. W kolejnym etapie badań wykonano obrazowania wybranych obiektów z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody SFF. Przedstawiono również uzyskane wyniki w zestawieniu z metodą triangulacji laserowej i stereowizji wykorzystującej oświetlenie strukturalne.



Rys. 1.2. Schemat przedstawiający plan prac badawczych

1.4 Struktura pracy

Praca podzielona została na 11 rozdziałów oraz jeden załącznik.

Pierwszym rozdział stanowi wstęp przedstawiający ogólną tematykę pracy, tezy rozprawy, plan prac i opis struktury dokumentu.

Rozdział 2 wprowadzający czytelnika w tematykę systemów wizyjnych. Rozpatrywane są tam zastosowania systemów wizyjnych 2D oraz 3D w zadaniach pomiaru i kontroli parametrów produktu na liniach przemysłowych. Wstęp zawiera opis procesu akwizycji obrazu, szczegółowe omówienie kluczowych parametrów systemu obrazowania oraz metod reprezentacji obrazu 3D.

Rozdział 3 „Metody obrazowania 3D” stanowi przegląd metod obrazowania trójwymiarowego znajdujących zastosowanie na liniach przemysłowych. Wprowadzono również metodę SFF w celu zestawienia jej aktualnych funkcjonalności oraz parametrów użytkowych ze stosowanymi rozwiązaniami. Porównanie obejmowało metody stereowizyjne, światło strukturalne, metodę Time of Flight oraz triangulację laserową.

Rozdział 4 „Modyfikacja metody SFF” zawiera opis proponowanych zmian oraz wskazanie zagadnień badawczych realizowanych w pracy. Wprowadzenie poszczególnych zagadnień zostało powiązane z etapami procesu rekonstrukcji obrazu trójwymiarowego w metodzie SFF.

Rozdział 5 „Zastosowanie optyki sterowalnej w wizji maszynowej” zawiera przegląd rozwiązań konstrukcyjnych obiektów wykorzystywanych w wizji maszynowej. W rozdziale skupiono się na rozwiązaniach optyki sterowalnej, tj. soczewkach płynnych. Konkluzją rozpatrywanego zagadnienia jest dobór konstrukcji soczewki płynnej wykorzystanej w pracy.

Rozdział 6 „Stanowisko badawcze” zawiera opis projektu, układu mechanicznego i elektrycznego oraz systemu sterowania opracowanych dla stanowiska badawczego. Omówiono poszczególne podzespoły, ich funkcje oraz parametry techniczne.

Rozdział 7 „Ocena ostrości na obrazie cyfrowym” dotyczy prac badawczych estymatorów ostrości oraz algorytmów selekcji płaszczyzny ostrej. Rozdział zawiera przegląd stanu wiedzy w tematyce metod estymacji ostrości, omówione zostały przeprowadzone doświadczenia oraz wyniki badań uzyskane dla wytypowanej grupy estymatorów.

Rozdział 8 „Transformacja obraz – świat” dotyczy zagadnień badawczych związanych z kalibracją obrazu zarejestrowanego z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody SFF. Wyprowadzone zostały krzywe kalibracyjne oraz omówione zostały rozdzielczości używane dla kalibrowanych obrazów.

Rozdział 9 „Kompensacja błędów obrazowania” zawiera rozważania dotyczące czynników, które zostały zidentyfikowane jako mające wpływ na jakość odwzorowania sceny. Określono wpływ tych czynników na obraz 3D oraz zaproponowano odpowiednie algorytmy kompensacji.

Rozdział 10 „Weryfikacja metody obrazowania” zawiera przykłady zastosowania opracowanej, zmodyfikowanej metody obrazowania SFF. Porównano funkcjonalność metody SFF oraz triangulacji laserowej i skanera światła strukturalnego w zadaniu obrazowania geometrii otworów kształtowych.

Rozdział 11 stanowi podsumowanie rozprawy, omówiono w nim uzyskane wyniki oraz przedstawiono wnioski. Pracę zamyka wskazanie kierunków rozwoju tej metody oraz zakresu zastosowania zaproponowanego rozwiązania.

2 Obrazowanie w zadaniach automatyzacji

Obrazowanie to proces, który obejmuje rejestrację reprezentacji cyfrowej lub fizycznej stanu sceny. Scena odnosi się do dowolnego obszaru, przedmiotu lub powierzchni, będących obiektem obserwacji. Celem obrazowania może być rejestracja kształtu, tekstury, struktury lub barwy powierzchni [29], [30]. Zarejestrowany obraz może być przetwarzany oraz poddany analizie i interpretacji w celu detekcji poszukiwanych cech [31], [32] lub właściwości fizycznych [33], [34].

2.1 Rejestracja obrazu

Obrazowanie cyfrowe może wykorzystywać różne zjawiska fizyczne takie jak promieniowanie elektromagnetyczne w VIS [35], NIR [36], SWIR [37], [38], fale dźwiękowe [39], rezonans magnetyczny [40], [41] lub zjawiska elektryczne. W pracy główny nacisk położony został na rejestrację obrazów na podstawie detekcji promieniowania elektromagnetycznego. Metody rejestracji fal elektromagnetycznych można podzielić w zależności od długości stosowanej fali. Kluczowym, z punktu widzenia zadań przemysłowych, zakresem długości światła jest światło widzialne dla człowieka (VIS). Są to fale elektromagnetyczne w zakresie od 380nm do 780nm, które mózg ludzki interpretuje jako barwy. Promieniowanie elektromagnetyczne poza wskazanym zakresem jest niewidoczne dla ludzkiego oka. Rozpatrując szerszy zakres fal elektromagnetycznych, w zadaniach automatyzacji wykorzystywane są również zakresy podczerwieni (IR) oraz nadfioletu (UV).

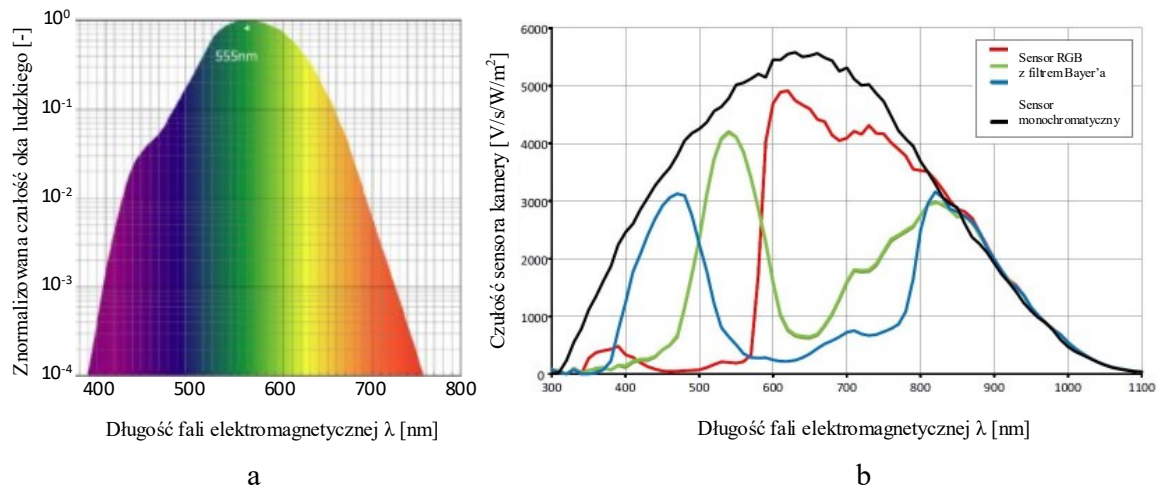
Zakres IR zawiera fale o długości od 780nm do 1 mm. Najczęściej wykorzystywany zakres to bliska podczerwień (NIR) o długościach fali 780nm – 1400nm oraz zakres SWIR zawierający się w przedziale 1400nm – 2500nm. Brak czułości ludzkiego oka na IR sprawia, że oświetlacze wykorzystujące ten rodzaj fali posiadają liczne zalety. Dopuszczalna jest w nich moc, która w VIS potencjalnie oślepiłaby operatora linii, a także praca oświetlacza w trybie impulsowym bez powodowania dyskomfortu operatora. Innym argumentem za wykorzystaniem systemów bazujących na świetle IR jest inny sposób interakcji materiałów w zależności od długości fali elektromagnetycznej. Materiały w odmienny sposób odbijają fale

o różnych długościach [42]. Dla zakresu VIS pozwala to ludziom odróżniać barwę przedmiotów. Wykorzystanie zakresu IR może pozwolić na obserwację różnic niewidocznych w zakresie VIS. Przykładem mogą być zastosowania obrazowania NIR do zadań oceny jakości w przemyśle spożywczym [43], [44].

Zakres UV zawiera fale elektromagnetyczne o długości 100nm – 380nm, z których wyróżniamy trzy podzakresy: UV-C (100nm-280nm), UV-B (280-315nm), UV-A (315nm-380nm). UV-C oraz UV-B są szkodliwe dla organizmów. Przy trwałej ekspozycji mogą powodować poparzenia oraz zmiany nowotworowe skóry. Z tego powodu w zadaniach przemysłowych stosowany jest głównie zakres UV-A. Obrazowanie przy użyciu światła w zakresie UV wymaga specjalistycznych sensorów oraz dedykowanej optyki. Zakres UV stosowany jest przykładowo do obrazowania powierzchni organicznych. Podczas obrazowania może zostać zarejestrowane bezpośrednio światło UV odbite od sceny lub światło w zakresie VIS wygenerowane poprzez reemisję światła UV poprzez zjawisko fotoluminescencji [45].

W celu rejestracji sceny w formie obrazu cyfrowego konieczne jest wykorzystanie matrycy sensorów zawierającego elementy światłoczułe. Matryca zbudowana jest jako matryca pikseli – fotodetektorów oraz odpowiedniego układu elektronicznego. W zależności od wykorzystywanej architektury sensora stosowane są różne metody przetwarzania światła na sygnał cyfrowy. Dominujące technologie sensorów stosowanych w kamerach to CCD oraz CMOS.

Na rysunku 2.1 porównano czułość ludzkiego oka oraz przykładowego sensora kamery wykonanego w technologii CMOS. Kamera rejestruje szerszy zakres spektralny w porównaniu do ludzkiego oka, ze względu na czułość w zakresie NIR.



Rys. 2.1. Porównanie czułości ludzkiego oka oraz sensora CMOS:

a – znormalizowana czułość oka ludzkiego w funkcji długości fali elektromagnetycznej [46],

b – czułość sensora OnSemi Python5000 P1 w wersji monochromatycznej oraz RGB [47]

Technologia CCD polega na rejestracji fali elektromagnetycznej w postaci ładunku elektrycznego. Charakterystyczną cechą tej architektury jest odczyt analogowej wartości ładunku piksela poprzez wykorzystanie wspólnego wzmacniacza oraz przetwornika analogowo-cyfrowego (ADC). Sensory w technologii CMOS charakteryzują się zabudową przetwornika ADC w każdy piksel. Umożliwia to równoległe i niezależne przetwarzanie sygnału analogowego z każdej fotodiody.

Dobór technologii wykonania sensora ma wpływ na szereg czynników. Technologia CMOS poprzez równoległy odczyt każdego z pikseli umożliwia szybszy odczyt z całej matrycy. Przekłada się to na większe maksymalne częstotliwości akwizycji obrazu. Sensory CCD posiadają większą czułość oraz wyższą jakość rejestrowanego obrazu. Wynika to ze stosowania jednolitego wzmacniacza podczas konwersji sygnału analogowego na cyfrowy. Główną zaletą matryc CMOS jest mniejszy koszt wynikający z różnic procesu produkcyjnego oraz miniaturyzacji. Sensory CCD posiadają również większe zapotrzebowanie energetyczne [48]. Ze względu na te różnice w wizji maszynowej w zastosowaniach przemysłowych wykorzystywane są sensory wykonane w technologii CMOS.

Technologie CMOS oraz CCD stosowane są głównie w systemach obrazowania VIS oraz NIR. Ze względu na wykorzystanie fotodiod krzemowych, ich czułość ograniczona jest

do około 1000nm. Systemy wykorzystujące promieniowanie spoza tego zakresu implementują inne technologie jak np.:

- InGaAs – technologia oparta na arsenku galu i indu zamiast krzemu, pozwalająca na obrazowanie długości fali elektromagnetycznej w zakresie NIR/SWIR do około 1.7μm [49],
- matryce bolometryczne – technologia wykorzystywana w kamerach termowizyjnych, rejestrowane długości fal elektromagnetycznych w zakresie IR 8– 14 μm [50],
- SPAD (*Single-Photon Avalanche Diode*) – technologia pozwalająca na detekcję pojedynczych fotonów; stosowana w systemach, gdzie konieczny jest szybki czas reakcji lub wysoka czułość jak LIDAR lub mikroskopia fluorescencyjna [51], [52].

2.2 Parametry optyczne system wizyjnego

Podczas projektowania systemu wizyjnego należy nie tylko uwzględnić dobór poszczególnych elementów i ich bezpośredni wpływ na obraz, ale również ich wzajemne oddziaływanie. W tym rozdziale wprowadzone zostaną kluczowe pojęcia potrzebne do opisu systemu wizyjnego pozwalającego na obrazowanie sceny [53], [54].

Odległość ogniskowa obiektywu (f) – jest to odległość, dla której równoległe promienie światła padające na soczewkę skupiającą ulegną skupieniu we wspólnym ognisku (Rys. 2.2a). W przypadku soczewki rozpraszającej jest to odległość, przy której obserwowane jest ognisko pozorne – punkt przecięcia się przedłużeń promieni wychodzących (Rys. 2.2b). Dla cienkich soczewek sferycznych odległość ogniskowa powiązana jest z promieniem krzywizny powierzchni je tworzących (r) poniższym wzorem:

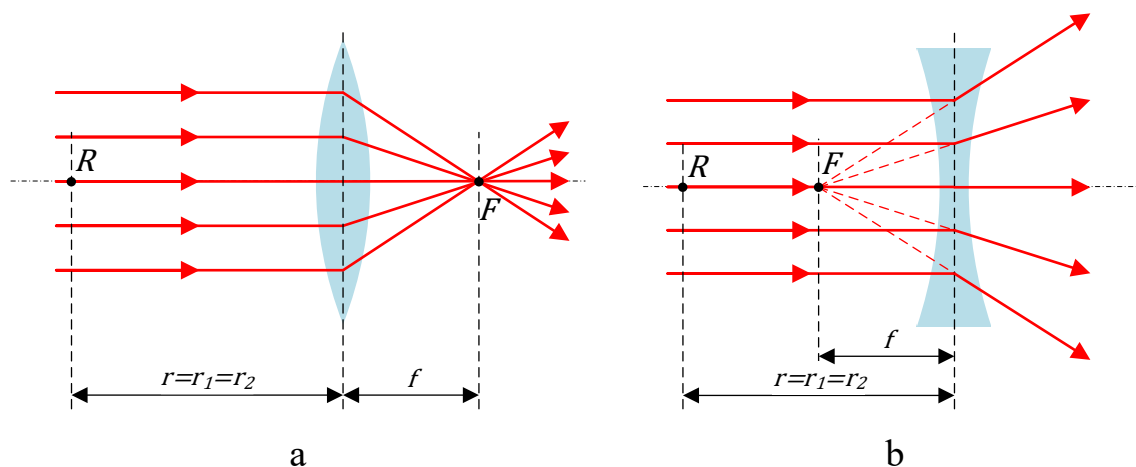
$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.1)$$

gdzie:

f – odległość ogniskowa soczewki,

n – współczynnik załamania światła,

r_1, r_2 – promienie krzywizny obu płaszczyzn soczewki.



Rys. 2.2. Promienie świetlne padające na soczewkę sferyczną o promieniu krzywizny $r = r_1 = r_2$:

a – soczewka sferyczna wypukła o odległości ogniskowej f , promienie równoległe ulegają załamaniu przecinając się w punkcie ogniska F ;

b – soczewka sferyczna wklęsła o odległości ogniskowej f , promienie równoległe ulegają załamaniu pozornie przecinając się w punkcie ogniska F

Parametrem opisującym obiektyw, tożsamym z odległością ogniskową, jest **moc skupiająca** (Φ). Moc skupiającą definiuje się jako zdolność soczewki lub układu optycznego do skupiania lub rozpraszania światła. Wprowadzenie tego pojęcia pozwala na lepszy opis obiektywu jako układu wielu soczewek. Równanie 2.2 opisuje związek między mocą skupiającą soczewki oraz jej ogniskową. Jednostką mocy skupiającej jest dioptria (D), gdzie $1D = \frac{1}{m}$.

$$\Phi = \frac{1}{f} \quad (2.2)$$

gdzie:

f – odległość ogniskowa soczewki,

Φ – moc skupiająca.

Rozdzielczość sensora (R_S) – liczba elementów światłoczułych umieszczonych w strukturze matrycy. Najczęściej podawana jako iloczyn liczby fotodiod umieszczonych w kolumnach i wierszach matrycy:

$$R_S = \{\text{liczba kolumn matrycy}\} \times \{\text{liczba wierszy matrycy}\} \quad (2.3)$$

Jest to wartość tożsama z **rozdzielczością obrazu cyfrowego**, dla której wskazuje liczbę pikseli.

Rozmiar piksela – parametr sensora odnoszący się do fizycznych wymiarów pojedynczej fotodiody w strukturze matrycy kamery, zwykle podawany w μm . Rozmiar piksela determinuje czułość sensora ze względu na ilość światła docierającego do elementu światłoczułego.

Rozmiar sensora – parametr odnoszący się do fizycznych wymiarów sensora kamery. Standardowo podawany w postaci przybliżonej – jako format w calach. Dokładny rozmiar sensora zależny jest od rozdzielczości sensora oraz rozmiaru piksela. Tabela 2.1 zawiera zestawienie kilku przykładowych standardowych formatów sensorów wykorzystywanych w wizji maszynowej.

Tabela 2.1 Zestawienie standardowych formatów sensorów wykorzystywanych w wizji maszynowej [55], [56], [57], [58]

Format	Przykład	Przekątna [mm]	Szerokość [mm]	Wysokość [mm]	Rozmiar piksela [μm]	R_S [-]
1/2"	Sony IMX990	8.2	6.48	5.16	5	1296×1032
1/4"	Sony IMX991	4.1	3.28	2.6	5	656×520
2/3"	Sony IMX250	11.1	8.50	7.09	3.45	2464×2056
1.1"	Sony IMX432	17	14.47	9.94	9	1608×1104
APS-C	e2v EV2S67M	29	20.48	20.48	2.5	8192×8192

Soczewka o odległości ogniskowej f prezentowana jest na rysunku 2.3. **Płaszczyzna przedmiotowa** znajduje się po stronie obrazowanej sceny. Jest to płaszczyzna prostopadła do osi optycznej układu, w której znajduje się obrazowany obiekt. Obiekt znajdujący się na płaszczyźnie przedmiotowej będzie obrazowany w sposób ostry na **płaszczyźnie obrazowej** zlokalizowanej po przeciwnej stronie soczewki.

Położenie płaszczyzn przedmiotowej oraz obrazowej jest powiązane poprzez odległość ogniskową wykorzystanej soczewki zgodnie z równaniem 2.4.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{v} + \frac{1}{u} \quad (2.4)$$

gdzie:

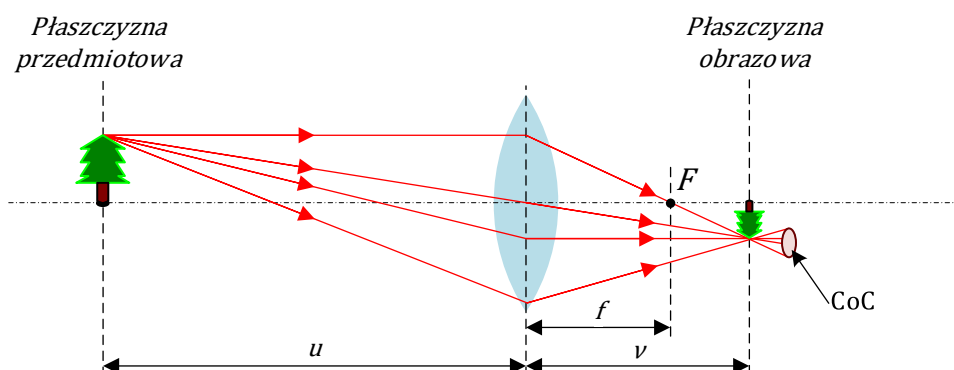
f – odległość ogniskowa soczewki,

v – odległość ekranu (płaszczyzny obrazowej) od soczewki,

u – odległość obiektu (płaszczyzny przedmiotowej) od soczewki.

Podczas obrazowania z wykorzystaniem kamer cyfrowych obraz ostry obiektu otrzymywany jest pod warunkiem zabudowy sensora w płaszczyźnie obrazowej. W kamerach tych korekta ostrości odbywa się poprzez sterowanie pozycją soczewki względem sensora

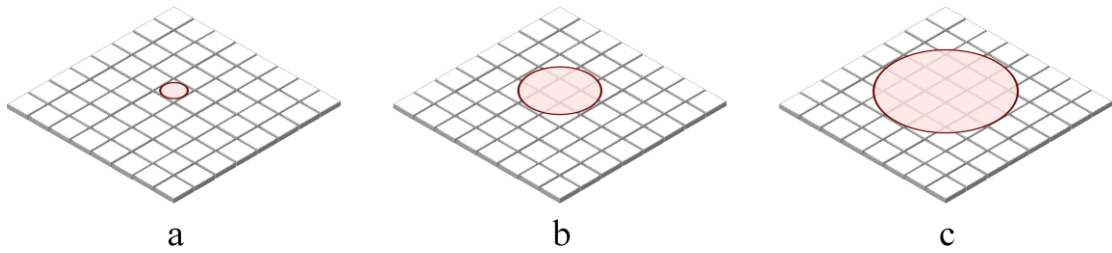
(odległość v) lub zmianą pozycji soczewek w obiektywie, co wpływa na całkowitą moc skupiającą obiektywu.



Rys. 2.3. Schemat układu obrazowania z zaznaczonymi płaszczyznami przedmiotową oraz obrazową wraz z oznaczeniem charakterystycznych odległości

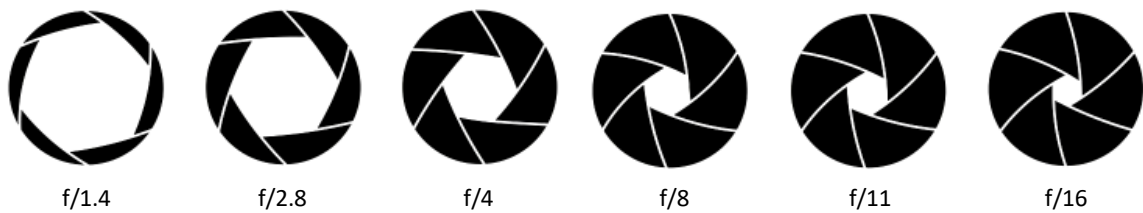
Jeśli sensor kamery nie znajduje się bezpośrednio na płaszczyźnie obrazowej, obraz punktu obiektu nie jest ogniskowany na sensorze. Niezależnie, czy sensor znajduje się za lub przed płaszczyzną obrazową rejestrowany obraz nie jest ostry – każdy z punktów sceny ulega rozmyciu. Poziom rozmycia opisywany jest z wykorzystaniem parametru nazywanego **krążkiem rozmycia** (*Circle of Confusion* – CoC). Na rysunku 2.3 zaznaczono CoC za płaszczyzną obrazową. Wraz ze wzrostem odległości sensora od płaszczyzny obrazowej średnica CoC wzrasta. Zmiana średnicy CoC jest zależna również od apertury oraz odległości ogniskowej obiektywu.

Na rysunku 2.4 zaznaczono CoC przy różnych pozycjach sensora względem płaszczyzny obrazowej. Rozmiar CoC (ϵ) wzrasta wraz ze zwiększaniem odległości płaszczyzny obrazowej od sensora. ϵ odniesiono do rozmiaru piksela matrycy z uwagi na to, że ostrość obiektu na obrazie cyfrowym jest zależna od rozmiaru piksela w zastosowanym sensorze.



Rys. 2.4. Zmiana średnicy CoC (ϵ) wraz ze zmianą odległości sensora kamery od płaszczyzny obrazowej. Rozmiar CoC zestawiono z rozmiarem piksela matrycy: a – obraz ostry ($\epsilon_1 \leq R_s$), b – obraz punktu lekko rozmyty ($\epsilon_1 > R_s$), c – obraz punktu znacznie rozmyty ($\epsilon_1 \gg R_s$)

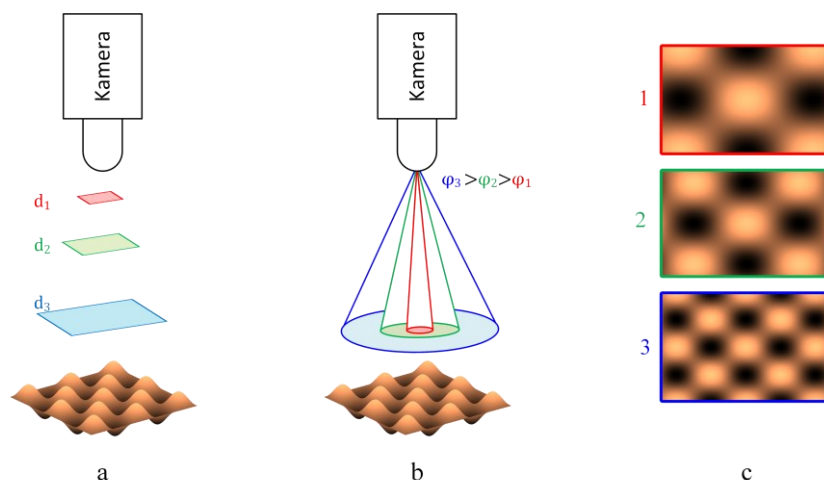
Przysłona aperturowa (F) – element ograniczający ilość światła zbieranego przez obiektyw. Wartość przysłony oznacza się jako $f/\#$, gdzie f odpowiada ogniskowej obiektywu, a $\#$ to wartości przysłony (diafragmy) (Rys. 2.5). Zmiana ustawienia przysłony odbywa się mechanicznie. Konstrukcja standardowej przysłony pozwala na sterowanie względną ilością światła docierającego na sensor. Każda zmiana wartości $\#$ o $\sqrt{2}$ powoduje dwukrotną redukcję gęstości strumienia światła przepływającego przez obiektyw.



Rys. 2.5. Zmiana ustawienia przysłony F powodująca zmianę gęstości strumienia światła

Pole widzenia (FOV) – jest to zakres sceny rejestrowany na obrazie cyfrowym, rzutowany na sensor systemu wizyjnego. Na rozmiar pola widzenia wpływ mają takie parametry jak:

- odległość robocza pomiędzy kamerą a sceną,
- typ obiektywu,
- ogniskowa obiektywu,
- wymiary sensora,
- konfiguracja geometryczna systemu obrazowania.



Rys. 2.6. Pole widzenia systemu wizyjnego rejestrowane dla różnych parametrów systemu:

a – układ ze zmienną odległością roboczą od obrazowanej sceny, przy stałej optyce,

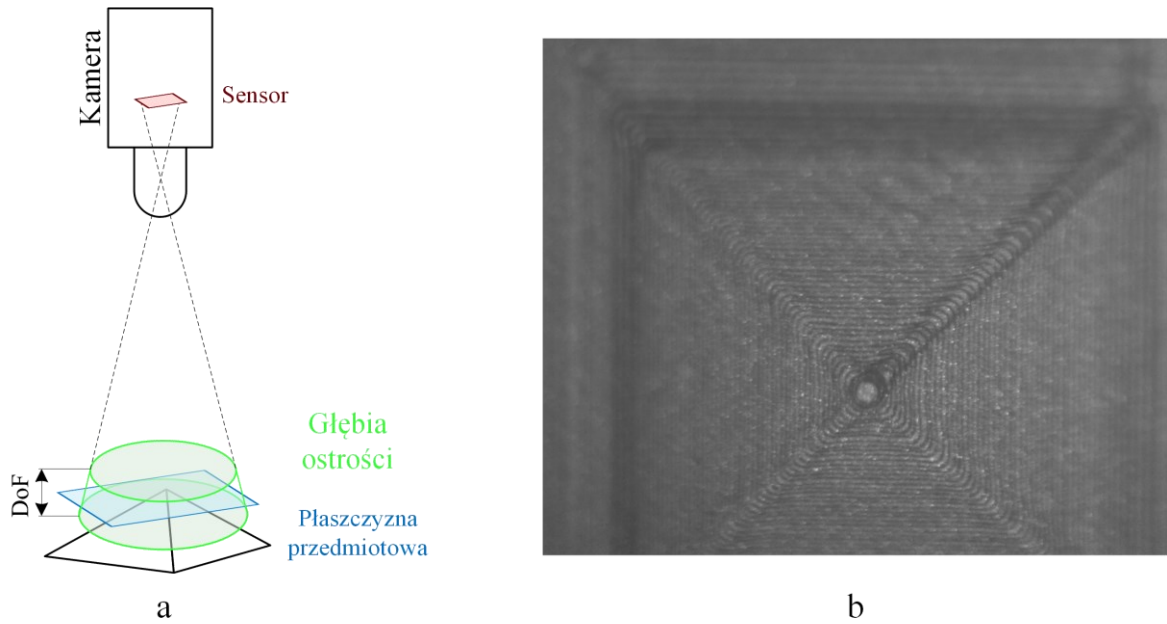
b – układ ze zmienną ogniskową (zmienny kąt widzenia) przy stałej odległości,

c – przykładowy obraz sceny (zmiana pola widzenia)

Minimalna odległość ostrzenia (MOD) – najmniejsza odległość między obiektem a obiektywem, dla której możliwe jest otrzymanie ostrego obrazu sceny. Większość rozwiązań w obiektywach stosowanych do wizji maszynowej pozwala na korektę toru optycznego, np. poprzez modyfikację odległości soczewek od sensora. Dla standardowych rozwiązań wyostrenie sceny na obrazie możliwe jest dla zakresu odległości od wartości MOD do nieskończoności. Przy obrazowaniu elementu znajdującego się bliżej systemu obrazowania niż wartość MOD obraz otrzymywany na sensorze będzie rozmyty bez możliwości jego wyostrenia. Modyfikacja MOD obiektywu jest możliwa z wykorzystaniem dodatkowych elementów jak pierścienie dystansowe lub optyka sterowalna.

Głębina ostrości (DoF) – zakres odległości sceny od obiektywu, dla którego obraz otrzymywany na sensorze pozostaje ostry. Na rysunku 2.7a pokazano geometryczną interpretację parametru głębi ostrości. DoF definiowana jest względem położenia płaszczyzny przedmiotowej. Obiekt mieszczący się między zielonymi płaszczyznami zostaje zobrazony jako ostry. Rysunek 2.7b zawiera obraz obiektu o kształcie ostrosłupa. Płaszczyznę przedmiotową umieszczono na wierzchołku ostrosłupa. Na rysunku 2.7b widoczny jest ostry

obszar wierzchołka oraz górnej części ostrosłupa mieszczącej się w DoF. Pozostała część sceny (nie mieszcząca się w DoF) obrazowana jest nieostro.



Rys. 2.7. Interpretacja głębi ostrości w wizji maszynowej, a – schemat stanowiska z zaznaczoną głębią ostrości względem płaszczyzny przedmiotowej; b – obraz obiektu o kształcie ostrosłupa, tylko górna część elementu mieści się w głębi ostrości

Rozmiar DoF jest zależny od zastosowanego sensora, obiektywu oraz położenia płaszczyzny przedmiotowej. Przybliżony wzór na DoF (przy założeniu, że $u \gg f$) zawiera równanie 2.5.

$$DoF \approx \frac{2u^2 * F * \epsilon_a}{f^2} \quad (2.5)$$

gdzie:

f – odległość ogniskowa soczewki,

F – przysłona,

ϵ_a – rozmiar akceptowalnego CoC

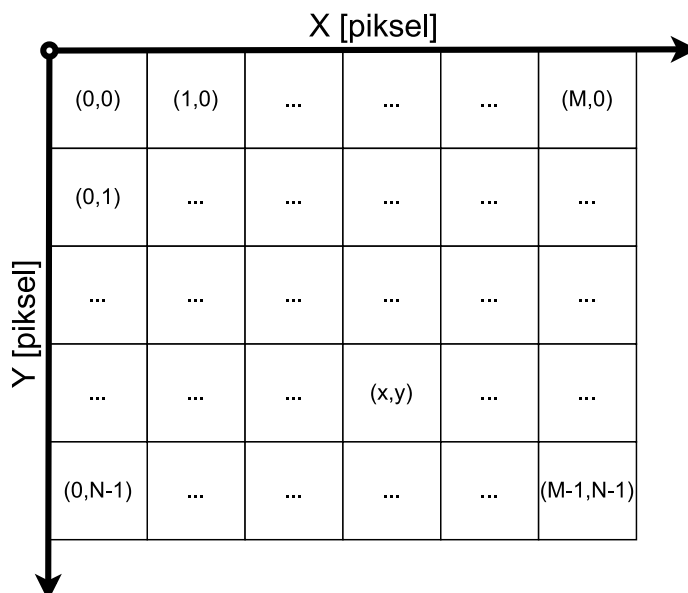
u – odległość obiektu od soczewki.

Rozmiar akceptowalnego CoC przyjmuje się dla konkretnego sensora w zależności od rozmiaru piksela. Nie powinien on przekraczać rozmiaru jednego piksela.

2.3 Obraz 3D – reprezentacja sceny 3D

Obraz 2D reprezentowany jest w postaci macierzy dwuwymiarowej o rozmiarze $N \times M$, gdzie N to szerokość obrazu odpowiadająca liczbie kolumn, M to wysokość obrazu odpowiadająca liczbie wierszy. Każdy element macierzy odpowiada wartości pomiaru światła wykonanego w każdym pikselu. Rysunek 2.8 prezentuje sposób indeksowania pikseli obrazu przyjęty w pracy.

Początek obrazu 2D - środek lokalnego układu współrzędnych związanego z obrazem 2D, umieszczono w lewym górnym rogu obrazu. Numer kolumny odpowiada osi X , natomiast oś Y skojarzona jest z numerem wiersza.



Rys. 2.8. Indeksowanie pikseli obrazu 2D w formie macierzy dwuwymiarowej

Obrazowanie 2D w zadaniach kontrolno-pomiarowych stosowane jest do rejestracji scen płaskich. Jest to rzutowanie obrazu rzeczywistego trójwymiarowego sceny na płaszczyznę matrycy sensorów. Zarejestrowane na obrazie 2D informacje nie pozwalają jednak na wykonanie pomiarów przestrzennych. Do realizacji zadań, w których potrzebne jest wykonanie pomiarów przestrzennych wykorzystywane są metody akwizycji obrazu nazywane metodami obrazowania 3D.

Metody obrazowania 3D pozwalają na rejestrację obrazu trójwymiarowego sceny w sposób pośredni. Podstawowym podziałem metod obrazowania 3D jest rozróżnienie metod

aktywnych oraz pasywnych. Metody aktywne wymagają rejestracji sygnału pochodzącego z interakcji skanera ze sceną z wykorzystaniem sygnału wyemitowanego przez urządzenie. W przypadku metod pasywnych rejestrowany jest sygnał pochodzący ze środowiska, np. światło słoneczne lub światło emitowane przez obrazowany obiekt.

W przeciwieństwie do obrazu 2D, gdzie obraz zapisywany jest w postaci macierzy dwuwymiarowej, obraz 3D może być przechowywany z wykorzystaniem różnych metod. W zależności od wykorzystanej metody akwizycji oraz zastosowania, wykorzystywane są różne typy reprezentacji informacji przestrzennych:

- stos obrazów 2D sceny,
- mapa głębi,
- chmura punktów,
- woksele,
- siatka.

Pierwsza metoda reprezentacji polega na przechowywaniu obrazu 3D w postaci **stosu obrazów 2D** przed wykonaniem przekształceń pozwalających na wyznaczenie głębi. Jest to najprostsza metoda ze względu na brak wykonywania dodatkowych obliczeń, zapisywane są surowe obrazy bezpośrednio po akwizycji. W tej metodzie konieczne jest przechowywanie również dodatkowych informacji związanych z rejestracją obrazów takich jak: geometria pracy systemu wizyjnego, parametry toru optycznego oraz dane kalibracyjne [59].

Mapa głębi – obraz reprezentowany jest przez macierz dwuwymiarową, w której wartości elementów odpowiadają odległości punktu od kamery. Zaletą rozwiązania jest możliwość implementacji obrazu hybrydowego, w którym informacje przestrzenne połączone są z informacją o teksturze obrazowanej sceny. Przykładem jest obraz RGB-D, gdzie obraz trójwymiarowy (składowa D) kodowany jest wraz z kolorem rejestrowanego punktu w postaci składowych RGB. Cechą charakterystyczną jest rejestracja wszystkich parametrów obrazu sceny ze stałą rozdzielczością w osiach X oraz Y [60].

Chmura punktów – metoda pozwalająca na przechowywanie danych przestrzennych w sposób niezorganizowany. Metoda polega na opisaniu sceny za pomocą zbioru punktów o współrzędnych (x,y,z) . Nie jest wymagana stała rozdzielczość w osiach X oraz Y. Metoda pozwala również na obecność w zbiorze kilku punktów o tych samych współrzędnych (x,y) . Pozwala to na reprezentację elementów o skokowej zmianie wysokości np., ścian lub otworów. Metoda umożliwia również reprezentację obrazów hybrydowych poprzez przypisanie punktom dodatkowych informacji np. barwy przypisanej do punktu. Jest to metoda reprezentacji umożliwiająca konwersję na inne metody zapisu danych przestrzennych. Ze względu na to jest szeroko stosowana w otwartych zbiorach danych 3D udostępnianych na licencjach otwartych [16], [61], [62], [63].

Woksele – metoda najbardziej zbliżona do podejścia dla obrazów dwuwymiarowych. Scena reprezentowana w ten sposób dzielona jest na trójwymiarową tablicę o wymiarach N, M, K. Element tej tablicy - woksel, jest odpowiednikiem piksela dla obrazów 2D. Dla każdego z wokseli przyporządkowana jest wartość. Metoda pozwala na przechowywanie nie tylko informacji o powierzchni obrazowanego obiektu, ale również jego wypełnieniu. W przypadku obrazowania powierzchniowego, reprezentacja wykonana wokselami jest mało wydajna zarówno pod kątem wymaganej pamięci, jak również stosowanych przekształceń. Zastosowanie znajduje głównie w obrazowaniu medycznym, np. tomografii komputerowej [64].

Siatka – w przeciwieństwie do poprzednich metod reprezentacja polega na wygenerowaniu siatki zbudowanej np. za pomocą trójkątów. Pozwala to na odwzorowanie nie tylko położenia poszczególnych punktów, ale również orientacji powierzchni. Metoda stosowana jest głównie w grafice komputerowej typu CAD. Przykładowym zastosowaniem może być inżynieria odwrotna, gdzie element obrazowany jest w celu wygenerowania jego modelu CAD [65], [66].

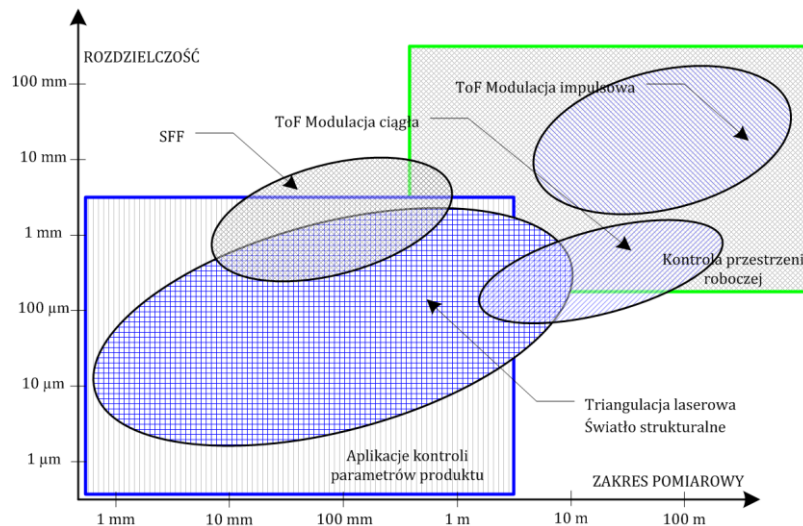
3 Metody obrazowania 3D

Głównymi metodami obrazowania 3D stosowanymi w zadaniach kontroli jakości są triangulacja laserowa, stereowizja oraz *Time of Flight* (ToF). Zakres zastosowania każdej z metod jest inny z uwagi na wymaganą konfigurację sprzętową, możliwe do osiągnięcia rozdzielczości obrazowania oraz ograniczenia i zakłócenia w akwizycji obrazu trójwymiarowego.

Rysunek 3.1 prezentuje przegląd metod o potencjale przemysłowym. Metody zestawiono pod kątem możliwych do osiągnięcia rozdzielczości oraz zakresu pomiarowego. Obok pól dla poszczególnych metod obrazowania autorzy zaproponowali podział ze względu na zastosowanie w celu kontroli:

- przestrzeni roboczej – w tego typu zadaniach nacisk kładziony jest na rejestrację obrazu sceny w większym zakresie pomiarowym, rzędu metrów, kosztem gorszych rozdzielczości obrazowania;
- parametrów produktu – w tego typu zadaniach scena obrazowana jest w mniejszym zakresie pomiarowym, nacisk kładzie się na poprawne i dokładne odwzorowanie sceny umożliwiające pomiary wymaganych cech produktu oraz detekcję uszkodzeń.

Metoda SFF została przez autorów umieszczona w obu grupach, choć rozważano metodę klasyczną z systemem wizyjnym wykorzystującym napęd do zmiany położenia płaszczyzny przedmiotowej. Wprowadzenie optyki sterowalnej do metody SFF zaproponowane w tej pracy ma na celu rozszerzenie zakresu parametrów obrazowania, co pozwoli na rozszerzenie zakresu zadań kontrolnych i pomiarowych możliwych do realizacji względem aktualnie znanych aplikacji i zakresu prezentowanego na rysunku 3.1.

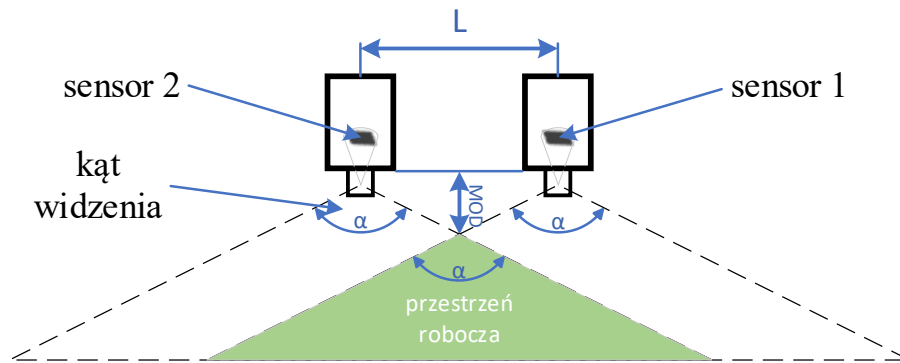


Rys. 3.1. Pola zastosowania metod obrazowania 3D w zależności od zakresu pomiarowego oraz możliwych rozdzielczości [67]

3.1 Stereowizja

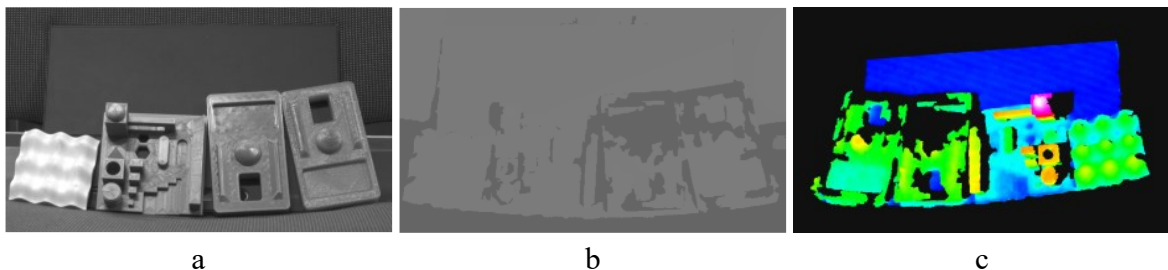
Metoda stereowizyjna jest metodą pasywną. Metoda ta jest najbliższa człowiekowi, ponieważ odzwierciedla ludzkie mechanizmy wykorzystywane w percepcji głębi. Człowiek determinuje odległość na podstawie porównania obrazu z dwóch naturalnych sensorów – oczu. Analogicznie, obrazowanie trójwymiarowe metodą stereowizji bazuje na obserwacji sceny przez układ co najmniej dwóch kamer. W przypadku zastosowania stacjonarnego układu, w celu wyznaczenia głębi, konieczna jest znajomość konfiguracji geometrycznej oraz wykorzystanej optyki (np. odległość między kamerami, kątów widzenia, ogniskowej obiektywu).

Rysunek 3.2 prezentuje schemat obrazowania metodą stereowizji. Do wykonania obrazowania trójwymiarowego obiektu konieczna jest jego obecność w polach widzenia obu kamer. Obszar ten, oznaczony na rysunku kolorem zielonym, stanowi efektywną przestrzeń roboczą układu. W bliskim otoczeniu układu obrazowania powstaje strefa, dla której wyznaczenie głębi nie jest możliwe. Zakres ten został oznaczony na schemacie symbolem MOD.



Rys. 3.2. Schemat funkcjonalny stereowizyjnego systemu wizyjnego – układ z dwiema kamerami; kolorem zielonym zaznaczono obszar przestrzeni roboczej

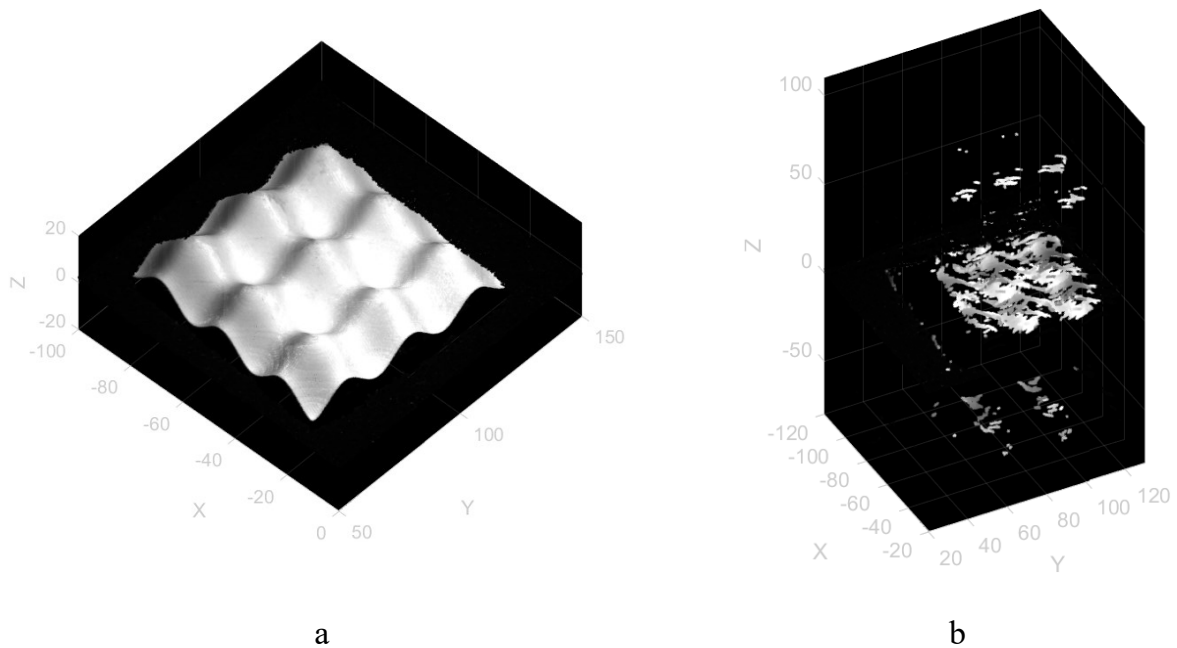
W metodzie stereowizji analizowane są dwa obrazy dwuwymiarowe rejestrowane synchronicznie przez kamery matrycowe (Rys. 3.3a). Na bazie zarejestrowanych obrazów wyznaczany jest obraz dysparycji (Rys. 3.3b). Odbywa się to poprzez porównanie położenia tych samych punktów sceny na obu obrazach źródłowych. Obraz dysparycji zawiera więc różnicę położenia punktów sceny na obu obrazach. W celu wygenerowania skalibrowanego obrazu trójwymiarowego konieczne jest uwzględnienie odległości między osiami optycznymi kamer, danych z obrazów źródłowych oraz obrazu dysparycji i ogniskowych zastosowanych obiektywów (Rys. 3.3c).



Rys. 3.3. Obrazowanie z wykorzystaniem dwukamerowego systemu stereowizyjnego:
a – obraz z kamery lewej, b – obraz dysparycji, c – obraz trójwymiarowy wygenerowany na podstawie mapy dysparycji

Głównym wyzwaniem w metodzie jest odnalezienie tożsamyh punktów sceny na obrazach źródłowych. W przypadku rzeczywistych obiektów powoduje to konieczność poszukiwania nie pojedynczych punktów, a większych obszarów, co przekłada się na wyższą wymaganą moc obliczeniową oraz redukcję możliwych rozdzielczości pomiarowych.

Metoda znajduje zastosowanie w obrazowaniu obiektów o wyrazistej teksturze. Dla materiałów jednorodnych lub błyszczących podejście to może zwracać fałszywe rezultaty. Wadą metody jest również czułość na wszelkie zmiany powodowane ruchem lub oświetleniem. Zmiany geometrii układu oświetlacz – kamera podczas akwizycji powodują błędy podczas generowania obrazu dysparycji, co w skutkuje deformacjami na obrazie trójwymiarowym (Rys. 3.4).

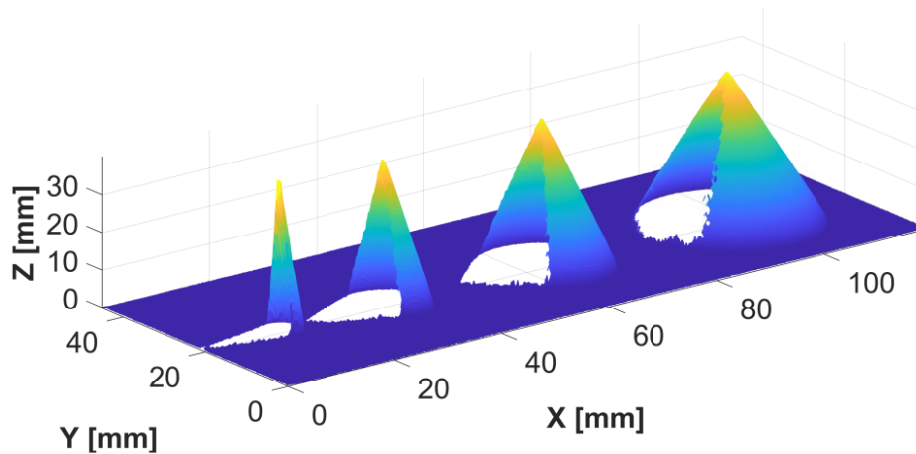


Rys. 3.4. Obrazowanie przykładowego elementu z wykorzystaniem metody stereowizji:

a – obraz poprawnie zarejestrowanego elementu;

b – obraz elementu zarejestrowanego w obecności zakłócenia (drgań)

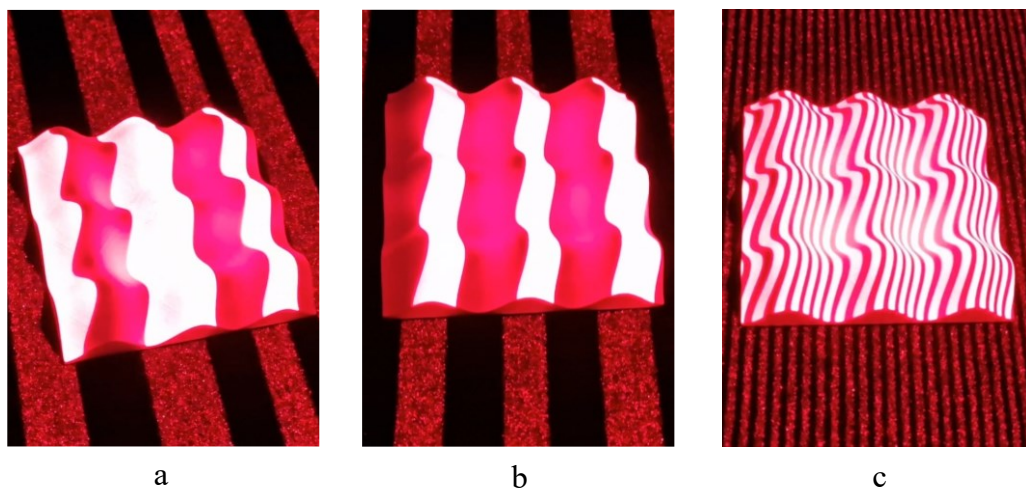
Ograniczeniem pozostaje również występowanie okluzji, czyli obszarów, dla których wyznaczenie danych nie było możliwe. Problem znany jest szczególnie w metodach obrazowania trójwymiarowego wykorzystujących więcej niż jedno urządzenie. Występuje wtedy, gdy nie jest możliwa obserwacja punktu przez obie kamery, co w przypadku metody stereowizyjnej uniemożliwia obliczenie obrazu dysparycji. Rysunek 3.5 prezentuje obraz 3D czterech stożków o różnej średnicy podstawy i kącie pochylenia. Na obrazie widoczne są obszary, w których nie wyznaczono punktów opisujących powierzchnię stożków oraz stołu pomiarowego. Stopień okluzji na obrazie jest zależny od kształtu obrazowanego elementu tj. kąta pochylenia powierzchni bocznej stożka oraz jego wymiarów.



Rys. 3.5. Obraz 3D stożków zawierający punktu bez informacji przestrzennej – okluzje

Technologią, która w metodach stereowizyjnych rozwija się dynamicznie, są skanery wykorzystujące dodatkowy projektor światła strukturalnego. Implementacja dedykowanego projektora zmienia metodę z pasywnej w aktywną. Zadaniem oświetlacza jest wygenerowanie na obserwowanej scenie wzorca. W zależności od podejścia wzorce świetlne może zawierać informacje zakodowane w postaci pojedynczej linii, zbioru linii o pewnej częstotliwości lub kodów dwuwymiarowych. Możliwe są rozwiązania, dla których wymagana jest rejestracja jednego zestawu obrazów źródłowych lub serii obrazów źródłowych o zmiennych parametrach podczas pracy projektora światła strukturalnego. Rozwiązania takie pozwalają na zwiększenie możliwości identyfikacji punktu sceny na obrazie oraz zwiększenie rozdzielczości pomiarowej. Dla obu rozwiązań konieczna jest ścisła synchronizacja wyzwolenia projektora oraz akwizycji obrazów źródłowych.

W przypadku oświetlaczy strukturalnych używających kodowania paskowego wykorzystywane są kodowania o częstotliwości stałej oraz zmiennej (np. kod Gray'a). Dla tych typów kodowania stosowana jest najczęściej rejestracja serii obrazów, dla której zmianie podlega zarówno częstotliwość, jak i położenie linii (przesunięcia o ułamkową część szerokości linii). W zależności od oczekiwanej jakości odwzorowania oraz rozdzielczości rejestrowanej chmury wymagana jest rejestracja od kilku do kilkudziesięciu obrazów źródłowych. Konieczność akwizycji serii obrazów powoduje wydłużenie czasu akwizycji obrazu trójwymiarowego. W zależności od liczby obrazów czas akwizycji tego typu systemów wynosi od kilkuset milisekund do kilku sekund.



Rys. 3.6. Sposoby kodowania światła strukturalnego w formie serii linii:
 a – kodowanie o zmiennej częstotliwości; b – kodowanie o niskiej częstotliwości;
 c – kodowanie o wysokiej częstotliwości

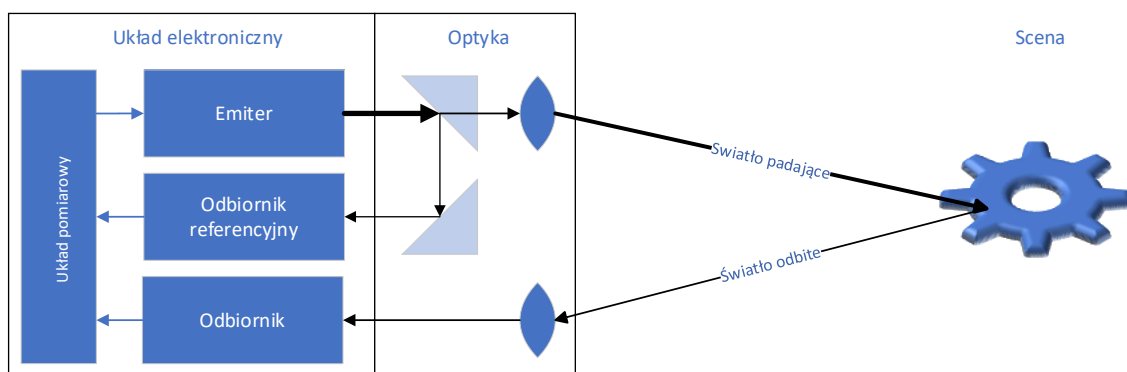
Systemy obrazowania wykorzystujące oświetlacze światła strukturalnego z kodowaniem dwuwymiarowym pozwalają również na zwiększenie jakości odwzorowania w porównaniu do systemów pasywnych. Możliwe jest także obrazowanie w trybie pojedynczej akwizycji, co pozwala na skrócenie czasu rejestracji w zestawieniu z obrazowaniem przy pomocy serii obrazów. Rozdzielczości są jednak ograniczone w porównaniu do rozwiązań wykorzystujących światło strukturalne w formie serii kodów paskowych.



Rys. 3.7. Projektcja światła strukturalne w formie kodu dwuwymiarowego matrycowego

3.2 Pomiar czasu propagacji fal - Time of flight

Time of Flight (TOF) to metoda akwizycji obrazu trójwymiarowego bazująca na pomiarze czasu propagacji światła [68]. Jest to metoda aktywna charakteryzująca się stosunkowo prostą konfiguracją. Urządzenie zbudowane jest z emitera sygnału - fali elektromagnetycznej oraz sensora odpowiedzialnego za rejestrację sygnału odbitego od sceny. Pomiar odbywa się poprzez emisję światła, a następnie porównanie czasu zarejestrowania go na odbiorniku (światło odbite) w stosunku do odbiornika referencyjnego (światło emitowane) (Rys. 3.8).



Rys. 3.8. Zasada działania skanera w metodzie ToF

Przy znajomości czasu propagacji oraz prędkości fali elektromagnetycznej w powietrzu odległość do sceny obliczana jest według wzoru:

$$d = c \times T_{prop}/2 \quad (3.1)$$

gdzie:

d – obliczona odległość od sceny,

c – prędkość fali elektromagnetycznej w ośrodku (dla powietrza przyjmuje się wartość 291 000 000 km/s),

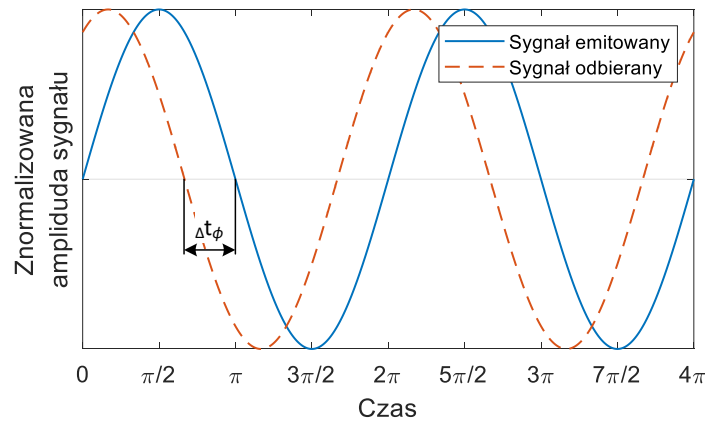
T_{prop} – zmierzony czas propagacji fali.

Głównym problemem podczas pomiarów z wykorzystaniem metody jest prędkość fali elektromagnetycznej w powietrzu. Dla pomiarów odległości rzędu milimetrów konieczny jest pomiar czasu rzędu dziesiątek pikosekund, przekłada się na wysokie taktowanie

przetworników czasu (*time-to-digital converter*) [69]. Problemem badawczym pozostaje wykonanie układów elektronicznych pozwalających na wymaganą częstotliwość taktowania, szczególnie w wykonaniu dla skanerów przemysłowych.

Odmiernym rozwiązaniem do bezpośredniego pomiaru czasu propagacji jest zastosowanie modulacji emitowanej fali. W miejsce pomiaru czasu propagacji impulsu świetlnego stosowana jest ciągła generacja sygnału. Sygnał modulowany jest w dziedzinie amplitudy lub częstotliwości. Analogicznie do bezpośredniego pomiaru czasu propagacji analizowany jest sygnał świetlny ciągły modulowany odbity od obrazowanej sceny.

Rysunek 3.9 prezentuje przykładowy przebieg sygnałów emitowanego oraz rejestrowanego przez przetwornik dla modulacji amplitudowej fali ciągłej. Do wyznaczenia informacji przestrzennej, tj. odległości od czujnika, wykorzystuje się obserwację przesunięcia fazowego Δt_ϕ między modulowanym sygnałem emitowanym a rejestrowanym sygnałem odbitym od obiektu.



Rys. 3.9. Przebieg czasowy sygnałów emitowanego oraz rejestrowanego dla metody pośredniej ToF wykorzystującej modulację amplitudową

Przetworzenie przesunięcia fazowego Δt_ϕ na informację przestrzenną umożliwia zależność 3.2.

$$d = c \times \frac{\Delta t_\phi}{2\pi f_m} / 2 \quad (3.2)$$

gdzie:

d – obliczona odległość od sceny,

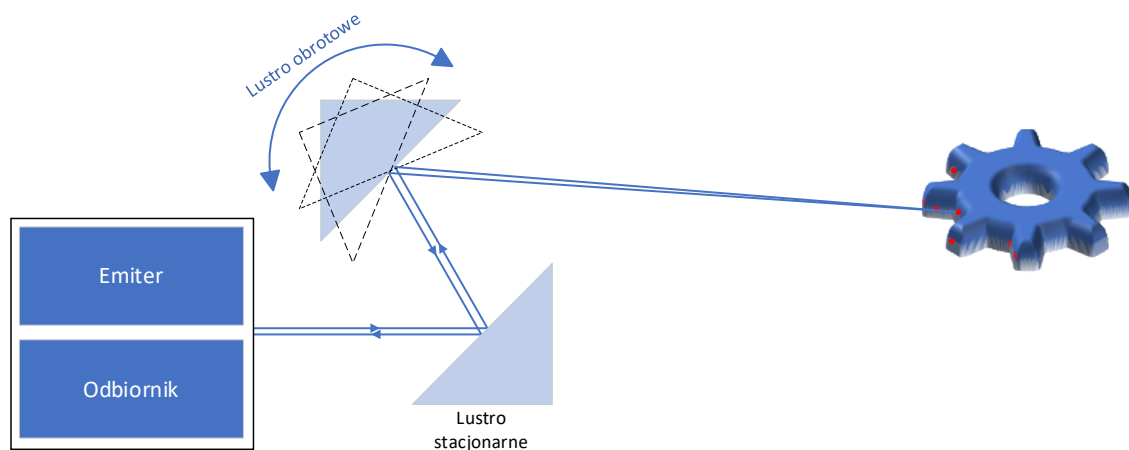
f_m – częstotliwość modulacji sygnału emitowanego,

Δt_ϕ – czas opóźnienia (przesunięcie fazowe) między sygnałem emitowanym, a rejestrowanym,

c – prędkość fali elektromagnetycznej w ośrodku.

Stosowane częstotliwości modulacji to wartości rzędu dziesiątek MHz. Pozwala to znacznie obniżyć wymagania sprzętowe w porównaniu z bezpośrednim pomiarem czasu propagacji wykorzystującym impuls świetlny.

Głównym zastosowaniem powyższej technologii są skanery typu LIDAR. Najczęściej spotykanym rozwiązaniem konstrukcyjnym w tego typu urządzeniach jest wykorzystanie ruchomego lustra. Generowana przez emiter wiązka światła monochromatycznego kierowana jest na lustro obrotowe. Sygnał jest następnie próbkowany i synchronizowany z pozycją lustra. Rozwiązanie takie pozwala na rejestrację wielu punktów sceny przy użyciu pojedynczego układu emiter-odbiornik (Rys. 3.10).



Rys. 3.10. Schemat funkcjonalny skanera ToF z ruchomym lustrem

Aktualnie rozwijane rozwiązania wykorzystują matryce ToF pozwalają na rejestrację obrazu całej obserwowanej sceny w pojedynczym skanie. Równolegle rozwijane są rozwiązania przemysłowe oraz konsumenckie. Poniżej zestawiono przykładowe rozwiązania matrycowych skanerów ToF (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 Zestawienie parametrów przykładowych skanerów w technologii ToF [70], [71], [72]

Urządzenie	Rozdzielczość [piksel]	Maksymalna częstotliwość [Hz]	Odległość robocza [m]	Deklarowana niepewność pomiarowa*	Wykorzystywana długość fali [nm]
SICK Visionary- T Mini	512 x 424	30	0.5 – 9	5 mm	855
Samsung ISOCELL Vizion 33D	640 x 480	60	0.2 – 5	< 2.0% odległości roboczej	940
Teledyne HYDRA3D+	832 x 600	416.7	brak danych	brak danych	850 / 940

*brak informacji o niepewności

Głównymi zaletami metody ToF są jej zakres roboczy oraz możliwość pracy w środowisku zewnętrznym [73]. Przemysłowe skanery typu LIDAR, dzięki zastosowaniu skupionej wiązki lasera, umożliwiają detekcję obiektów w odległości do kilkudziesięciu metrów.

W zastosowaniach teledetekcji w geodezji skanery LIDAR wykorzystywane są między innymi do obrazowania powierzchni ziemi z pokładu samolotu [74]. Do tego typu zadań stosowane są skanery pracujące z odległości od kilkuset metrów do kilku kilometrów do powierzchni ziemi. Otrzymywane rozdzielczości przestrzenne mieszczą się w zakresie 0.1m – 2m, w zależności od celu wykonywanego skanu. Obrazowanie lotnicze wymaga dodatkowej synchronizacji z systemami GPS oraz pokładowymi systemami inercjalnych systemów nawigacyjnych. Przetworzenie danych o pozycji oraz pochyleniu samolotu pozwala na otrzymanie kompletnego i poprawnego obrazu powierzchni.

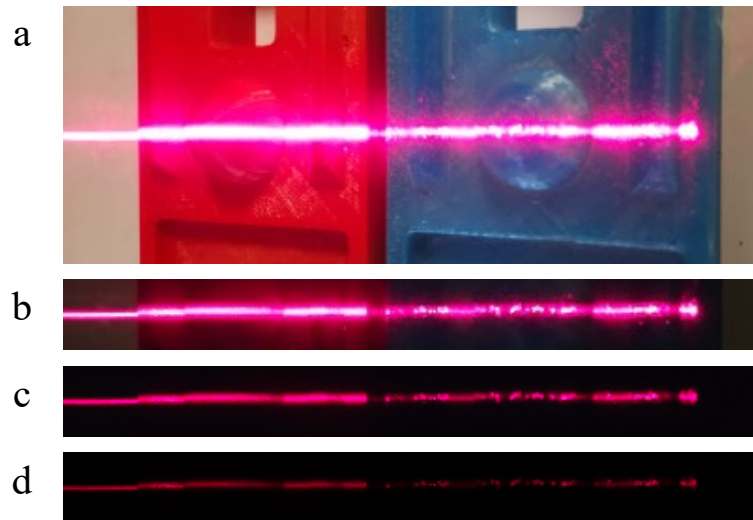
Systemy matrycowe pracują przy mniejszych odległościach roboczych, jednak umożliwiają równoczesną akwizycję kilkuset tysięcy punktów pomiarowych. Obrazowanie w technologii ToF nie wymaga zabudowania sceny, co skutkuje wydajnym obrazowaniem

również w środowisku zewnętrznym – poza budynkami. Technologia posiada sprzętową kompensację pozwalającą na obrazowanie w obecności intensywnego światła słonecznego. Inną zaletą jest czas akwizycji, pozwalający na obrazowanie scen dynamicznych bez rozmycia wynikającego z ruchu sceny. Inną zaletą metody jest możliwość rejestracji obrazu elementów poruszających się względem kamer ToF bez konieczności zatrzymania elementu na czas akwizycji obrazu.

3.3 Triangulacja laserowa

Triangulacja laserowa jest aktywną metodą obrazowania trójwymiarowego. Technologia ta umożliwia ekstrakcję głębi poprzez analizę obrazu sceny oświetlonej oświetlaczem liniowym. Najczęściej spotykanym rozwiązaniem jest wykorzystanie światła lasera monochromatycznego. Wykorzystanie dedykowanej optyki pozwala na oświetlenie sceny linią o jednorodnej intensywności.

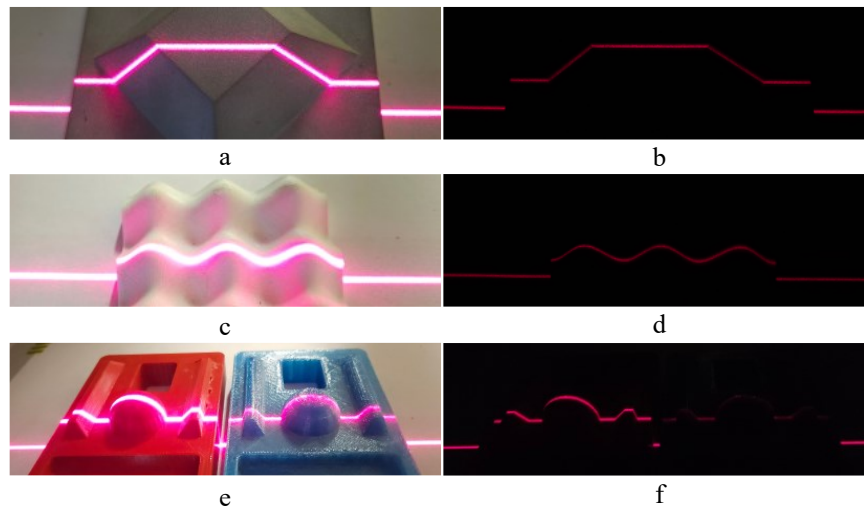
Na rysunku 3.11a pokazano interakcję światła lasera o barwie czerwonej ($\lambda=660\text{nm}$) z elementami wydrukowanymi z materiałów o różnej barwie. Prezentowane obrazy zostały zarejestrowane przy zmiennym czasie ekspozycji zdefiniowanym dla matrycy sensorów. Skrócenie czasu ekspozycji zmniejsza ilość światła odbitego od powierzchni, co pozwala na rejestrację ostrego obrazu linii bez nadmiernego jej rozmycia. Dodatkowo, widoczność linii zależy od długości fali emitowanej przez laser oraz barwy powierzchni, na której projektowany jest laser. Dobór czasu ekspozycji powinien zapewnić rejestrację ciągłego obrazu linii lasera bez widocznych rozmyć (Rys. 3.11b). Rysunek 3.11c prezentuje obraz linii lasera z nieciągłościami uniemożliwiającymi poprawną rekonstrukcję informacji przestrzennej.



Rys. 3.11. Interakcja światła lasera z powierzchnią obiektów wydrukowanych z tworzywa sztucznego o różnych barwach dla różnych czasów ekspozycji:

- a – obraz linii lasera projektowanych na powierzchni wydruków,
- b – dobór czasu akwizycji umożliwiającego obserwację kształtu linii lasera,
- c – prawidłowy obraz - ciągła linia lasera, d – utrata ciągłości linii lasera dla elementu niebieskiego

Do obrazowania metodą triangulacji laserowej wykorzystywany jest ruch obiektu lub systemu wizyjnego. Rejestracja obrazu trójwymiarowego odbywa się poprzez analizę obrazu 2D rejestrowanego dla kolejnych pozycji obiektu względem systemu wizyjnego. Analiza kolejnych obrazów 2D umożliwia wyznaczenie pojedynczych profili 3D [75]. Przykładowe profile wysokości prezentowane są na rysunkach 3.12b, 3.12d oraz 3.12f.



Rys. 3.12. Obraz surowy z sensora przetwarzany na pojedynczy przekrój obrazu trójwymiarowego:

- a, c, e – obraz 2D linii lasera wraz z widocznym obiektem,
 b, d, f – obraz 2D zawierający linię lasera pozwalający na wyznaczenie profilu wysokości

Akwizycja serii profili podczas ruchu względnego obiektu oraz systemu obrazowania pozwala na rejestrację obrazu trójwymiarowego. Względny ruch systemu wizyjnego oraz sceny może być realizowany przez:

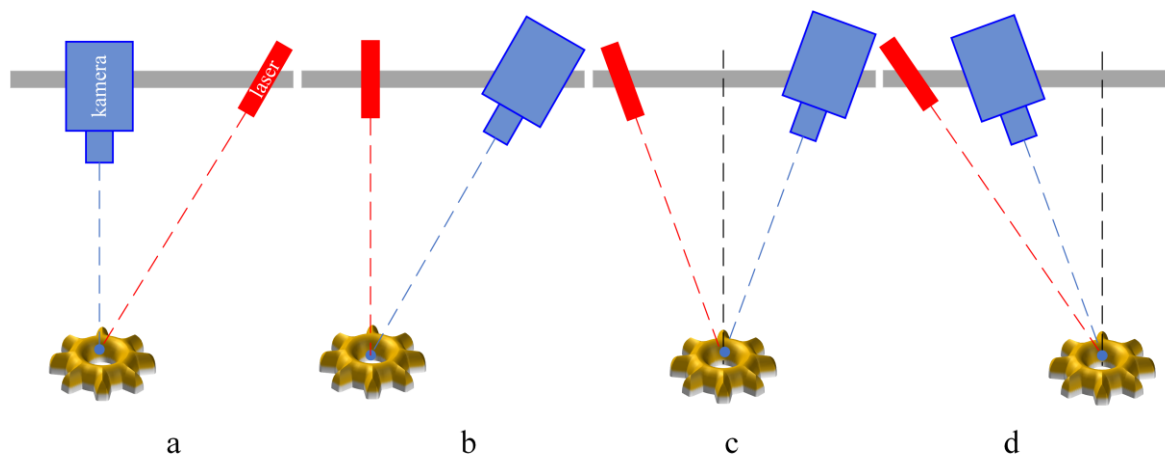
- liniowy ruch systemu wizyjnego przy stacjonarnej scenie,
- liniowy ruch sceny przy stacjonarnym systemie wizyjnym,
- ruch obrotowy systemu wizyjnego przy stacjonarnej scenie,
- ruch linii lasera przy stacjonarnej scenie oraz kamerze – ruch linii lasera może być realizowany przy wykorzystaniu obrotowego lustra lub programowalnego projektora.

Ruch elementu musi być zsynchronizowany z systemem wizyjnym. Synchronizacja odbywa się przez wykorzystanie enkodera zapewniającego próbkowanie sceny co stałą liczbę impulsów enkodera. Wartość ta dobierana jest na podstawie wymaganej rozdzielczości obrazowania ΔY oraz rozdzielczości enkodera. Przy założeniu stałej prędkości ruchu względnego możliwe jest również próbkowanie ze stałym okresem. Okres próbkowania dobierany jest na podstawie prędkości w celu zapewnienia rozdzielczości obrazowania ΔY .

Wartość rozdzielczości ΔY zależna jest więc od przyjętych parametrów projektu systemu wizyjnego. Rozdzielczość obrazowania w osi X wynika z rozstawienia punktów sceny

na sensorze kamery [76]. Parametrami determinującymi rozdzielczość ΔX są więc rozdzielczość sensora kamery, ogniskowa obiektywu (powiększenie) oraz odległość robocza. Podczas projektowania pomiarowego systemu wizyjnego parametry konfiguracyjne stanowiska dobierane są w celu zapewnienia równych wartości rozdzielczości przestrzennej, tj. $\Delta X = \Delta Y$.

Rozdzielczość w osi Z zależna jest od konfiguracji stanowiska – geometrycznego ustawienia układu kamera – laser. Wyróżniono cztery konfiguracje geometryczne układu kamera – oświetlacz (Rys. 3.13) [76].

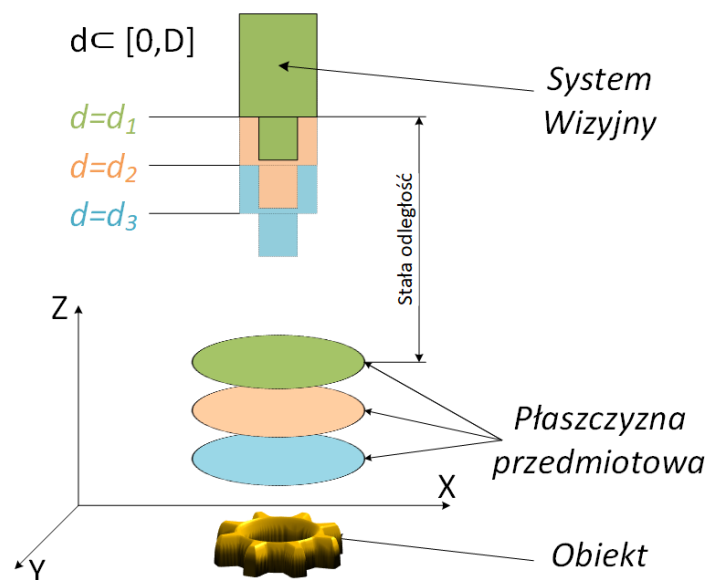


Rys. 3.13. Schemat funkcjonalny geometrii systemu wizyjnego w metodzie triangulacji laserowej:
a – kamera ustawiona prostopadle, oświetlacz kątowno; b – kamera ustawiona kątowno, oświetlacz prostopadle; c – kamera ustawiona kątowno, oświetlacz kątowno w wersji I (ustawienie lustrzane) (ustawienie lustrzane); d – kamera ustawiona kątowno, oświetlacz kątowno w wersji II (ustawienie *look-away geometry*)

Dobór konfiguracji zależny jest od założeń projektowych. W zależności od wybranej konfiguracji otrzymywany jest różny sposób odbicia światła od obiektu. W konsekwencji zmienia się obserwowana na dwuwymiarowych obrazach źródłowych szerokość linii lasera. Konfiguracja determinuje więc czasy naświetlania takiego obrazu, a przez to maksymalne możliwe do rejestracji częstotliwości skanowania, co przekłada się na prędkość, z jaką przemieszczać się może obrazowany obiekt [35], [77], [78].

3.4 Metoda SFF - Shape from Focus

Metoda SFF to metoda obrazowania 3D pozwalająca na wyznaczenie informacji przestrzennych na podstawie analizy stosu obrazów 2D. Każdy z obrazów w stosie jest rejestrowany przy innym położeniu płaszczyzny przedmiotowej względem kontrolowanego obiektu. Przy modyfikacji położenia płaszczyzny przedmiotowej na kolejnych obrazach otrzymywana jest zmiana ostrości poszczególnych obszarów na obrazie cyfrowym. Analiza i selekcja obszarów ostrych wraz z informacją o położeniu płaszczyzny przedmiotowej pozwala na budowę obrazu trójwymiarowego (Rys. 3.14).

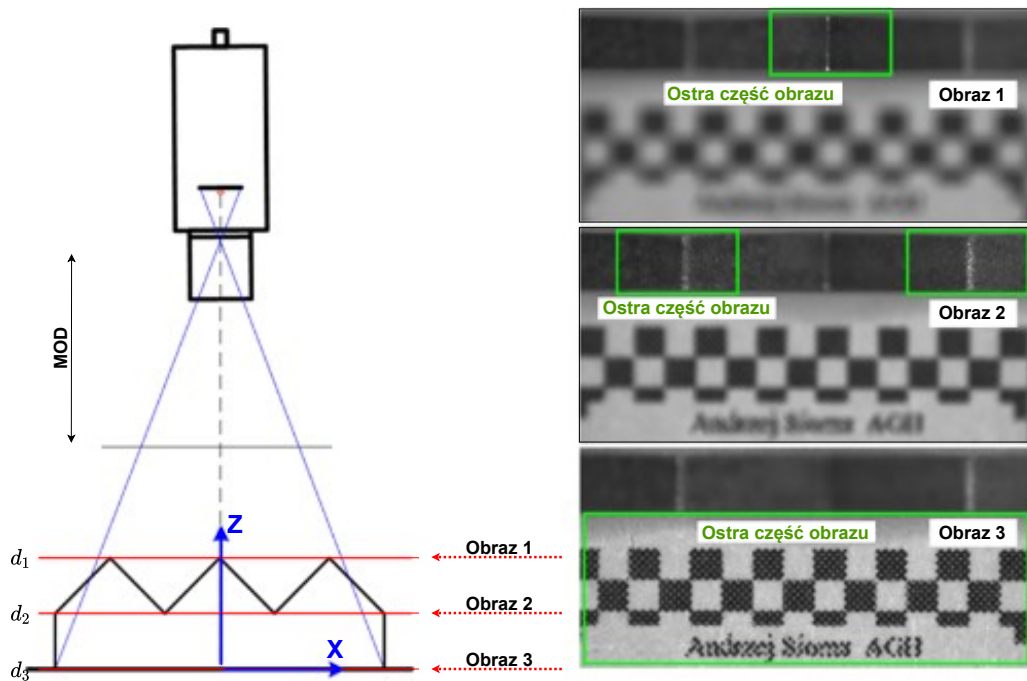


Rys. 3.14. Schemat funkcjonalny metody obrazowania SFF

Analiza obszarów ostrych odbywa się na podstawie przekształceń obrazu cyfrowego zwanych estymatorami ostrości. Ocena ostrości polega na analizie składowych wysokoczęstotliwościowych obrazu [79]. Do estymacji ostrości stosowane są przekształcenia gradientowe, falkowe lub statystyczne. Wykorzystanie optyki zapewniającej niewielką głębię ostrości powoduje, że ostrość na obrazie zapewniona jest tylko dla punktów znajdujących się w bliskim otoczeniu płaszczyzny przedmiotowej.

Rysunek 3.15 prezentuje koncepcję działania systemu obrazowania wykorzystującego metodę SFF. Pozycja płaszczyzny przedmiotowej ulega zmianie w zakresie od d_1 do d_3 . Dla trzech oznaczonych wysokości płaszczyzny przedmiotowej zarejestrowano obrazy

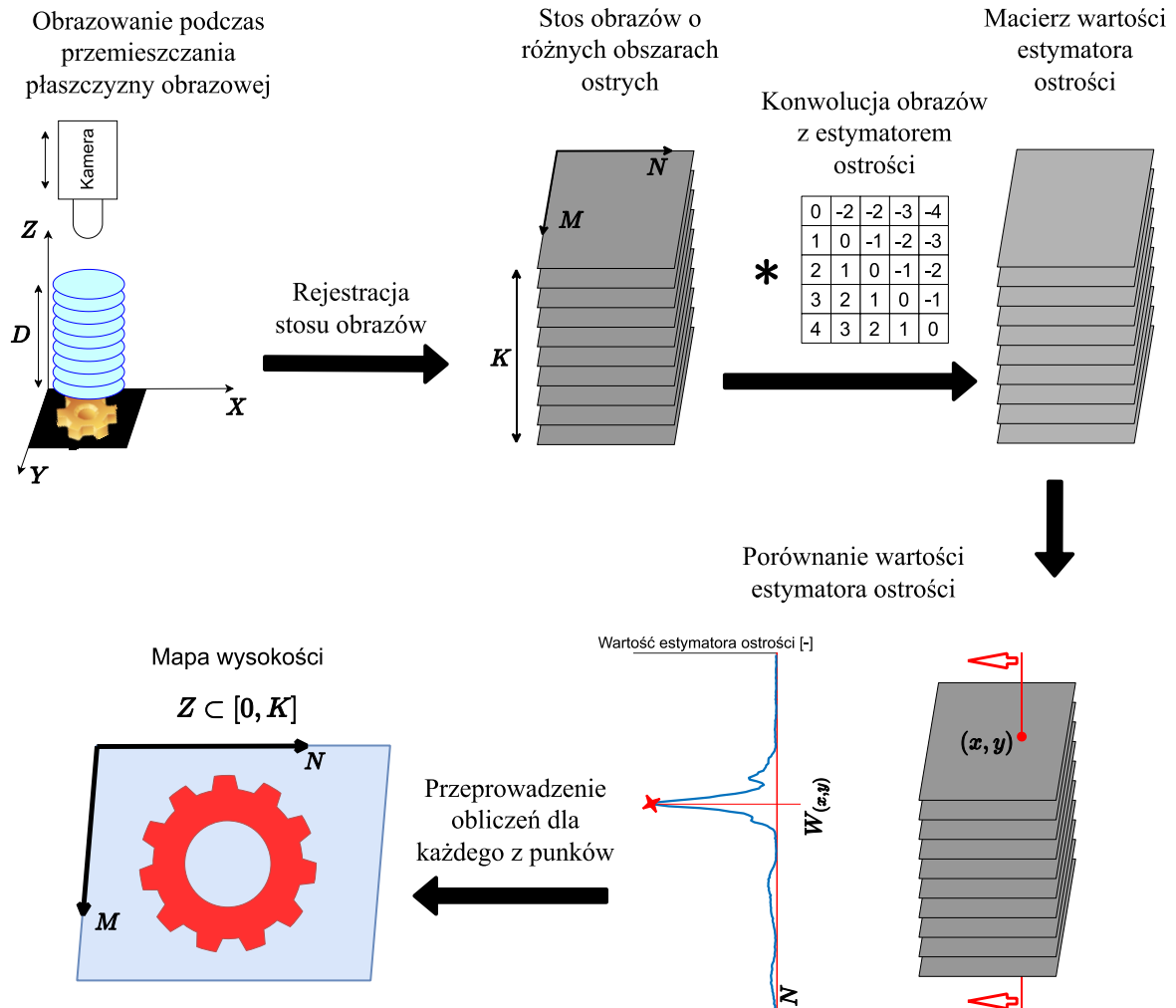
pokazane po prawej stronie rysunku. Kolorem zielonym zaznaczono ostre obszary obrazów odpowiadające położeniu płaszczyzny przedmiotowej. Wraz z modyfikacją położenia płaszczyzny przedmiotowej zmienia się również położenie obszarów ostrych na obrazie.



Rys. 3.15. Akwizycja obrazu w metodzie SFF dla trzech pozycji płaszczyzny przedmiotowej, na podstawie [80]

Położenie płaszczyzny przedmiotowej względem kamery jest stałe. W celu rejestracji stosu obrazów dla metody SFF stosuje się przemieszczenie całego układu optycznego wraz z kamerą wzdłuż osi Z.

Rysunek 3.16 prezentuje uogólniony względem rysunku 3.15 schemat funkcjonalny metody SFF, zawierający poszczególne etapy budowy obrazu trójwymiarowego. Pierwszym krokiem jest rejestracja stosu obrazów wraz z informacją o odpowiadającym im położeniu płaszczyzny przedmiotowej. Następnie, dla każdego piksela stosu obrazów, wykonywana jest estymacja ostrości. Otrzymana w ten sposób macierz używana jest do porównania wartości estymatora dla każdego punktu obrazowanej sceny (x, y) . W wyniku tego kroku otrzymywany jest indeks obrazu o najlepszej ostrości. Poprzez powiązanie indeksu obrazu z informacją o położeniu płaszczyzny przedmiotowej generowany jest obraz trójwymiarowy obiektu.



Rys. 3.16. Uogólniony schemat funkcjonalny metody SFF

Literatura wskazuje zastosowania metody SFF głównie do obrazowania w mikroskopii. Hou [81] analizuje wykorzystanie klasycznej metody SFF do analizy dyszy paliwowej. Obrazowanie obejmowało FOV o wymiarach $7 \times 5 \text{ mm}$. Rozdzielczość w osi Z wynosiła $20 \mu\text{m}$.

W pracy Billiot [82] zbudowano stanowisko pomiarowe do analizy kłosa pszenicy. Uzyskany FOV to $5 \times 5 \text{ mm}$. W pracy analizowano możliwość zwiększenia zakresu pomiarowego w osi Z do 1 m . Zwrócono jednak uwagę na występujące wtedy zakłócenia, związane ze zmianą powiększenia. Wprowadzono modyfikację poprzez mechaniczną zmianę ogniskowej obiektywu, jednak powodowało to zmiany głębi ostrości.

Pomiary parametrów chropowatości metodą SFF zaproponował Wang [83]. Wyznaczono parametr R_a obrazując FOV o wymiarach $0.4 \times 0.5 \text{ mm}$. Do pomiarów wykorzystano

stanowisko z mikroskopem Olympus pozwalające na obrazowania w zakresie wysokości 0.2mm. Zhang [84] zaproponował pomiar chropowatości liści tytoniu, ryżu, bawełny oraz rzepaku. Analizowano FOV o wymiarach 3×2 mm. Podkreślona została potrzeba redukcji czasu akwizycji obrazu trójwymiarowego.

Tang [85] opisał wykorzystanie metody SFF do obrazowania tarczy szlifierskiej w układzie mikroskopowym. Obrazowano FOV o wymiarach 1.28×1.28 mm. Czas akwizycji obrazu trójwymiarowego na bazie 100 obrazów o rozdzielczości 1MPx wynosił 18.2s.

Onogi [86] zaproponował wykorzystanie obiektywu telecentrycznego. Obrazowanie obejmowało obiekty, takie jak korek oraz liść. Zakres pomiarowy w osi Z to 2 – 3 mm. Zwrócono uwagę na występujące błędy związane z estymacją oraz porównaniem ostrości.

Wang [87] zaproponował zwiększenie efektywnego FOV poprzez zwielokrotnienie liczby stosowanych systemów wizyjnych. Każdy z systemów pozwalał na obrazowanie pola 6×6 mm. Zakres pomiarowy w osi Z to $200 \mu\text{m}$. Wielokamerowy system zaimplementowany został do kontroli jakości wykonania waflí krzemowych.

He [88] zastosował SFF do obrazowania elementu aparatu dentystycznego o wymiarach $4 \times 5 \times 2$ mm. Zaimplementowane algorytmy filtracji pozwoliły na redukcję szumów występujących na obrazie 3D. Autorzy wskazali zakłócenia na skokowych zmianach wysokości jako kluczowe wyzwanie badawcze.

Nakajima [89] zaproponował implementację metody SFF w endoskopii. Zaprojektowane urządzenie przetestowane zostało na sztucznym żołądku. Urządzenie o średnicy 11mm i długości 23mm pozwala na obrazowanie w zakresie pomiarowym do 3mm. Ahmad [90] proponuje zastosowanie metody SFF do obrazowania matryc LCD. Wykorzystane zostało stanowisko zbudowane w oparciu o mikroskop. Obrazowane układy scalone miały wysokość $7 \mu\text{m}$.

Wu [91] przeprowadził analizę możliwości wykorzystania metody SFF do obrazowania gwintu z wykorzystaniem stanowisko mikroskopowego. Analizowano zarówno powierzchnię gwintu zewnętrznego oraz wewnętrznego. Obrazowano FOV o wymiarach 1.3×1 mm.

Qiu [92] obrazował macierz mikrootworów o średnicy $250 \mu\text{m}$. W zakresie FOV o wymiarach 4.5×4.5 mm mieściło się 9 mikrootworów. Wykorzystano sensor o rozdzielczości 5MPx, jednak obliczeniom poddano ROI o wymiarach 1024×1024 pikseli.

Cacciari [93] opisuje obrazowanie powierzchni średniowiecznego obrazu. Analizowane są zagłębienia o średnicy 0.5mm oraz głębokości 0.1mm. Autorzy próbują odwzorować kąty podejścia narzędzi podczas tworzenia malunku. Analizowano FOV o wymiarach 5×5mm.

Obserwowane są również równoległe prace nad implementacją optyki sterowanej w obrazowaniu SFF w innych jednostkach badawczych. Gladines [94] wykorzystuje płynną soczewkę do zmiany położenia płaszczyzny przedmiotowej. Zastosowana konfiguracja pozwala na uzyskanie FOV o wymiarach 10×10 mm przy zakresie obrazowania w osi Z równym 10 mm. W celu rozszerzenia FOV proponowane jest łączenie kilku niezależnie zarejestrowanych obrazów 3D [95]. Akwizycja kolejnych obrazów 3D odbywa się po przemieszczeniu obiektu w osiach X i Y z wykorzystaniem napędów. Znacząco wydłuża to jednak proces akwizycji pełnego obrazu obiektu. Zaproponowano również możliwość rejestracji stosu obrazów w takcie ruchu obiektu z prędkością do 15 mm/s [96]. Badania te dotyczą jednak testów laboratoryjnych przez co nie uwzględniają specyfiki skanerów przemysłowych.

3.5 Metody obrazowania 3D – podsumowanie

Przegląd prac z zakresu obrazowania metodą SFF wskazuje na wykorzystanie jej do obrazowania w polu widzenia o wymiarach do kilku milimetrów. Rozbudowa metody w kierunku znaczącego poszerzenia pola widzenia w płaszczyźnie XY i jednoczesnego zwiększenia zakresu obrazowania w osi Z umożliwiłaby znaczące rozszerzenie możliwości jej stosowania w różnego typu zadaniach badawczych oraz w aplikacjach kontrolno-pomiarowych.

Istotnym czynnikiem poruszonym w literaturze jest czas akwizycji obrazu trójwymiarowego. Metoda SFF oparta jest na rejestracji stosu obrazów w niezmiennych warunkach obrazowania. Wymagane jest stałe położenie oraz stałe oświetlenie podczas rejestracji stosu obrazów. Obecność drgań wynikających z pracy maszyn na liniach produkcyjnych wpływa na zmianę warunków obrazowania i jednocześnie na jakość obrazu 3D. Zmiana sposobu rejestracji stosu obrazów umożliwiająca skrócenie czasu akwizycji pozwoli na zmniejszenie

niebezpieczeństwa utraty jakości obrazowania wynikającego ze zmiany warunków podczas rejestracji stosu obrazów.

Zmiana położenia płaszczyzny przedmiotowej w metodzie obrazowania trójwymiarowego SFF poprzez przemieszczanie układu optycznego zmniejsza potencjał budowy urządzenia przeznaczonego do pracy w warunkach przemysłowych. Proponowane w pracy zastąpienie napędów elektrycznych w przemieszczaniu płaszczyzny przedmiotowej uprości konstrukcję systemu obrazowania, co pozwoli na rozszerzenie stosowalności metody.

Omówione w rozdziale trzecim metody obrazowania 3D opierają się na przyjętych założeniach i wymagają doboru specyficznych parametrów determinujących możliwości ich zastosowania w konkretnych zadaniach kontrolnych lub pomiarowych.

Wśród parametrów definiujących zakres zastosowania omówionych metod obrazowania znajdują się:

- rozdzielczość obrazowania,
- odległość robocza,
- pole widzenia,
- ruch lub zatrzymanie skanowanego obiektu,
- konieczność aktywnego oświetlenia,
- występowanie okluzji,
- czas akwizycji,
- wrażliwość na zakłócenia (drgania, oświetlenie zewnętrzne, barwa obiektu),
- złożoność kalibracji systemu,
- koszt systemu obrazowania.

Rozwój metody SFF ma na celu poszerzenie wybranych parametrów obrazowania, co wpłynie na rozszerzenie zakresu zadań możliwych do realizacji z jej wykorzystaniem. Dodatkowo, prace badawcze mają na celu udoskonalenie metody SFF tak, by wykorzystać jej potencjał w realizacji zadań pomiarowych oraz kontrolnych, których aktualnie nie można zrealizować z wykorzystaniem dostępnych metod obrazowania trójwymiarowego.

4 Modyfikacja metody SFF

W pracy zaproponowano wprowadzenie optyki sterowalnej do metody obrazowania SFF. Rozwiązanie to zmienia sposób rejestracji stosu obrazów i wpływa na parametry obrazowania. Wymaga jednak opracowania nowych rozwiązań w zakresie sterowania zmianą położenia płaszczyzny przedmiotowej. Wymaga opracowania nowych algorytmów związanych z analizą parametrów każdego z obrazów zapisanych w formie stosu. Wymaga również opracowania nowych mechanizmów związanych z rekonstrukcją obrazu 3D uwzględniających charakterystykę pracy soczewki płynnej. Wymagania te powodują konieczność rozszerzenia oraz modyfikacji poszczególnych etapów budowy obrazu trójwymiarowego metodą SFF (Rys. 4.1).



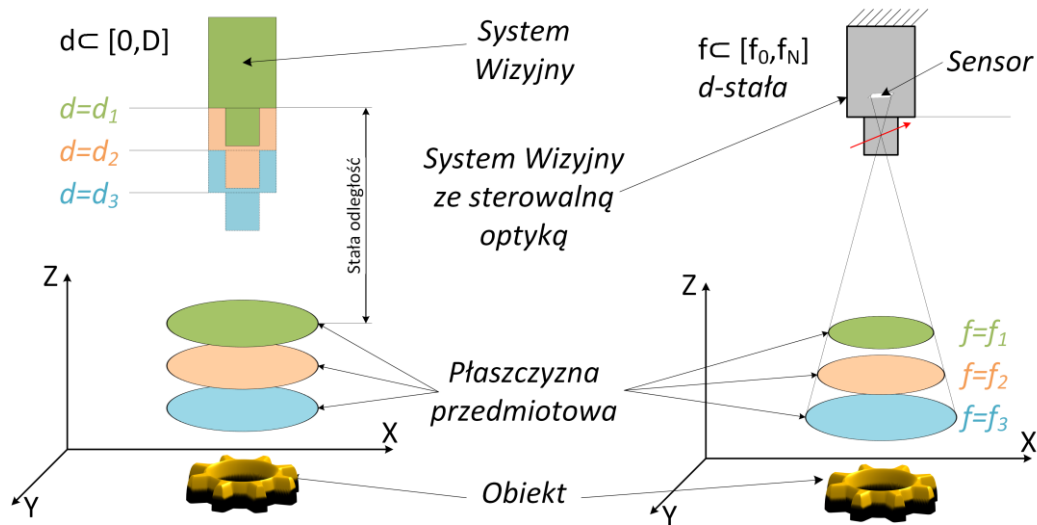
Rys. 4.1. Schemat przetwarzania danych w klasycznej metodzie SFF

Zadania badawcze postawione dla każdego z etapów budowy obrazu trójwymiarowego będą oznaczane jako **(ZB_{numer etapu}{numer zadania})** np. **(ZB_00)**. Zadania te omówiono w rozdziale i zestawiono w tabeli 4.2.

4.1 Rejestracja stosu obrazów

W opracowanym rozwiązaniu zaproponowano usunięcie napędów służących do przemieszczania systemu wizyjnego. Zmiana położenia płaszczyzny przedmiotowej realizowana jest poprzez zmianę parametrów zaproponowanego toru optycznego. System wizyjny rejestrujący stos obrazów pozostaje w zaproponowanym rozwiązaniu nieruchomy i jest zabudowany w stałej odległości od płaszczyzny bazowej, na której umieszczony jest obrazowany obiekt. Dobór metody przemieszczania płaszczyzny przedmiotowej **(ZB_11)**,

na podstawie przeglądu dostępnych technologii, omówiony jest w rozdziale 5 „Zastosowanie optyki sterowalnej w wizji maszynowej”.



Rys. 4.2. Porównanie obrazowania metodą klasyczną oraz z proponowanymi modyfikacjami

Zarówno metoda klasyczna jak również zaproponowana modyfikacja spełniają założoną funkcjonalność metody SFF – rejestrację stosu obrazów przy zmiennym położeniu płaszczyzny przedmiotowej. Implementacja obu rozwiązań wiąże się jednak ze zmianą parametrów obrazowania mających wpływ na dynamikę rejestracji obrazu oraz jakość odwzorowania sceny na obrazie 3D.

Tabela 4.1 zawiera zestawienie parametrów, których wpływ na obrazowanie zidentyfikowano podczas badań wstępnych elementów toru optycznego. Część zjawisk wymienionych w tabeli nie występowała w metodzie klasycznej i jest bezpośrednią konsekwencją wprowadzenia do toru optycznego optyki sterowalnej. Część zjawisk występuje również niezależnie od sposobu zmiany położenia płaszczyzny przedmiotowej.

Parametry te zidentyfikowano jako zagadnienia wymagające głębszej analizy. W rozdziale omówione zostaną sformułowane zagadnienia badawcze oraz omówione zostaną modyfikacje wprowadzone w każdym z etapów obrazowania metodą SFF (Rys. 4.1).

Tabela 4.1 Zestawienie parametrów, na które wpływ ma proponowana modyfikacja

Parametr	Metoda klasyczna	Optyka sterowalna
Zakres pomiarowy w osi Z	Równy zakresowi przemieszczenia kamery	Zależny od doboru parametrów optyki
Wibracje (praca napędu)	Drgania przenoszone z układu napędowego	Brak
Głębina ostrości (DOF)	Stała	Zmienna w zależności od położenia w osi Z
Rozdzielczość obrazu 3D w osi X oraz Y	Stała	Zmienna w zależności od położenia w osi Z
Apertura obiektywu	Dowolna	Ograniczone apertury obiektywów sterowalnych
Wpływ aberracji	Stały, uproszczona kalibracja	Zależny od położenia w osi Z
Czas akwizycji obrazu 2D	Dłuższy – rzędu setek milisekund Ograniczony przez dynamikę napędów oraz masę systemu wizyjnego	Krótszy – rzędu dziesiątek milisekund Ograniczony przez dynamikę soczewki płynnej

Niezależnie od wyboru metody zmiany położenia płaszczyzny przedmiotowej, w czasie akwizycji stosu obrazów obserwowane są niekorzystne efekty wpływające na jakość rekonstruowanego obrazu 3D. Pierwszym z nich jest zmiana wymiarów pola widzenia (FOV) podczas rejestracji stosu obrazów. W przypadku metody klasycznej zmiana pola widzenia powodowana jest przez zmianę odległości między obserwowaną powierzchnią, a matrycą kamery. Natomiast zastosowanie soczewki płynnej powoduje zmianę mocy skupiającej układu optycznego, co przekłada się na zmianę powiększenia oraz kąta widzenia.

Metoda SFF jest odporna na nierównomierność oświetlenia sceny pod warunkiem zapewnienia stałości oświetlania podczas rejestracji stosu obrazów. W celu zapewnienia stałego i powtarzalnego oświetlenia sceny dla systemów pracujących w warunkach przemysłowych zalecane jest dodatkowe oświetlenie zewnętrzne [97].

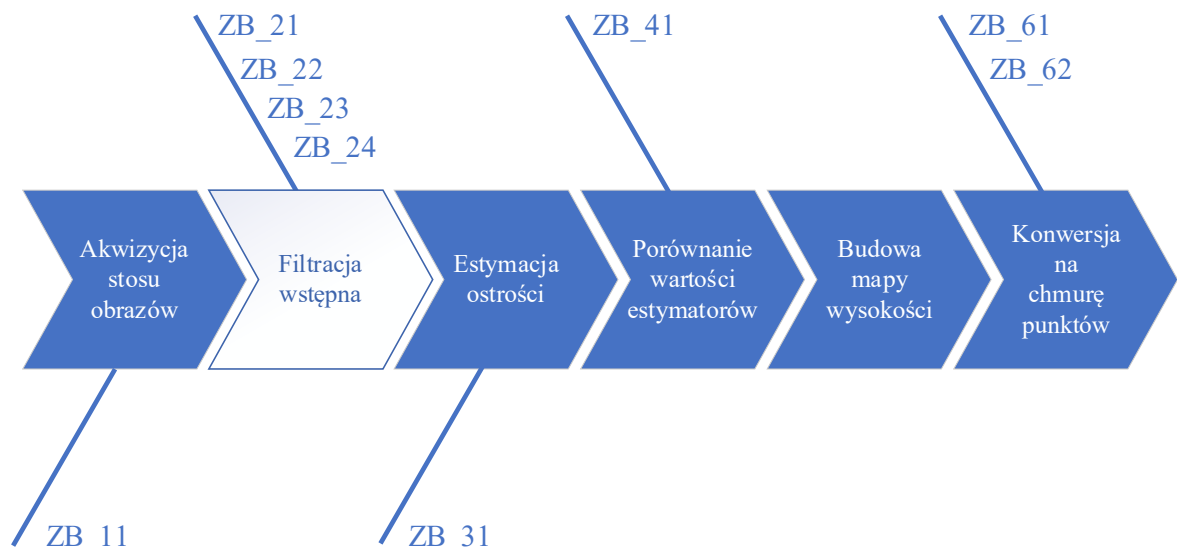
W przypadku wykorzystania klasycznego podejścia do przemieszczenia płaszczyzny przedmiotowej tj. ruchu systemu wizyjnego, powstaje niekorzystny efekt. Zmianie ulega geometria układu kamera – oświetlacz. Dla konfiguracji, w której oświetlacz jest związany z kamerą, podczas przemieszczania zmianie ulegać rozkład intensywności na powierzchni obrazowanego elementu. Dodatkowo, poprzez zmianę drogi optycznej światła (drogi, jaką pokonuje światło od oświetlacza do sensora kamery) zmianie ulega także natężenie oświetlenia powierzchni w zależności od odległości systemu wizyjnego od obrazowanej powierzchni. Zastosowanie do obrazowania soczewki płynnej eliminuje konieczność przemieszczenia systemu, co powinno wyeliminować omówione zjawiska. Szerszy opis tego zagadnienia badawczego (**ZB_22**) omówiony jest w rozdziale 9.3.

Innym zjawiskiem wpływającym na rejestrację stosu obrazów jest wpływ aberracji optycznych. W metodzie klasycznej występował jeden obiektyw o stałych parametrach. Dodatkowo niewielki zakres pomiarowy w osi Z powodował często pomijalne zmiany wpływu aberracji optycznych przy rejestracji stosu obrazów. W podejściu wykorzystującym optykę sterowaną, zmiana mocy skupiającej układu może powodować odmienne efekty. Kolejnym zagadnieniem badawczym jest ustalenie zmian aberracji podczas przemieszczania płaszczyzny przedmiotowej (**ZB_23**). Rozważania w tym zakresie znajdują się w rozdziale 9.2 „Aberracje optyczne”.

Omówione powyżej parametry obrazowania wpływają szczególnie na proces porównywania wartości estymatora ostrości punktu sceny w stosie obrazów. Jest to szczególnie widoczne przy szerszym zakresie zmian położenia płaszczyzny przedmiotowej. W dotychczasowych rozwiązaniach metody klasycznej, np. w mikroskopii, zakres obrazowania w osi Z był na tyle niewielki, że przemieszczenia punktów sceny miały pomijalny wpływ na jakość odwzorowania sceny. W celu wykorzystania proponowanej metody SFF o zwiększonym zakresie pola obrazowania koniecznością jest zaproponowanie algorytmów kompensujących

omówione efekty. Z tego powodu do schematu przetwarzania danych z klasycznej metody SFF (Rys. 4.1) wprowadzono dodatkowy moduł filtracji wstępnej (Rys. 4.3).

Dla zaproponowanej modyfikacji metody SFF zidentyfikowano szereg zagadnień badawczych, które należy wykonać w celu rejestracji obrazu trójwymiarowego. Są one widoczne na poniższym rysunku w formie oznaczeń przypisanych kolejnym etapom rejestracji obrazu 3D.



Rys. 4.3. Rozbudowany schemat przetwarzania danych dla zmodyfikowanej metody SFF wraz ze wskazaniem powiązanych zagadnień badawczych

Opisane na rysunku zagadnienia badawcze zestawiono i opisano w formie tabeli 4.2. Dla każdego z zagadnień wskazano odniesienie do rozdziału, w którym szczegółowo omówiono zaproponowane rozwiązanie.

Tabela 4.2 Lista zidentyfikowanych zadań badawczych

Symbol	Nazwa	Opis szczegółowy
ZB_11	Dobór metody przemieszczania płaszczyzny przedmiotowej	Rozdział 5
ZB_21	Przemieszczanie punktów sceny podczas rejestracji stosu obrazów	Rozdział 9.1
ZB_22	Zmiana natężenia oświetlenia powierzchni podczas rejestracji stosu obrazów	Rozdział 9.3
ZB_23	Wpływ aberracji optycznych	Rozdział 9.2
ZB_24	Wpływ znacznego rozmycia krawędzi	Rozdział 9.4
ZB_31	Dobór estymatora ostrości	Rozdział 7
ZB_41	Dobór algorytmu selekcji płaszczyzny ostrej	Rozdział 7
ZB_61	Zmiana rozdzielczości ΔX , ΔY w funkcji Z	Rozdział 8
ZB_62	Rejestracja obrazów stosu z interwałem mocy skupiającej	Rozdział 8

4.2 Estymacja ostrości na obrazie cyfrowym

Zagadnienie oceny ostrości obrazu cyfrowego wykorzystywane jest zarówno w zadaniu obrazowania metodą SFF, jak również w zadaniach wymagających automatycznego poszukiwania ostrości obrazu (*autofocus*) [98]. Główną różnicą w realizacji tych zadań jest rozmiar obszaru podlegającego ocenie oraz liczba otrzymywanych wartości estymatora ostrości.

Dla zadań typu autofocus liczona jest pojedyncza wartość estymatora ostrości dla obrazu dla danego położenia płaszczyzny przedmiotowej. Metody obliczania estymatora często nie wykorzystują informacji z zakresu całego obrazu, a jedynie z zawężonego obszaru

zainteresowania (ROI). Położenie i rozmiar tego obszaru zależne są od zastosowania, lecz najczęściej nie przekracza rozmiarów 100×100 pikseli [99], [100].

Zadanie estymacji ostrości w metodzie SFF różni się od obliczeń wykonywanych dla zadania autofocus. W metodzie obrazowania SFF konieczne jest obliczenie estymatora ostrości dla każdego piksela – punktu obrazowanej sceny [101]. W wyniku tego przekształcenia generowane są macierze zawierające wartości estymatorów ostrości dla każdego z obrazów stosu. Po wykonaniu obliczeń dla całego stosu powstaje macierz trójwymiarowa zawierająca wartości estymatora ostrości dla każdego piksela obrazów stosu [102].

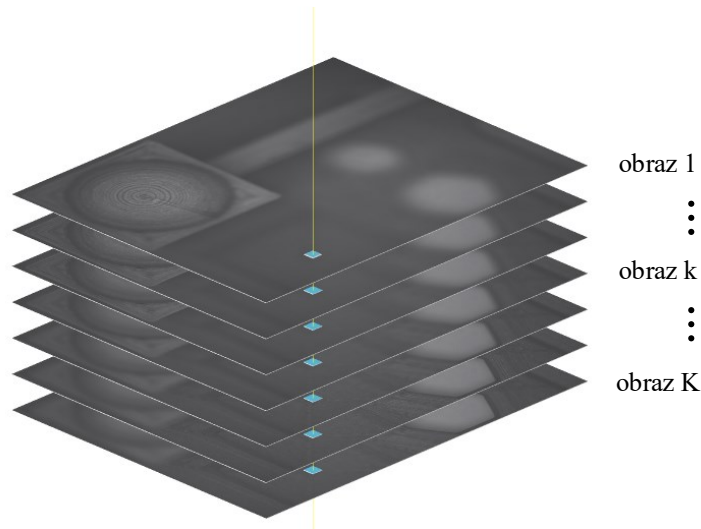
W celu zapewnienia możliwości działania w czasie rzeczywistym czas wykonania przekształcenia na pojedynczym obrazie powinien mieścić się w czasie akwizycji obrazu 2D [103]. Założenie to wpływa na dobór możliwych przekształceń służących do estymacji ostrości w otoczeniu punktu. Na bazie założeń projektowych i przeglądu literatury dla zagadnień SFF oraz autofocus wyodrębniono potencjalne grupy przekształceń do dalszych badań obejmujące:

- estymatory bazująca na pochodnej,
- estymatory bazujące na laplasjanie,
- estymatory statystyczne,
- estymatory bazujące bezpośrednio na intensywności.

Rozważania na temat doboru konkretnych przekształceń oraz badania porównawcze (ZB_31) zostały przedstawione w rozdziale 7 „Ocena ostrości na obrazie cyfrowym”.

4.3 Porównanie wartości estymatora ostrości

Wynikiem oceny ostrości na obrazie cyfrowym jest kolejny stos obrazów zawierających wartość estymatorów ostrości. Kolejnym krokiem w metodzie SFF jest porównanie wartości estymatorów dla tego samego punktu sceny dla każdego z obrazów tworzących stos. Rysunek 4.4 prezentuje schemat porównania wartości estymatora dla punktu obserwowanej sceny (niebieski kwadrat) dla stosu posiadającego K warstw.

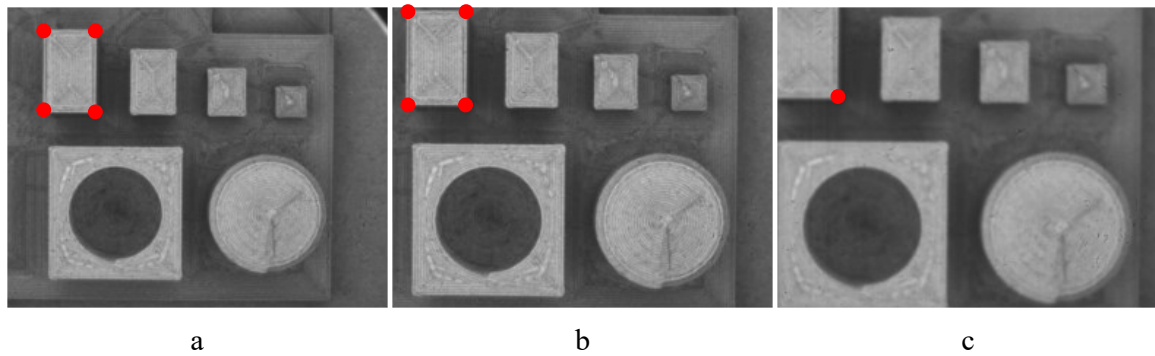


Rys. 4.4. Porównanie ostrości dla wybranego punktu sceny na każdej z warstwie stosu obrazów

Jednym z zagadnień badawczych jest analiza przemieszczeń punktów sceny na kolejnych obrazach stosu związane ze zmianą powiększenia układu optycznego (**ZB_21**). Utrudnia to porównanie wartości estymatora ostrości w punkcie ze względu na konieczność odnalezienia i zapewnienia porównania tego samego punktu na każdej warstwie stosu.

Rysunek 4.5. prezentuje zmianę rozmiaru obserwowanej sceny podczas zmiany mocy skupiającej soczewki o $\Delta\Phi = 3\text{ D}$. Wraz ze wzrostem powiększenia, punkty obrazu sceny ulegają przemieszczeniu promieniowo na sensorze systemu wizyjnego. Na rysunku 4.5 zaznaczono punkty wierzchołków prostopadłościanu. Na obrazie 4.5a wszystkie 4 punkty wierzchołków są widoczne, po zmianie mocy skupiającej o 3 D – na obrazie 4.5c trzy z czterech punktów prostopadłościanu znajdują się poza obrazowanym zakresem pola widzenia.

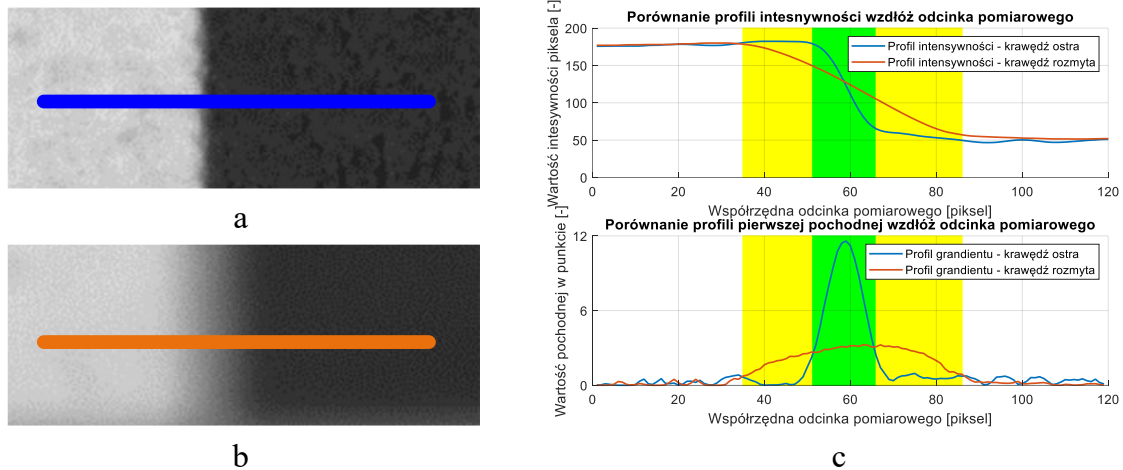
Szczegółowe rozważania dotyczące tego zagadnienia badawczego odnieść można w rozdziale 9.1 „Zmiana powiększenia podczas rejestracji stosu obrazów”.



Rys. 4.5. Zmiana FOV dla obrazowania z zastosowaniem optyki sterowalnej dla różnych nastaw mocy skupiającej soczewki: a – $\Delta\Phi = -3\text{ D}$, b – $\Delta\Phi = -2\text{ D}$, c – $\Delta\Phi = 0\text{ D}$

Kolejnym zadaniem związanym z porównaniem ostrości jest sam proces rozmycia optycznego. Im dalej od płaszczyzny przedmiotowej znajduje się punkt sceny tym większe jest obserwowane rozmycie tego punktu na obrazie. Opis tego zagadnienia zamieszczono w rozdziale 2.2 definiując krążek rozmycia.

Rysunek 4.6 prezentuje efekt rozmycia krawędzi. Rysunki 4.6a i 4.6b zawierają kolejno obraz krawędzi w postaci ostrej oraz rozmytej. Liniami oznaczono odcinek pomiarowy zastosowany do wygenerowania profilu intensywności. Rysunek 4.6c prezentuje profile intensywności wzdłuż odcinka pomiarowego dla obu obrazów oraz pochodną tego przebiegu jako przyjęty estymator ostrości obrazu. W obszarze oznaczonym kolorem zielonym wartość estymatora ostrości dla obrazu ostrego jest większa niż dla obrazu rozmytego. Zakładając bezpośrednie porównanie wskaźnika ostrości, przyporządkowanie płaszczyzny ostrej dla punktów z obszaru zielonego zostanie wykonane poprawnie. Natomiast w obszarach żółtych widoczny jest efekt rozmycia krawędzi na przebiegu intensywności. Powoduje to zwiększenie wartości estymatora ostrości i błędne przyporządkowanie płaszczyzny ostrej dla punktów z zakresu oznaczonego na żółto (Rys 4.6b).



Rys. 4.6. Porównanie rozmycia krawędzi wynikającej ze zmiany mocy skupiającej układu:
a – krawędź ostra z odcinkiem pomiarowym; b – krawędź rozmyta z odcinkiem pomiarowym; c –
porównanie profili intensywności oraz pochodnej intensywności

Wpływ tego efektu jest tym bardziej zauważalny im większy jest zakres zmian położenia płaszczyzny przedmiotowej. Zjawisko to zostało zdefiniowane jako kolejne zagadnienie badawcze (**ZB_24**).

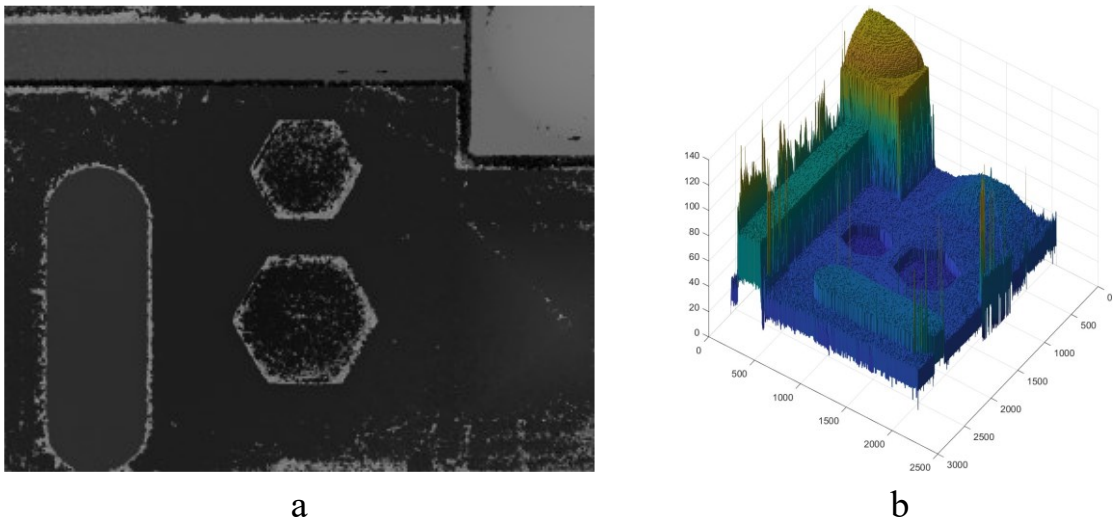
Kolejnym zagadnieniem badawczym z zakresu porównania ostrości punktu sceny jest dobór algorytmu selekcji płaszczyzny ostrej (**ZB_41**). Konieczny jest dobór algorytmu selekcji płaszczyzny ostrej z uwzględnieniem: odporności na zakłócenia, możliwej rozdzielczości, złożoności obliczeniowej oraz potencjału integracji z systemami akceleracji sprzętowej. Rozważania nad doбором algorytmu selekcji płaszczyzny ostrej znajdują się w rozdziale 7 „Ocena ostrości na obrazie cyfrowym”.

4.4 Budowa mapy wysokości

Kolejnym etapem w budowie obrazu 3D jest wyznaczenie mapy wysokości. Mapa wysokości powstaje przez wykonanie przekształcenia omówionego w poprzednim podrozdziale dla każdego z punktów obrazowanej sceny. W ten sposób otrzymywana jest macierz 2D. Wartości w macierzy odpowiadają informacji o wysokości w punkcie. Na tym

etapie wysokość wyrażona jest poprzez numer obrazu o najlepszej ostrości. Numer obrazu powiązany jest z położeniem płaszczyzny przedmiotowej podczas rejestracji stosu obrazów.

Obraz widoczny na rysunku 4.7a prezentuje mapę wysokości zawierającą numery obrazów stosu o największej wartości estymatora ostrości. Obraz 4.7b to wizualizacja 3D mapy wysokości. Intensywność piksela z obrazu 4.7a została wykorzystana jako współrzędna definiująca wysokość punktów w osi Z. Kolor punktu również został powiązany z wysokością dla zwiększenia czytelności. Dane wykorzystane do wygenerowania obrazu trójwymiarowego z rysunku 4.7b poddane zostały dodatkowej filtracji. Na 4.7a widoczne są jasne piksele na krawędziach, są to szumy wysokoczęstotliwościowe. Ich obecność powodowała znaczne zmniejszenie czytelności obrazu 3D.



Rys. 4.7. Obraz trójwymiarowy elementu: a – mapa wysokości w postaci obrazu 2D;
b – wizualizacja trójwymiarowa (chmura punktów)

Widoczne na krawędziach zakłócenia wynikają z sumy wpływu źródeł zakłóceń wymienionych powyżej. Zestawienie wszystkich zidentyfikowanych parametrów wpływających na mapę wysokości wynikających opisano w tabeli 4.1 na stronie 57.

4.5 Konwersja mapy wysokości na chmurę punktów 3D

Mapa wysokości omówiona w poprzednim podrozdziale związana jest z lokalnym układem współrzędnych obrazu. Obraz w osiach X oraz Y reprezentowany jest w jednostkach pikseli (Rys. 2.8). Natomiast wartość tych pikseli odpowiada numerowi obrazu ze stosu obrazów, dla którego dany piksel osiągnął najlepszą ostrość. Koniecznym jest znalezienie transformacji umożliwiającej przeliczenie obrazu z lokalnego układu współrzędnych do układu współrzędnych związanego ze stanowiskiem. W tym celu zasadne jest wprowadzenie kolejnych dwóch zagadnień.

Pierwsze zagadnienie badawcze związane jest z wyznaczeniem rozdzielczości ΔX oraz ΔY (ZB_61). Wartości tych rozdzielczości zależne są głównie od konfiguracji sprzętowej. Jednak ze względu na zmiany mocy skupiającej wprowadzane przez optykę sterowaną, a przez to zmiany FOV, konieczne jest ustalenie zależności rozdzielczości w funkcji położenia w osi Z.

Drugim powiązaniem zagadnieniem badawczym jest wyznaczenie funkcji umożliwiającej przeliczenie informacji o głębi z poziomu mapy wysokości do jednostek rzeczywistych. Konieczne jest wyprowadzenie funkcji przejścia między zmianą mocy skupiającej soczewki płynnej, a położeniem w osi Z (ZB_62).

Szczegółowe omówienie obu tych zagadnień znajduje się w rozdziale 8 „Transformacja obraz – świat”.

Obraz trójwymiarowy wyznaczony bezpośrednio na podstawie stosu obrazów zawiera szereg zakłóceń. Standardowym rozwiązaniem pozwalającym na redukcję ilości niekształceń znajdujących się na obrazie trójwymiarowym jest filtracja. Niepożądanym skutkiem stosowania filtracji jest również eliminacja wraz z zakłóceniami części informacji. Przykładowo transformacje obrazu filtrami uśredniającymi prowadzą do wygładzenia i zaokrąglania krawędzi na obrazie.

Alternatywą do filtracji całego obrazu jest wykonanie mapy ufności. Pozwala ona na ocenę jakościową odwzorowania sceny na obrazie. Dla każdego punktu obrazu trójwymiarowego wyznaczany jest współczynnik wskazujący poziom zaufania do estymacji głębi.

Obliczenie mapy ufności bazować może na różnych danych źródłowych, np.:

- kształcie funkcji ostrości w punkcie,
- zmianach wysokości w otoczeniu punktu na mapie wysokości,
- intensywności w punkcie lub jego otoczeniu.

Możliwe jest również wyznaczenie mapy ufności łączącej różne wskaźniki obliczone na podstawie parametrów opisanych powyżej.

Mapa ufności pozwala na wstępne wskazanie punktów, dla których konieczne jest wykonanie ponownych obliczeń głębi lub wykonanie dodatkowej filtracji. Przekłada się to na poprawę jakości odwzorowania sceny przy jednoczesnej redukcji niepotrzebnych obliczeń dla punktów uznanych za poprawne.

5 Zastosowanie optyki sterowalnej w wizji maszynowej

Kluczową modyfikacją metody SFF zaproponowaną w tej pracy jest zastosowanie optyki sterowalnej w celu przemieszczania płaszczyzny przedmiotowej. Wyjaśnienie różnic konstrukcji obiektywów stałogniskowych i rozwiązań umożliwiających zmianę położenia płaszczyzny przedmiotowej ma kluczowe znaczenie w konstrukcji systemu umożliwiającego obrazowanie trójwymiarowe z wykorzystaniem metody SFF.

5.1 Obiektywy stałogniskowe

Soczewki stałogniskowe to typ soczewek szeroko stosowanych w optyce. Soczewki tego typu produkowane są z wykorzystaniem obróbki mechanicznej materiałów optycznych przez co zachowują stałe parametry. Stosowane materiały charakteryzują się w szczególności wysoką transmisją (transmisyjnością) w wybranym zakresie rejestracji fal elektromagnetycznych. Do produkcji stosowane są nieorganiczne materiały optyczne [104] (np. szkło optyczne dla zakresu VIS, CLEARTRAN™ dla IR, szafir dla UV) oraz tworzywa sztuczne [105] (np. PMMA - szkło akrylowe, poliwęglan).

Soczewki z nieorganicznych materiałów optycznych wytwarzane są metodą odlewu [106]. Konieczną operacją technologiczną jest operacja szlifowania, w której formowany jest kształt soczewki. Obróbka wykańczająca jest operacją kosztowną zwiększającą cenę obiektywu. Zaletą tego rodzaju soczewek jest jednak możliwość zapewnienia lepszych parametrów powierzchni w stosunku do tworzyw sztucznych. Soczewki z nieorganicznych materiałów optycznych zapewniają większe zdolności rozdzielcze wynikające z zastosowania materiałów o większej jednorodności. Materiały tego typu gwarantują większą stabilność wymiarową oraz temperaturową umożliwiając dodatkowo nakładanie specjalizowanych powłok o właściwościach optycznych.

Soczewki z tworzywa sztucznego wytwarzane są metodą wtrysku, co pozwala na zwiększenie wydajności ich produkcji przy zachowaniu powtarzalności parametrów jakościowych [107]. Możliwe jest również wprowadzanie domieszek materiałowych modyfiku-

jących krzywą transmisji obiektywu. Obiektywy tego typu posiadają porównywalne parametry optyczne przy zredukowanej wadze urządzenia. Wadami są natomiast niewielki zakres współczynników załamania światła w stosunku do materiałów ceramicznych oraz trudność technologiczne w nanoszeniu powłok. Większa jest rozszerzalność cieplna oraz wpływ temperatury na współczynnik załamania. Dodatkowo obiektywy tego typu mają tendencje generowania ładunku elektrostatycznego przyciągającego kurz oraz innego typu zanieczyszczenia obecne w środowisku przemysłowym.

Zastosowanie obiektywów stałogniskowych nie pozwala na zapewnienie głębi ostrości w zakresie od 0 do ∞ . Ostrzenie obrazu w przypadku obiektywów stałogniskowych odbywa się poprzez zmianę położenia układu optycznego względem sensora kamery.

Podsumowując, zaletami soczewek stałogniskowych są [108]:

- kontrola kształtu powierzchni – soczewki stałogniskowe mają prostszą konstrukcję. Procesy produkcyjne soczewek są już dopracowane, co pozwala na osiągnięcie kształtu zarówno sferycznych jak i parabolicznych z wysoką dokładnością. Przekłada się to choćby na zmniejszenie zniekształceń optycznych;
- selekcja materiałów – soczewki mogą być produkowane z materiałów o różnych parametrach dostosowanych do potrzeb projektanta. W zależności od potrzeb materiał może być dobrany w celu zwiększenia transmisji w zakresie SWIR/UV, redukcji aberracji chromatycznych lub przenoszonych rozdzielczości;
- apertura – możliwa jest produkcja soczewek stałogniskowych o dowolnym rozmiarze. W zależności od zastosowań możliwe jest szlifowanie zarówno mikro-soczewek (czytniki dysków optycznych) oraz soczewek w o rozmiarach kilku metrów (astronomia);
- koszt – optymalizacja procesów produkcyjnych i seryjność produkcji obniżają cenę standardowych obiektywów zbudowanych z wykorzystaniem soczewek stałogniskowych.

Ograniczeniem soczewek stałoogniskowych jest brak możliwości zmiany ich odległości ogniskowej. Optymalizacja procesów produkcyjnych wymusiła również standaryzację ogniskowych produkowanych obiektywów. W celu zmiany ogniskowej obiektywu konieczna jest budowa toru optycznego złożonego z wielu soczewek. Zmiana ogniskowej odbywa się w przez mechaniczną zmianę odległości między soczewkami. Komplikuje to układ oraz co wpływa niekorzystnie na jego rozmiar, ciężar, wydajność i koszt [108].

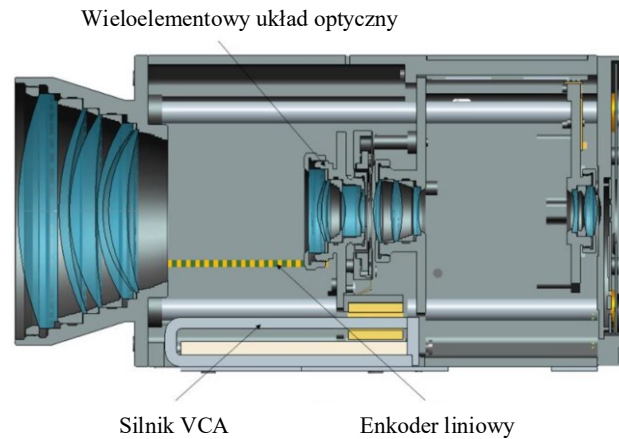
5.2 Obiektywy zmiennooogniskowe zmechanizowane

Obiektyw zmechanizowany to układ umożliwiający zmianę parametrów optycznych toru optycznego przez zmianę pozycji soczewek stałoogniskowych, z których jest zbudowany. Zmiana ta może być realizowana manualnie lub w wykorzystaniem napędów.

Obiektywy manualne posiadają pierścienie, przez które użytkownik może wpływać na poszczególne parametry toru optycznego. Najczęściej, w ten sposób możliwa jest zmiana przysłony oraz realizacja ostrzenia.

Alternatywą jest wykorzystanie dodatkowych napędów. W ten sposób realizowana jest zmiana względnego położenia soczewek w obiektywie lub przemieszczenie całego toru optycznego. Wykorzystując sprzężenie zwrotne z kamery, obiektywy zmechanizowane z napędami umożliwiają automatyczną regulację ostrości na obrazie (*autofocus*). W tego typu zastosowaniach poszukiwane jest maksimum estymatora ostrości liczone dla całego obrazu

Rysunek 5.1 prezentuje przykład zmechanizowanego obiektywu, w którym przemieszczenie części soczewek realizowane jest z wykorzystaniem napędu VCA. Regulacja pozycji soczewek realizowana jest z wykorzystaniem enkodera liniowego.



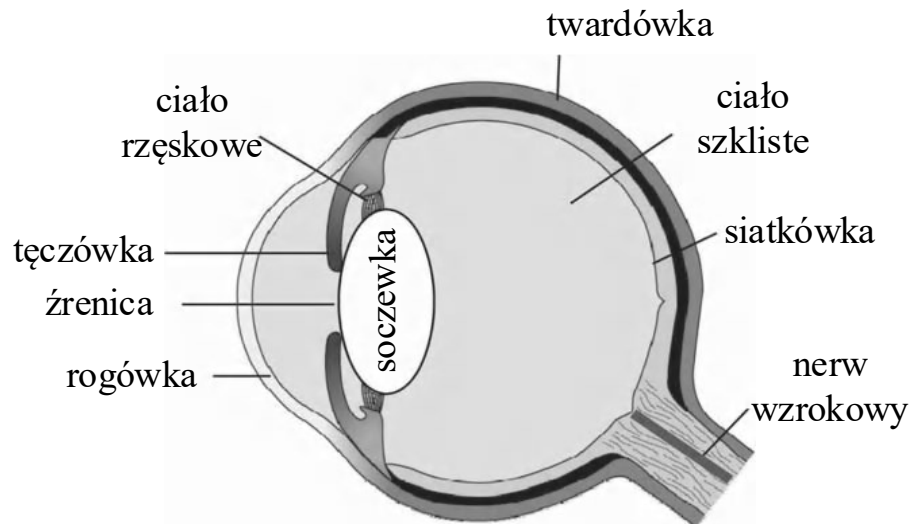
Rys. 5.1 Budowa obiektywu zmechanizowanego z silnikiem VCA [109]

W zależności od zastosowania, potrzeb czasu regulacji, zakresu przemieszczenia i kosztów wykorzystywane są różne typy napędów, np.:

- napęd USM – napęd wykorzystujący fale dźwiękowe [110]
- napęd VCA [111]
- napęd krokowy [112]
- napędy piezoelektryczne [113], [114]

5.3 Obiektywy sterowalne

Idea obiektywów sterowalnych została zainspirowana obserwacją pracy ludzkiego oka, gdzie geometria soczewki, na podstawie informacji zwrotnej z mózgu, jest kształtowana poprzez ciało rzęskowe (Rys. 5.2). Ten układ ze sprzężeniem zwrotnym umożliwia człowiekowi obrazowanie zarówno bliskie jak i dalekie.



Rys. 5.2. Budowa ludzkiego oka [108]

Pierwszy patent dotyczący zagadnienia soczewek płynnych umożliwiających regulację mocy skupiającej został przyznany w 1968 roku w Zjednoczonym Królestwie [115]. Sterowana część układu opisanego w patencie realizowana jest poprzez przepuszczenie wiązki światła przez zbiornik wypełniony transparentnym płynem. Zbiornik z jednej strony jest zamknięty szklaną szybą, natomiast z przeciwnej elementem elastycznym. Zmiana mocy skupiającej osiągana jest poprzez zmianę kształtu soczewki. Zmiana kształtu wymuszona jest poprzez przepływ płynu między komorą roboczą, a zbiornikiem z wykorzystaniem siłowników.

Analiza dostępnej literatury naukowej oraz opisu rozwiązań komercyjnych wskazuje na rozwój tematyki konstrukcji i produkcji soczewek płynnych. W monografii Ren [108] opisano przegląd konstrukcji obiektów sterowalnych z podziałem na ich zasadę działania. Rysunek 5.3 prezentuje schemat podziału technologii soczewek płynnych. Największe zastosowanie na rynku komercyjnym znajdują technologie soczewki z elastyczną membraną [116], [117] oraz soczewki bazujące na zjawisku *electrowetting*'u [118], [119]. Z tego powodu oraz ze względu na dostępność oraz możliwość integracji z kamerami przemysłowymi w pracy rozważano te dwie technologie. Bardziej szczegółowa analiza konstrukcji i zasady działania tych soczewek płynnych znajduje się w dalszej części rozdziału.



Rys. 5.3. Wiodące technologie soczewek płynnych

Obiektywy wykorzystujące soczewki płynne, w stosunku do obiektywów zmechanizowanych charakteryzują się m.in. lepszą dynamiką, mniejszymi mocami potrzebnymi do sterowania, miniaturyzacją oraz mniejszymi kosztami. Jako wady obiektywów sterowalnych można wymienić mniejsze apertury, mniejsze możliwości kształtowania geometrii soczewek, czy brak możliwości nakładania powłok.

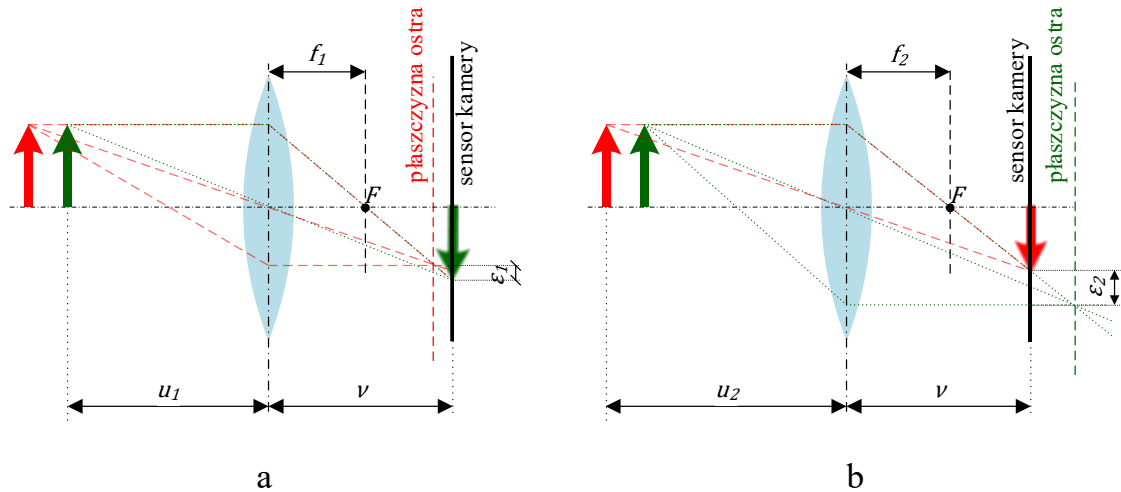
W pracy, optyka sterowalna zastosowana została do rejestrowania stosu obrazów przy zmiennym położeniu płaszczyzny przedmiotowej. Niezależnie od zastosowanej technologii płynnej soczewki, każda umożliwia zmianę położenia płaszczyzny przedmiotowej przez zmianę mocy skupiającej Φ . Jest to tożsame ze zmianą ogniskowej obiektywu (f).

W celu rejestracji ostrego obrazu wybranego elementu sceny konieczne jest ustawienie na nim płaszczyzny przedmiotowej (Rys. 5.4). Przy zastosowaniu płynnej soczewki odległości między obiektywem, a sensorem (v) pozostaje stała.

Obrazując obiekt znajdujący się w odległości u od systemu wizyjnego konieczne jest ustawienie mocy skupiającej układu optycznego do wartości Φ zgodnie z zależnością 5.1.

$$\Phi = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad (5.1)$$

Rysunek 5.4 to graficzna interpretacja równania 5.1. Rysunek 5.4a prezentuje układ po ustawieniu płaszczyzny przedmiotowej na zielonej strzałce ($u = u_1$). Zielona strzałka zostanie zarejestrowana na obrazie cyfrowym jako ostra. Czerwona strzałka ulegnie natomiast rozmyciu na powierzchni sensora kamery. Punkt wierzchołka strzałki czerwonej zostaje zogniskowany przed sensorem kamery. Na obrazie cyfrowym wierzchołek czerwonej strzałki zostanie rozmyty na powierzchni krążka rozmycia o średnicy ε_1 .



Rys. 5.4. Schemat działania ostrzenia z zastosowaniem technologii płynnych soczewek:
 a – obrazowana ostro płaszczyzna zielonej strzałki, b – obrazowana ostro płaszczyzna czerwonej strzałki

Ostry obraz strzałki czerwonej rejestrowany jest na sensorze po zmianie mocy skupiającej obiektywu ($f = f_2$). Powoduje to zmianę położenia płaszczyzny przedmiotowej ($u = u_2$). W tym przypadku rozmyciu ulega strzałka zielona (Rys. 5.4b). Wierzchołek strzałki zielonej zostanie skupiony za sensorem, przez co ulegnie on rozmyciu na powierzchni sensora w formie krążka rozmycia o średnicy ε_2 .

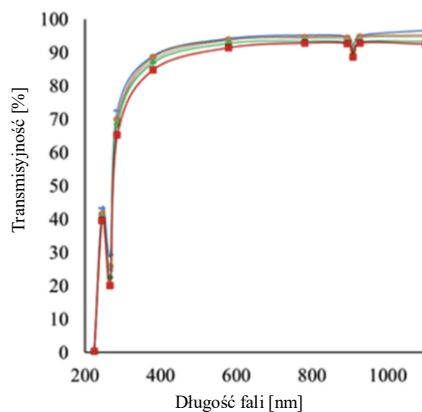
Kluczowym elementem soczewek płynnych jest elastyczna membrana. Zamyka ona ciecz roboczą i formuje kształt soczewki. Materiały wykorzystane do budowy soczewek płynnych oraz rozwiązania konstrukcyjne umożliwiające zmianę mocy skupienia soczewek są obecnie przedmiotem intensywnych badań i rozwoju. Kluczowymi czynnikami przy doborze parametrów materiałów wykorzystywanych jako membrana są:

- wysoka transmisyjność – membrana soczewki powinna przepuszczać jak największą ilość światła w całym widmie światła widzialnego;
- wysoka sprężystość – materiał powinien odkształcać się równomiernie pod wpływem przyłożonego ciśnienia bez występowania uszkodzeń trwałych. Po ustąpieniu ciśnienia, membrana powinna powracać do stanu początkowego;
- właściwości chemiczne – materiał nie może reagować z wykorzystywanym w urządzeniu płynem. Powinien być odporny na długotrwałe działanie promieniowania widzialnego, podczerwonego oraz nadfioletu;

- właściwości fizyczne – materiał nie może puchnąć oraz kurczyć się pod wpływem zmian wilgotności powietrza. Powinien być odporny na zmiany temperatury, charakteryzować się wysoką temperaturą topnienia i nie powinien być toksyczny.

W większości proponowanych rozwiązań spotykana jest membrana z tworzywa sztucznego - poli(dimetylosiloksan) (ang. Polydimethylsiloxane - PDMS). Zaproponowany materiał posiada szereg parametrów kluczowych dla zastosowania w soczewce. Jest to materiał hydrofobowy. Własności fizyko-chemiczne pozostają stabilne w szerokim zakresie temperatur (-50°C do 200°C). Moduł Younga wynosi między 360-870 kPa, współczynnik załamania światła równy 1.43.

Transmisyjność PDMS w świetle widzialnym utrzymuje się w okolicy 90% (Rys. 5.10). Charakterystyka wskazuje możliwość zastosowania materiału do obrazowania w zakresie światła widzialnego oraz bliskiej podczerwieni. Obrazowanie w zakresie światła UV jest możliwe, lecz ze znacznie mniejszą transmisyjnością niż w świetle widzialnym. Natomiast, w zakresie światła UV PDMS posiada większy współczynnik transmisji niż szkło.



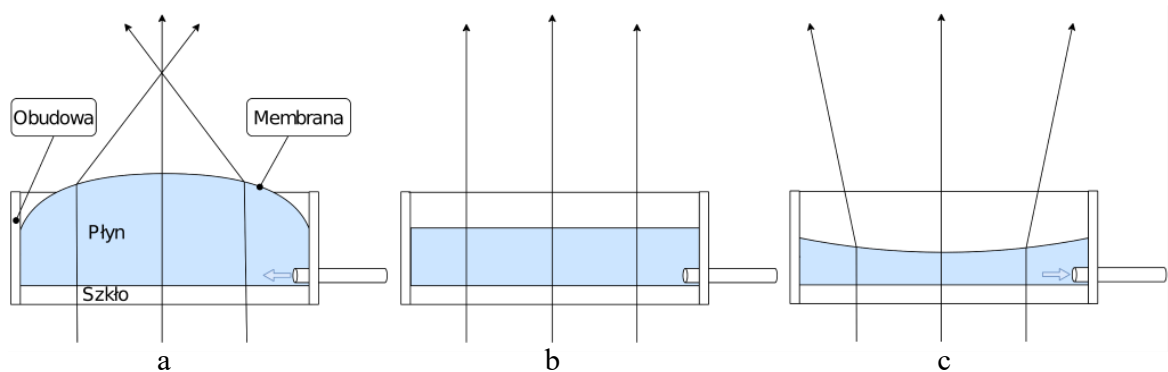
Rys. 5.5. Charakterystyka transmisyjności w funkcji długości fali dla membrany wykonanej z PDMS [120]

Soczewki płynne bazujące na modyfikacji kształtu soczewki

Bazując na obserwacjach oka opracowano koncepcje budowy soczewki płynnej o zmiennej geometrii – kształcie soczewki. Zmiana kształtu soczewki realizowana jest przez oddziaływanie na płyn wypełniający komorę zamkniętą elastyczną membraną formującą soczewkę. Rozwijane są dwie koncepcje budowy takich soczewek i sterowanie ich kształtem:

- zmiana kształtu poprzez zmianę objętości płynu w soczewce,
- zmiana kształtu bez zmiany objętości płynu.

Pierwsza konstrukcja polega na zamknięciu zbiornika roboczego membraną umożliwiającą przenikanie światła. Zbiornik ten wypełniany jest płynem o odpowiednich właściwościach optycznych, chemicznych i fizycznych. Kształt soczewki zmienia się pod wpływem zmiany objętości płynu w komorze zamkniętej elastyczną membraną. Powoduje to zwiększenie ciśnienia w zbiorniku wpływając na odkształcenie membrany. Efektem tego jest zmiana zdolności skupiającej układu optycznego (Rys. 5.6).

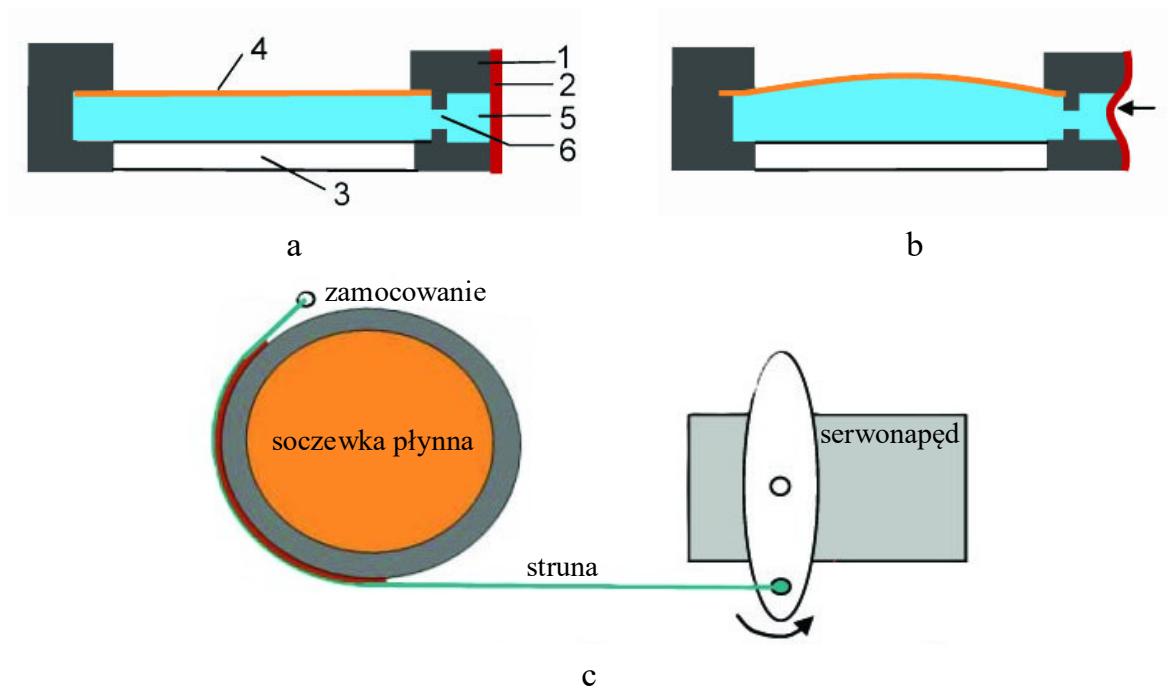


Rys. 5.6. Budowa i działanie soczewki z elastyczną membraną w zależności od ilości płynu:

a – płasko-wypukła, b – płasko-płaska, c – płasko-wklęsła

Zmiana objętości płynu w zbiorniku może być realizowana na różne sposoby. Dominującą metodą jest kontrolowany przepływ między zbiornikiem roboczym oraz zbiornikiem buforowym. W literaturze opisano rozwiązania bazujące na wykorzystaniu m.in. aktuatora bazującego na elektrycznym silniku liniowym, napędu piezoelektrycznego oraz sprężyn z SMA (Shape Memory Alloy).

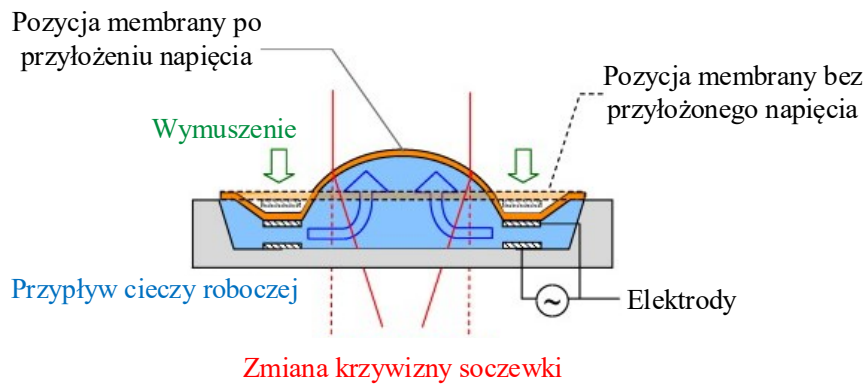
Rysunek 5.3 prezentuje mechanizm zmiany kształtu soczewki z elastyczną membraną (4) wykorzystujący serwonapęd. Przepływ ciecchy między zbiornikiem roboczym i buforowym (5) wymuszony jest przez nacisk na elastyczną ściankę (2) przez strunę. Sterowanie ilością ciecchy przepływającą między zbiornikami (6) odbywa się przez kontrolę kąta serwonapędu zamocowanego do struny. Drugi koniec struny zamocowany jest na stałe.



Rys. 5.7. Zmiana objętości płynu z wykorzystaniem serwonapędu:

1 – obudowa, 2 – elastyczna ścianka, 3 – szklana szybka, 4 – elastyczna membrana,
5 – zbiornik buforowy 6 – łącznik między komorami [121]

Innym rozwiązaniem konstrukcyjnym jest wykorzystanie siły elektrostatycznej. Rysunek 5.8 prezentuje konstrukcję, w której przepływ między zbiornikiem buforowym, a roboczym kontrolowany jest przez siłę elektrostatyczną. Siła generowana jest między dwiema elektrodami, do których przyłożono napięcie. Przepływ ciecchy roboczej powoduje odkształcenie elastycznej membrany, co prowadzi do zmiany krzywizny soczewki.



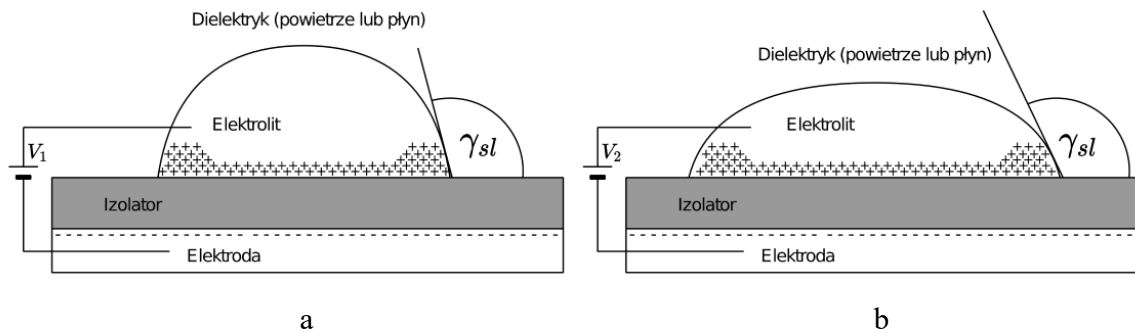
Rys. 5.8. Kontrola objętości płynu z wykorzystaniem siły elektrostatycznej [122]

Zaletą układów bazujących na zmianie objętości soczewki jest możliwość produkcji obiektywów o większej aperturze [123].

Przykładem dostępnym komercyjnie jest soczewka Optotune wykorzystująca technologie soczewek z elastyczną membraną. Napędem w tej konstrukcji jest silnik VCA. Możliwe do uzyskania apertury to 16mm. Możliwe do uzyskania zmiany mocy skupiającej to 5 D i 20 D. Czas odpowiedzi dla skokowej zmiany mocy skupiającej to około 20ms. Prąd sterujący używany do sterowania soczewką jest rzędu kilkuset miliamper.

Drugie podejście do zmiany mocy skupiającej soczewki – bez zmiany objętości płynu, bazuje na konstrukcji oka ludzkiego. Płyn o stałej objętości jest zamknięty w sprężystej polimerowej membranie. Poprzez oddziaływanie na taki układ możliwe jest rozciąganie poprzeczne soczewki co wpływa na jej kształt i zdolność skupiającą układu.

Rysunek 5.9 przedstawia konstrukcję, dla której możliwa jest zmiana kształtu soczewki bez zmiany objętości wykorzystując zjawisko electrowetting'u. Płyn, którym wypełniona jest soczewka posiada ładunek elektryczny. Zmiana kształtu soczewki odbywa się poprzez wygenerowanie siły elektrostatycznej między elektrolitem, a elektrodą zabudowaną w podstawie soczewki. Wadami tego rozwiązania są wysokie wymagane napięcia sterujące oraz niewielka osiągnięta apertura rzędu kilku milimetrów. Opracowane rozwiązania w dziedzinie inżynierii materiałowej oraz modyfikacje konstrukcji soczewki pozwoliły na redukcję napięcia sterującego do poziomu 100 V [118].

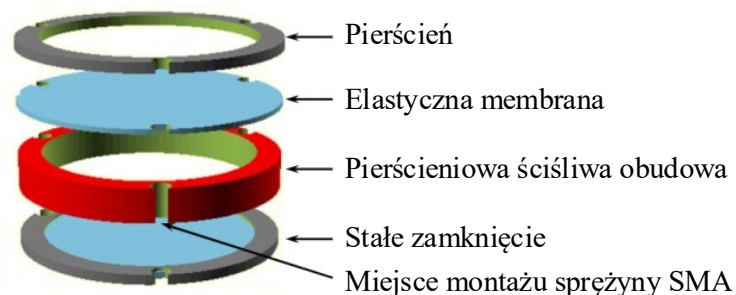


Rys. 5.9. Zasada działania soczewki w technologii electrowetting'u:

a – napięcia zadane V_1 , b – napięcia zadane $V_2 < V_1$,

γ_{sl} – kąt pochylenia kropli w punkcie styku

Innym rozwiązaniem wykorzystywanym do zmiany kształtu membrany w soczewkach płynnych jest zastosowanie sprężyny SMA. Rysunek 5.10 prezentuje budowę soczewki z jedną komorą. Płyn o stałej objętości zamknięty jest przez dwa elementy sprężyste. Od góry komorę zamyka elastyczna membrana. Ścianki boczne stanowi pierścień z elastomeru, w którym wykonano otwory przelotowe. W otwory montowane są sprężyny z SMA obustronnie zamocowane do pierścieni montażowych. Przepływ prądu przez sprężynę SMA powoduje jej odkształcenie, co wpływa na zmianę ciśnienia w zbiorniku i zmianę kształtu soczewki.



Rys. 5.10. Zmiana kształtu soczewki płynnej z wykorzystaniem sprężyny SMA [123]

Przykładem dostępnym komercyjnie jest soczewka Corning Varioptic Lenses wykorzystująca technologie electrowetting'u. W wersji zintegrowanej w obiektywie z montażem C-mount dostępna apertura to 2.5mm. Zakres możliwych do osiągnięcia zmian mocy skupiającej to -5D – +13D dla modelu A-25H oraz -35D – +35D dla modelu A- 25H-D0. Soczewka sterowana jest napięciem rzędu kilkudziesięciu volt.

W pracy rozważano zastosowanie soczewek płynnych w technologii z elastyczną membraną oraz electrowetting'u. Zdecydowano się na wybór soczewki z elastyczną membraną ze względu na parametry jej pracy:

- apertura – kilkukrotnie większa,
- konfiguracja montażu – możliwość zastosowania zarówno przed i za obiektywem głównym,
- kompatybilność z sensorami – kompatybilność z sensorami do 1",
- przysłona – możliwe szersze otwarcie przysłony.

Parametry dynamiczne soczewek, moc sterowania, stosowane przetworniki oraz komunikacja ze sterownikiem soczewki były porównywalne dla obu technologii.

6 Stanowisko badawcze

W ramach działalności badawczej realizowanej w toku opracowywania niniejszej pracy, opracowano i uruchomiono specjalizowane stanowisko badawcze. Założenia projektowe ustalono na podstawie prowadzonych studiów literaturowych w zakresie obrazowania SFF oraz wstępnego zdefiniowania zakresu modyfikacji metody obrazowania. W projekcie uwzględniono dobór soczewki sterowalnej i deklarowane w dokumentacji technicznej parametry jej pracy.

Założenia konstrukcyjne przyjęte dla projektu stanowiska badawczego:

- możliwość wykorzystania do obrazowania SFF zarówno optyki sterowalnej, jak również napędu w osi Z,
- zapewnienie synchronicznego ruchu w osiach Y oraz X z wykorzystaniem układu sterowania i zadajnika w postaci panelu operatorskiego,
- zakres pola roboczego 400×400 mm,
- zapewnienie stabilnego oraz powtarzalnego montażu systemu obrazowania,
- możliwość montażu dodatkowych oświetlaczy na stanowisku,
- możliwość zasilenia dodatkowych urządzeń automatyki i układów pomiarowych w standardzie napięciowym 24 [VDC],
- pozycjonowanie systemu obrazowania z rozdzielczością co najmniej 25 [μm],
- możliwość montażu dodatkowych elementów z wykorzystaniem połączeń śrubowych zarówno na ruchomej platformie, jak również na stole pomiarowym,
- możliwość przemieszczania całego stanowiska badawczego.

6.1 Projekt mechaniczny stanowiska

Stanowisko zostało zaprojektowane w środowisku Autodesk Inventor. Projekt uwzględnia trzy napędy umożliwiające realizację przemieszczenia platformy w trzech osiach. Rysunek 6.1a prezentuje widok stanowiska z oznaczonymi osiami układu współrzędnych.

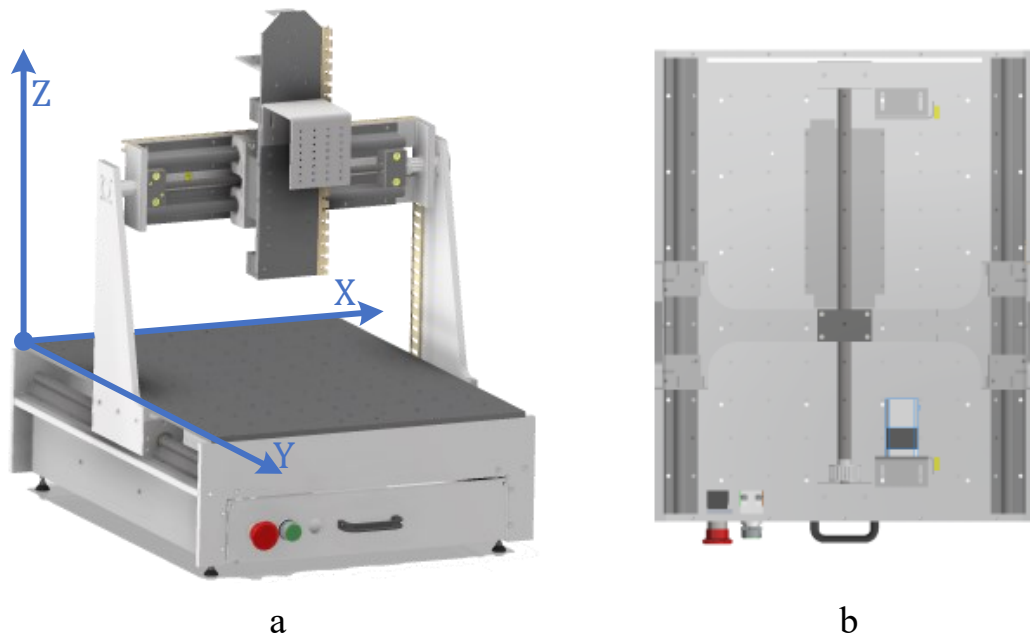
Przemieszczenie w osi Y jest realizowane przez silnik krokowy zabudowany pod stołem pomiarowym stanowiska – płaszczyzną bazową stanowiska. W układzie przeniesienia napędu wykorzystano przekładnię śruba–nakrętka, umożliwiającą przemieszczenie portalu. Portal zamocowany jest na prowadnicach ślizgowych zabudowanych po obu stronach stanowiska. Układ ten umożliwia przemieszczanie portalu w osi Y w zakresie do 400 mm.

Przemieszczenie w osi X odbywa się z wykorzystaniem silnika krokowego zabudowanego na portalu. Przeniesienie napędu odbywa się z wykorzystaniem przekładni pasowej oraz przekładni typu śruba–nakrętka. Stanowisko umożliwia przemieszczenie systemu obrazowania w osi X w zakresie do 250 mm.

Przemieszczenie w osi Z zrealizowane zostało przez silnik krokowy zabudowany również na portalu. Przeniesienie napędu realizowane jest bezpośrednio przez przekładnię śrubową w zakresie do 100 mm.

Każdy z silników krokowych wyposażony jest we wbudowany enkoder. Pozwala to na kontrolę aktualnej pozycji systemu wizyjnego zamontowanego na ruchomej platformie. Na platformie wykonano macierz otworów gwintowanych, umożliwiającą trwałą i powtarzalny montaż systemu wizyjnego. Ruchoma platforma została również wykorzystana do montażu oświetlaczy wykorzystywanych podczas badań. Całość pozwala na przemieszczanie układu kamera-obiektyw-oświetlacz przy zachowaniu stałej konfiguracji geometrycznej w osiach XYZ stanowiska.

Stół pomiarowy stanowiska umożliwia montaż obrazowanych obiektów. Pod nim znajduje się wysuwana szuflada (Rys. 6.1b), w której zabudowano aparaturę elektryczną, sterownik PLC oraz sterowniki silników krokowych wraz z listwami zaciskowymi.



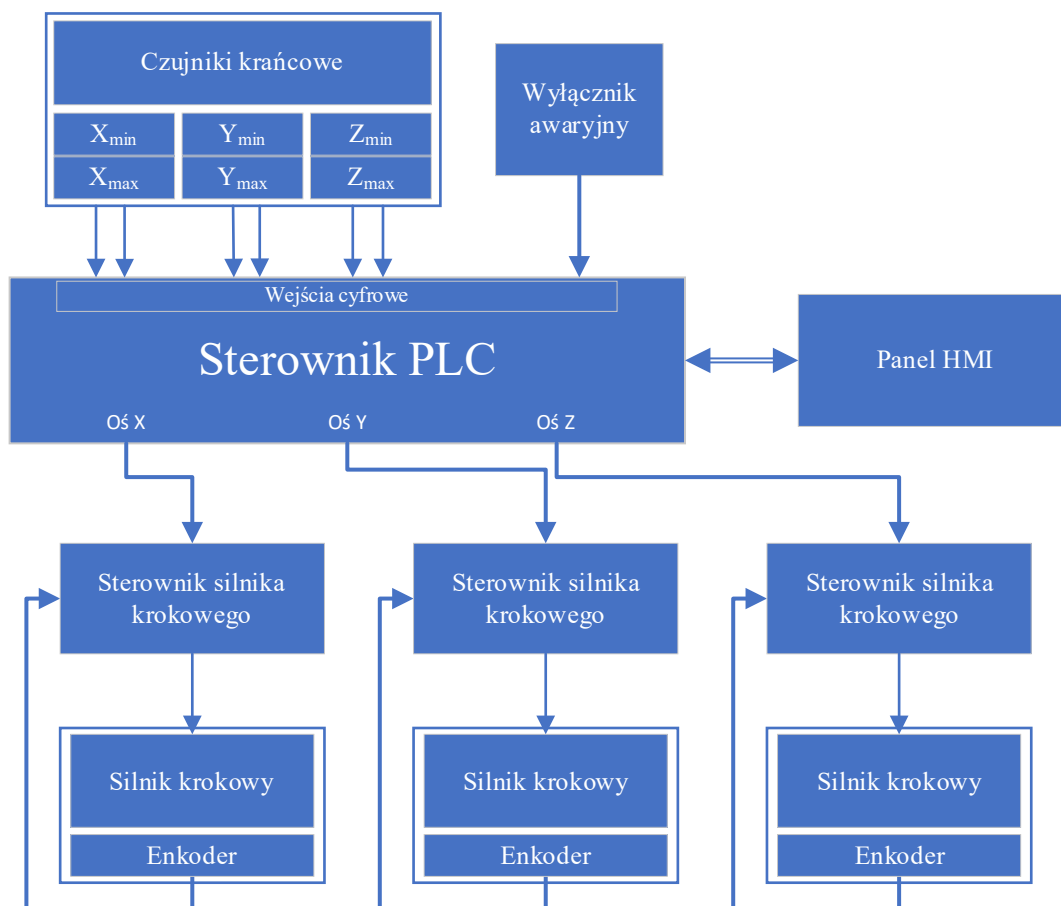
Rys. 6.1. Widok stanowiska badawczego: a – widok stanowiska z zaznaczonym układem współrzędnych, b – układ przeniesienia napędu zabudowany pod płytą bazową stanowiska

Opracowany układ napędowy umożliwia realizację ruchu i pozycjonowanie systemu wizyjnego z rozdzielczością 0.01 mm w każdej osi stanowiska badawczego.

6.2 Projekt układu sterowania

Stanowisko pozwala na sterowanie pozycją płyty montażowej z zamocowanym systemem obrazowania. Układ sterowania został przedstawiony na rysunku 6.2. Sterowanie odbywa się z użyciem sterownika PLC. Sprzężenie zwrotne od pozycji realizowane jest poprzez enkodery inkrementalne wbudowane w napędy. Pozycja początkowa przy uruchomieniu stanowiska ustalana jest z wykorzystaniem procedury bazowania portalu. Bazowanie odbywa się przez dojazd do pozycji krańcowych. Sygnał o potwierdzeniu pozycji w punkcie bazowania wykrywany jest przez czujniki indukcyjne oznaczone na schemacie jako X_{min} , Y_{min} , Z_{min} .

Zadawanie pozycji dla układu sterowania odbywa się z wykorzystaniem panelu HMI. Regulacja pozycji dla każdej z osi realizowana jest poprzez dedykowany sterownik silnika krokowego generujący sygnały napięciowe dla cewek silnika.



Rys. 6.2. Schemat układu sterowania stanowiska badawczego

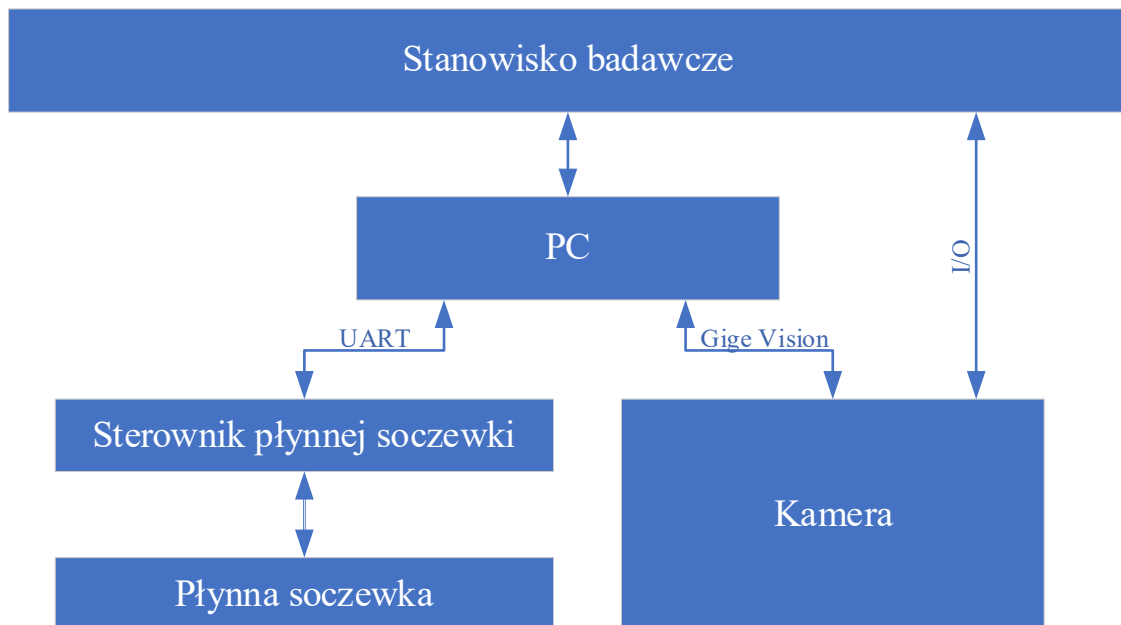
Zaprogramowano trzy tryby pracy urządzenia:

- tryb JOG – ruch z zadaną prędkością w jednej osi,
- tryb manualny – przemieszczenie pojedynczej osi o zadaną wartość,
- tryb pracy synchronicznej – ruch synchroniczny kilku osi.

Stanowisko wyposażono również w listwę zaciskową z napięciem 24V prądu stałego pozwalającą na podłączenie dodatkowych urządzeń, takich jak kamery, oświetlacze, czujniki i urządzenia pomocnicze.

Rejestracja obrazu i analiza obrazów realizowana jest z wykorzystaniem zewnętrznego komputera PC połączonego ze stanowiskiem badawczym (Rys. 6.3). Komputer odpowiedzialny jest również za sterowanie mocą skupiającą płynnej soczewki. Sterowanie odbywa się poprzez dedykowany sterownik Optotune i4. Zapewnia on możliwość regulacji

mocy skupiającej soczewki. Sterownik posiada również zaimplementowaną kompensację temperaturową na podstawie przetwornika wbudowanego w soczewkę.

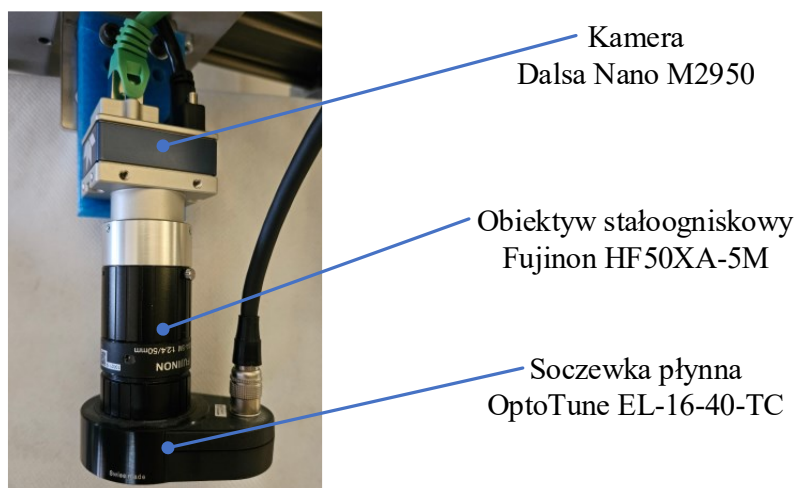


Rys. 6.3. Schemat układu akwizycji obrazu oraz sterowania płynną soczewką

Kamera wykorzystana do rejestracji stosu obrazów zasilana jest bezpośrednio ze stanowiska. Projekt połączeń komunikacyjnych umożliwia połączenie z dodatkowymi urządzeniami na listwie zaciskowej stanowiska (I/O). Pozwala to na wprowadzenie elektrycznej synchronizacji akwizycji obrazów z innymi urządzeniami, takimi jak PLC lub oświetlacze impulsowe.

6.3 Projekt toru optycznego

W pracy przedstawiono rozwiązanie umożliwiające zmianę położenia płaszczyzny przedmiotowej w osi Z bez wykorzystania ruchu kamery względem badanego obiektu. Zaproponowano wykorzystanie sterowalnej soczewki płynnej, zintegrowanej z obiektywem stałoogniskowym (Rys. 6.4). Soczewka płynna pozwala w tej konfiguracji na zmianę położenia płaszczyzny przedmiotowej bez ruchu kamery.



Rys. 6.4. Wykorzystany w pracy system obrazowania zawierający kamerę oraz tor optyczny skonfigurowany jako połączenie obiektywu stałogniskowego i soczewki płynnej

W celu sterowania mocą skupiającą toru optycznego zastosowano soczewkę płynną Optotune EL-16-40-TC. Jest to soczewka wykonana w technologii elastycznej membrany. Zastosowana soczewka umożliwia zmianę mocy skupiającej o ± 3 D. Zasada działania zastosowanej soczewki wraz z jej porównaniem do innych rozwiązań tego typu została opisana w rozdziale 5.3 „Obiektywy sterowalne”.

W torze optycznym zastosowano również obiektyw stałogniskowy umożliwiający zmniejszenie głębi ostrości i, w konsekwencji zwiększenie rozdzielczości obrazowania w osi Z. Do badań dobrano obiektyw Fujinon HF50XA-5M o ogniskowej 50 mm. Jasność obiektywu ustawiono manualnie na wartość $f/2.4$. Obiektyw w wersji bez soczewki płynnej posiada minimalną odległość ostrzenia (MOD) o wartości 200 [mm], jednak po zintegrowaniu z soczewką płynną wartość ta jest redukowana do 50 [mm]. Tak dobrany tor optyczny jest przeznaczony do pracy z matrycami sensorów o formacie do 1.1”. Parametry obiektywu Fujinon HF50XA-5M zestawiono w tabeli 6.1.

Tabela 6.1 Lista kluczowych parametrów obiektywu stałogniskowego Fujinon HF50XA-5M

Parametr	Wartość
Ogniskowa	50 [mm]
Przysłona	$f/2.4$
MOD	200 [mm]
Maks. rozmiar sensora	1.1"

6.4 System obrazowania

Wykorzystana kamera posiada sensor On-Semi Python5000 P1. Parametry sensora mające znaczenie podczas obrazowania SFF zostały przedstawione w tabeli 6.2. Zastosowana matryca umożliwia akwizycję obrazu o rozdzielczości 5.1 Mpx. Dobrana rozdzielczość jest większa w stosunku do rozwiązań opisywanych w literaturze. Umożliwia to obrazowanie z większą rozdzielczością pomiarową oraz zwiększenie pola widzenia systemu wizyjnego. Zwiększenie R_S wpływa jednak niekorzystnie na czas obliczeń potrzebnych zarówno do oceny ostrości, jak i przetworzenia stosu obrazów do postaci chmury punktów. Dobrana matryca posiada piksel o rozmiarze 4.8 μm . Zwiększenie rozmiaru piksela wpływa na redukcję głębi ostrości, która w planowanym zastosowaniu powinna pozostać jak najmniejsza. Rozwiązanie to pozwala zmniejszyć czas akwizycji pojedynczego obrazu, co w połączeniu trybem działania przysłony (przysłona globalna) pozwala na rejestrację większej liczby obrazów.

Sensor kamery umożliwia akwizycję obrazów z częstotliwością powyżej 50 klatek na sekundę. Sensor o dobranych parametrach posiada rozmiar przekątnej równy 1". Umożliwia to zastosowanie obiektywów w standardzie C-mount i wyeliminowanie podczas obrazowania niekorzystnego zjawiska winietowania.

Tabela 6.2 Lista kluczowych parametrów sensora On-Semi Python5000 P1

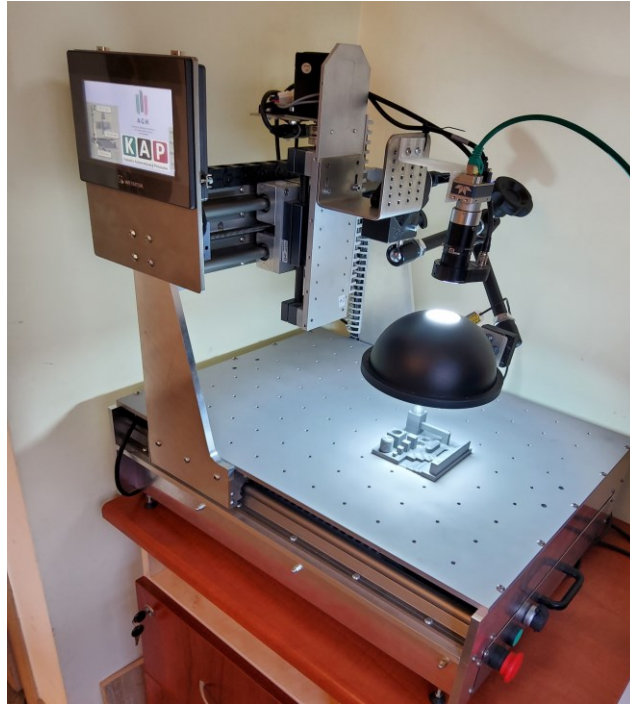
Parametr	Wartość
Rozmiar piksela	4.8 μm
Rozdzielczość sensora	2592 x 2048
Metoda odczytu sensora	Globalna
Maks. FPS	51.8 FPS
Rozmiar sensora	1"

Sensor o przedstawionych parametrach jest podzespołem kamery Dalsa Nano M2590. Umożliwia ona komunikację z sensorem z wykorzystaniem interfejsu *Gige Vision*. Przepustowość zastosowanego interfejsu komunikacyjnego kamery ogranicza jednak maksymalną częstotliwość akwizycji obrazów do 22 FPS. Kamera posiada dwa wejścia cyfrowe umożliwiające elektryczną synchronizację akwizycji. Inną obsługiwaną metodą synchronizacji wyzwalania akwizycji jest sieciowe wydarzenie programowe.

6.5 Podsumowanie

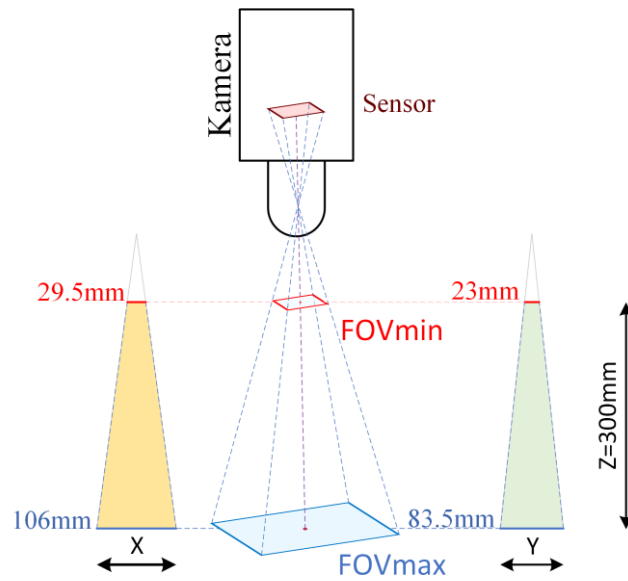
Stanowisko badawcze zostało zaprojektowane i uruchomione na podstawie przyjętych założeń projektowych. Rysunek 6.5 prezentuje stanowisko wyposażone w przykładowy układ optyczny oraz oświetlacz. W prezentowanej konfiguracji wykorzystano oświetlacz kopułowy, zamontowany z wykorzystaniem uchwytów Manfrotto, pozwalających na zmianę ustawień kątowych oświetlaczy.

Panel HMI, zabudowany na konstrukcji portalowej umożliwia zmianę parametrów pozycjonowania układu kamera-obiektyw-oświetlacz w trzech osiach, z wykorzystaniem trzech trybów pracy układu sterowania. W układzie sterowania wykorzystano sterownik PLC, w którym opracowano algorytm pracy stanowiska i obsługi układów I/O.



Rys. 6.5. Widok stanowiska badawczego z przykładowym oprzyrządowaniem

Stanowisko umożliwia obrazowanie obiektów w polu widzenia prezentowanym na rysunku 6.6. Zakres obrazowania w osi Z wynosi 300 mm. Najmniejsza możliwa do osiągnięcia odległość kamery od sceny umożliwia rejestrację obrazu w polu widzenia FOV o wymiarach 29.5×23 mm. Zwiększanie odległości pomiędzy kamerą i sceną wiąże się z liniową zmianą wymiaru FOV. Przy zastosowaniu dobranej optyki maksymalny wymiar FOV wynosi 106×83.5 mm. Zmiana parametrów optyki w zakresie doboru obiektywu stałogoniskowego lub soczewki płynnej wiąże się ze zmianą wymiarów przestrzeni roboczej.



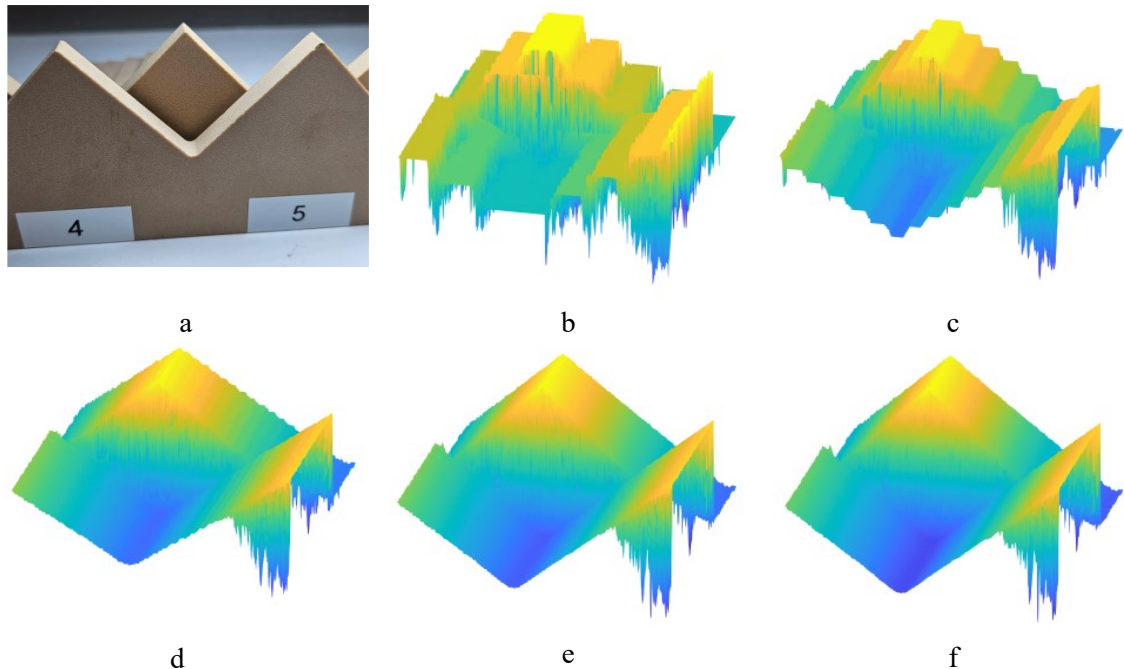
Rys. 6.6. Przestrzeń robocza systemu wizyjnego wyznaczona dla przyjętej konfiguracji toru optycznego

Rozdzielczość obrazowania w metodzie SFF zależy od liczby obrazów w stosie, zarejestrowanych podczas przemieszczania płaszczyzny przedmiotowej. Możliwa jest redukcja rozdzielczości obrazowania poprzez pominięcie części z pozycji płaszczyzny przedmiotowej podczas rejestracji stosu obrazów. Zabieg taki pozwala na skrócenie czasu akwizycji kosztem jakości odwzorowania sceny.

Rysunek 6.7 prezentuje wpływ liczby obrazów w stosie na rekonstrukcję trójwymiarowego obrazu sceny. Obrazowanym obiektem jest wzorec piłokształtny zbudowany z dolin i wierzchołków połączonych płaszczyznami (Rys. 6.7a). Rysunki 6.7b-f prezentują obrazy trójwymiarowe wzorca przy rosnącej liczbie obrazów wykorzystanych do budowy mapy wysokości dla stałego zakresu obrazowania.

Dla zbyt małej liczby obrazów w stosie widoczne są znaczne zniekształcenia powierzchni wzorca widocznych na rysunkach 6.7b oraz 6.7c. Obrazy te wykonano odpowiednio dla stosów o rozmiarze 10 i 20 obrazów. Pomimo zniekształceń rozróżnialne pozostają położenia wierzchołków oraz dolin obrazowanego wzorca. Rysunek 6.7d prezentuje obraz trójwymiarowy zrekonstruowany na podstawie 40 obrazów zarejestrowanych w stosie. Na powierzchniach łączących wierzchołki z dolinami widoczne są już niewielkie nieciągłości wynikające z podziału zakresu obrazowania na 40 płaszczyzn zarejestrowanych na obrazach stosu.

Dalsze zwiększanie liczby obrazów w stosie powoduje wzrost rozdzielczości obrazowania w osi Z i poprawę odwzorowania powierzchni wzorca. Kolejne obrazowania wykonano dla 80 obrazów (Rys. 6.7e) oraz dla 160 obrazów (Rys. 6.7f). Obrazy 3D widoczne na tych rysunkach znacząco lepiej odwzorowują płaszczyzny wzorca.



Rys. 6.7. Wzorec piłokształtny obrazowany metodą SFF z wykorzystaniem różnego rozmiaru stosu obrazów: a – widok wzorca, b – obraz dla $K=10$, c – obraz dla $K=20$, d – obraz dla $K=40$, e – obraz dla $K=80$, f – obraz dla $K=160$

Zwiększanie liczby obrazów rejestrowanych w formie stosu dla stałego zakresu obrazowania wpływa na zmianę odległości pomiędzy płaszczyznami przedmiotowymi rejestrowanymi na obrazach. Analizę zależność pomiędzy mocą skupiającą soczewki, a odległością pomiędzy kolejnymi położeniami płaszczyzny przedmiotowej rejestrowanymi w formie stosu obrazów zamieszczono w rozdziale 8.

7 Ocena ostrości na obrazie cyfrowym

Rozdział zawiera opis badań dotyczących poprawy odporności metody obrazowania SFF na zakłócenia występujące na liniach produkcyjnych w przemyśle wytwórczym oraz poprawy jakości odwzorowania sceny. Omówiono w nim wpływ modyfikacji metody SFF zaproponowanych w rozdziale 4. W tym rozdziale szczegółowo przedstawiono: estymatory wykorzystane do badania ostrości obrazu, przeprowadzone badania, wyniki badań oraz ich interpretację.

7.1 Przegląd estymatorów wykorzystanych do oceny ostrości na obrazie

Wstępne badania ukierunkowano na ocenę wpływu czynników zewnętrznych oraz parametrów akwizycji obrazu na jakość odwzorowania badanej powierzchni płaskiej na mapie wysokości. Prace badawcze poprzedzono analizą literatury i wyborem estymatorów planowanych do wykorzystania w zadaniu oceny ostrości na obrazach rejestrowanych w metodzie SFF. Zagadnienia dotyczące wykorzystania estymatorów rozwijał w swoich pracach Pertuz [124], [125]. Badania te bazowały na obrazach symulowanych oraz obrazach z kamer niskiej rozdzielczości. Zebrane stosy obrazów zawierały od 25 do 51 elementów. Zadanie oceny ostrości badane było również w pracach Fu [126] w których autorzy symulowali kształty powierzchni w postaci: płaszczyzny, stożka oraz powierzchni falistej. Wykorzystane estymatory weryfikowali na obrazach: czapki, lalki oraz kubka rejestrowane kamerami o niskiej rozdzielczości. Alonso [127] używa estymatorów ostrości obrazu, aby wygenerować ostry obraz całej sceny, wykorzystując kilka częściowo ostrych obrazów. W pracy wykorzystywane są filtry częstotliwościowe do estymacji ostrości. Estymacja odbywa się na obrazach RGB, wyznaczając wartość estymatora ostrości osobno dla każdego z kanałów.

Mahmood [128] zaproponował dyskretną transformatę falkową jako estymator ostrości. Stos obrazów składał się z 97 obrazów o rozdzielczości 300×300 pikseli. Algorytmem zastosowanym do selekcji płaszczyzny ostrej jest maksymalna wartość wysokoczęstotliwościowego komponentu po przetworzeniu stosu. Autorzy wskazali konieczność dodatkowej filtracji mapy wysokości z wykorzystaniem mediany. Malik [129] porównał działanie kilku

estymatorów ostrości bazujących na filtrach krawędziowych, laplasjanie oraz statystycznych. Porównanie uwzględniało wprowadzenie na obrazy stosu syntetycznych zakłóceń np. sól i pieprz oraz białego szumu. W innej pracy Malik [130] uwzględnia również nierównomierność oświetlenia sceny. Obrazowany obiektem był stożek oświetlony kierunkowo, czego efektem jest zjawisko cienia na części obiektu. Do estymacji ostrości wykorzystano laplasjan.

Yang [131] zaproponował do estymacji ostrości konwolucyjne sieci neuronowe (CNN). CNN zostały zastosowane zarówno na stosie obrazów 2D, jak również na etapie generowania mapy wysokości. Badania zostały wykonane na danych syntetycznych z trzech ogólnodostępnych baz danych. Inne podejście z wykorzystaniem CNN do estymacji głębi proponuje Kim [132]. Autorzy stosują CNN jako estymator ostrości. Podkreślona została lekkość proponowanej sieci skutkująca skróceniem czasu wykonania.

Ali [133] zestawia sześć metod analizy stosu 30 obrazów wygenerowanych syntetycznie o rozdzielczości 256×256 . Dodatkowo algorytmy zostały porównane na trzech stosach obrazów zebranych kamerą o rozdzielczości 640×480 . Rozmiar stosu zawiera się w zakresie 12-17 obrazów. W zależności od wybranej metody otrzymane czasy generowania mapy wysokości na podstawie stosu obrazów to od sekundy do kilkuset sekund. Ashfaq [134] porównuje wyniki estymacji głębi stosując filtry krawędziowe, bazujące na laplasjanie oraz autorski filtr pierścieniowy. Eksperymenty zostały wykonane na danych syntetycznych z ogólnodostępnych baz danych.

Przedstawione w literaturze opisy dotyczą wykorzystania metody SFF w badaniach laboratoryjnych. Thelen przedstawił algorytm umożliwiający zgrubną rekonstrukcję twarzy metodą SFF omawiając wpływ zastosowanego estymatora oraz rozmiar jądra [135]. W ramach badań literaturowych wykonano również analizę estymatorów wykorzystywanych w zadaniach poszukiwania ostrości obrazu - autofocusu [136], [137], [138]. W przytoczonych pracach nie osiągnięto jednak etapu funkcjonalnego prototypu.

Na podstawie analizy literatury wytypowano zbiór estymatorów, które poddano badaniom w kontekście wykorzystania ich w aplikacjach przemysłowych. Przy doborze estymatorów uwzględniono również dostępność informacji dotyczących złożoności obliczeniowej wpływającej na możliwość ich wykorzystania w zadaniu oceny ostrości na obrazie realizowanej w czasie rzeczywistym. Na podstawie wykonanego przeglądu literatury

wytypowano do badań 18 estymatorów uwzględniając dwa kluczowe parametry: skuteczność oraz czas wykonania przekształcenia.

Wybrane estymatory przedstawiono w tabeli 7.1 wraz z podziałem na grupy. Przekształcenia podzielono na cztery grupy:

- pierwsza grupa bazuje na obliczaniu pochodnej w punkcie. Uwzględnione również zostały modyfikacje podstawowych filtrów poprzez wykorzystanie algorytmu tenengard – tj. uśredniania w sąsiedztwie. Dodatkowe uśrednianie pozwoliło na rozszerzenie rozmiaru jądra przekształcenia na wartości większe niż 3×3 ,
- drugą grupą są estymatory ostrości bazujące na obliczeniu przekształcenia Laplace’a w punkcie wraz z modyfikacją uśredniania w sąsiedztwie,
- kolejna grupa estymatorów ostrości to funkcje statystyczne. W grupie znajdują się funkcje przyjmujące jako estymator ostrości miarę rozrzutu wartości intensywności pikseli w sąsiedztwie,
- ostatnią grupę estymatorów ostrości stanowią funkcje pozwalające na ocenę ostrości piksela bezpośrednio na podstawie intensywności punktu lub jego sąsiedztwa bez konieczności wykonywania obliczeń o większej złożoności obliczeniowej.

Podane w tabeli 7.1 symbole opisujące badane estymatory stosowane będą w kolejnych rozdziałach pracy.

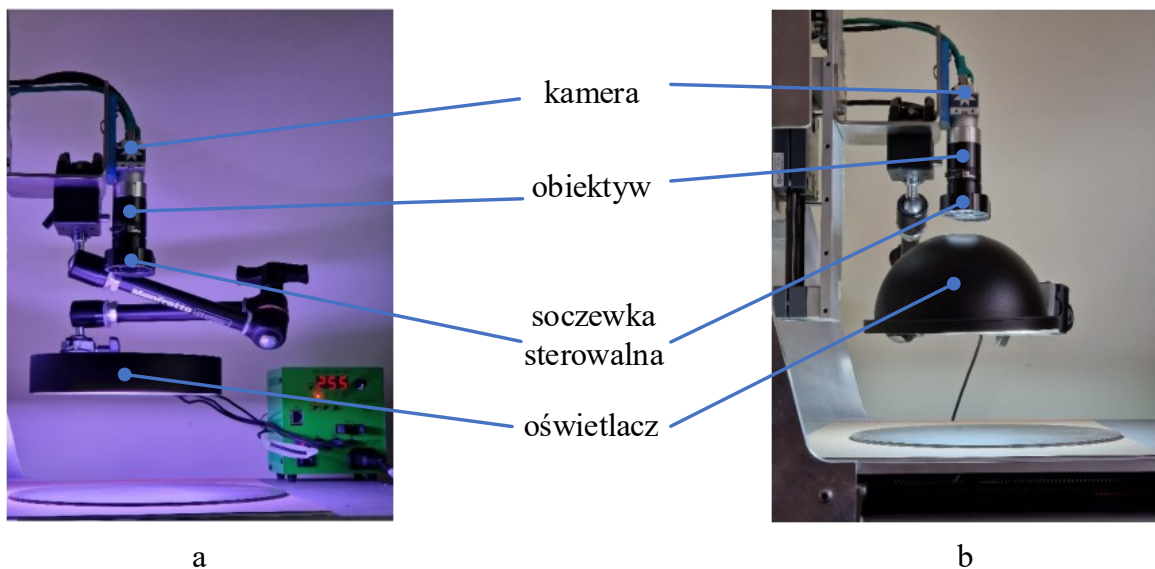
Tabela 7.1. Zaproponowane estymatory wykorzystane do oceny ostrości na obrazie cyfrowym

Lp.	Grupa	Nazwa	Symbol
1	Pochodna	Robert's	DRB
2	Pochodna	Robert's – Tenengard	DRBT
3	Pochodna	Sobel	DSL
4	Pochodna	Sobel – Tenengard	DSLTT
5	Pochodna	Prewitt	DPT
6	Pochodna	Prewitt – Tenengard	DPTT
7	Laplasjan	Laplasjan	LLP
8	Laplasjan	Laplasjan – Tenengard	LLPT
9	Laplasjan	LOG	LLOG
10	Laplasjan	Zmodyfikowany Laplasjan	LML
11	Laplasjan	Zmodyfikowany Laplasjan– Tenengard	LMLT
12	Statystyczny	Entropia	SETP
13	Statystyczny	Odchylenie standardowe	SSTD
14	Statystyczny	Wariancja	SVAR
15	Statystyczny	Wariancja Znormalizowana	SVRN
16	Intensywność	Suma w ROI	ISUM
17	Intensywność	Zliczanie z progowaniem	ICNT
18	Intensywność	Energia w ROI	IENG

Pełny opis przekształceń uwzględnionych w tabeli 7.1 umieszczono w załączniku nr. I.

7.2 Metoda porównania zaproponowanych estymatorów

Rejestrację stosu obrazów wykonano na stanowisku, na którym sensor kamery ustawiony był równoległe do badanej powierzchni. Wykorzystując optykę sterowaną zmieniano położenie płaszczyzny przedmiotowej w osi Z stanowiska i rejestrowano kolejne obrazy. Badania wykonano dla trzech powierzchni płaskich wykonanych z różnych materiałów o różnej strukturze geometrycznej (Rys. 7.1). Materiały dobrano na podstawie analizy zadań przemysłowych realizowanych w aplikacjach kontroli wykonania produktu przez systemy wizyjne. Wszystkie obrazy zostały zarejestrowane z wykorzystaniem soczewki płynnej zabudowanej w torze optycznym. Rejestrację kolejnych obrazów zrealizowano korzystając z różnego typu oświetlaczy przemysłowych zapewniając zmianę geometrii oświetlenia powierzchni.



Rys. 7.1. Widok stanowiska badawczego – obrazowanie płaskiej powierzchni metalowej:

a – oświetlacz typu pierścieniowego, b – oświetlacz typu kopułkowego

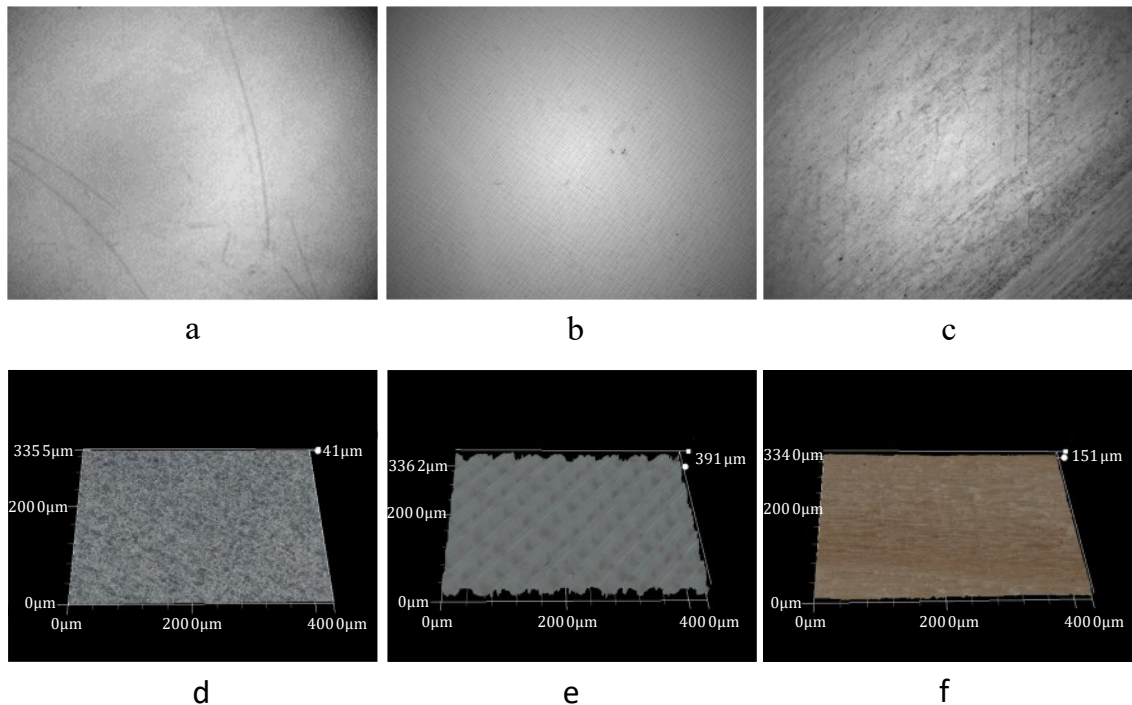
Parametry obrazowania takie jak czas rejestracji obrazów, wartość przysłony czy typ i moc zastosowanego oświetlenia powinny być dobierane do parametrów struktury geometrycznej obrazowanych powierzchni. Rozróżniane są różnego typu interakcje światła z obrazowanymi powierzchniami od rozproszenia, poprzez pochłanianie i emisję do lustrzanego

odbicia wiązki światła. Najczęściej jest to jednak połączenie kilku typów interakcji zależne od barwy i parametrów powierzchni opisujących teksturę materiału.

Do badań wybrano trzy materiały najczęściej używane do wytwarzania części w procesach technologicznych (Rys. 7.2a-c). Obrazowano:

- powierzchnię metalu,
- powierzchnię tworzywa sztucznego,
- powierzchnię drewna.

Obrazy 7.2d-e prezentują wybrane powierzchnie przy powiększeniu $\times 500$. Widoczne są różnice w strukturze geometrycznej powierzchni przekładające się na ich teksturę.



Rys. 7.2. Obraz powierzchni wykonany z wykorzystaniem oświetlacza typu kopułkowego (a-c) wraz z ich powiększeniem $\times 500$ (d-f): a,d – powierzchnia płyty stalowej; b,e – powierzchnia tworzywa sztucznego; c,f – powierzchnia drewna

Dla wskazanych typów materiałów wyznaczono parametry chropowatości powierzchni. Wyznaczono parametr R_a , opisujący średnią arytmetyczną odchyłeń wzdłuż odcinka pomiarowego. Wyznaczono również parametr S_a będący rozszerzeniem R_a do opisu

pełnej topografii powierzchni. Parametr S_a opisuje również odchylenia średnie i jest wyznaczany dla wskazanego obszaru powierzchni, a nie tylko pojedynczego odcinka pomiarowego.

Tabela 7.2 zawiera wartości parametrów powierzchni materiałów wykorzystanych w kolejnych etapach badań.

Tabela 7.2. Zebrane parametry chropowatości materiałów użytych w obrazowaniu metodą SFF

Powierzchnia	R_a [μm]	S_a [μm]
stalowa płyta	0.5	0.7
drewno	5.9	5.0
tworzywo sztuczne	22.5	31.2

Każda z wybranych próbek materiałów posiada odmienne parametry struktury geometrycznej powierzchni. Drugą różnicą między nimi jest sposób interakcji powierzchni ze światłem. W przypadku stalowej płyty dominującym zjawiskiem jest odbicie, tworzywo sztuczne powoduje pochłanianie światła oraz jego reemisję, natomiast dla drewna dominującym zjawiskiem jest rozproszenie.

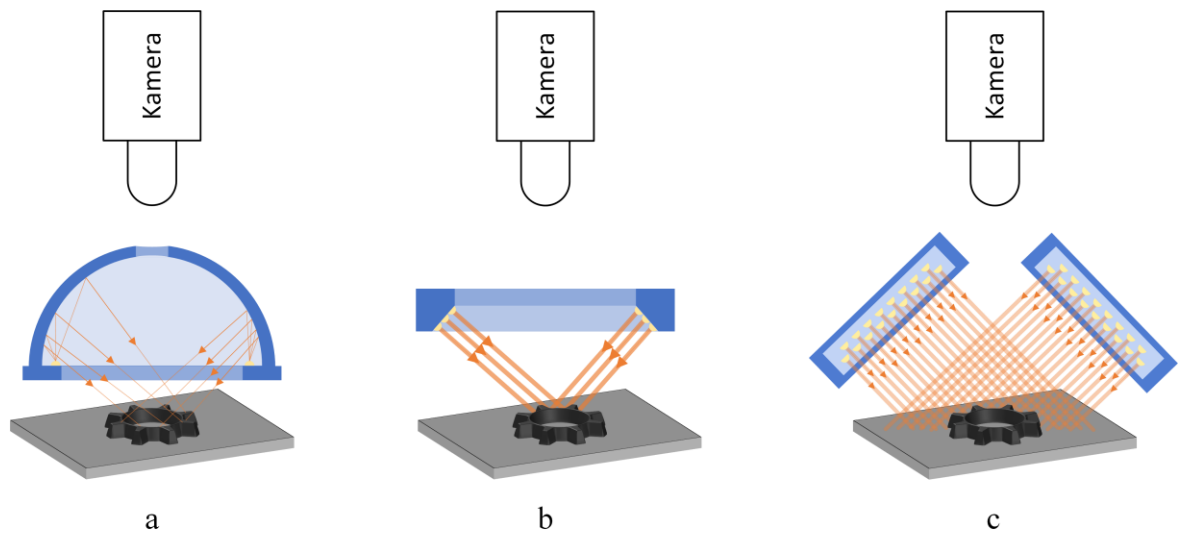
W ramach badań uwzględniono wpływ zakłóceń generowanych poprzez czynniki środowiskowe oraz dobór parametrów akwizycji obrazu. Uwzględniono oświetlenie, teksturę powierzchni oraz zmiany kontrastu.

Wpływ zakłóceń wynikających z nieregularności oświetlenia zbadano zmieniając geometrię układu kamera-oświetlacz. Zmiana geometrii została wprowadzona przez zastosowanie różnego typu oświetlaczy przemysłowych. Każdy z oświetlaczy posiadał inne ułożenie diod oraz elementów odbłyaskowych. Podczas badań uwzględniono również wprowadzenie nierównomierności oświetlenia poprzez nieosiowy montaż oświetlaczy na stanowisku badawczym.

W celu realizacji założonych efektów porównano działanie oświetlaczy przemysłowych typu: oświetlacz kopułowy (DL), oświetlacz liniowy-matrycowy (BR), oświetlacz pierścieniowy (DRL), oświetlacz pierścieniowy o niewielkim kącie świecenia (HRL), oraz oświetlacz emitujący światło skolimowane (CL). Rysunek 7.3 zawiera trzy przykładowe

konfiguracje geometryczne oświetlaczy. Schemat z rysunku 7.3a prezentuje oświetlacz kopułowy. Budowa wymusza odbicie i wewnętrzne rozproszenie światła, co zapobiega występowaniu refleksów oraz cieni. Oświetlacz pierścieniowy (Rys. 7.3b) nie zawiera elementów dyfuzyjnych, umożliwia jednak uzyskanie wiązki światła skierowanej pod wybranym kątem do powierzchni obrazowanej. Oświetlenie tego typu wykorzystywane jest do wzmocnienia widoczności krawędzi na obrazie. Na obiektach wielopłaszczyznowych może generować odbłaski widoczne na obrazie.

Oświetlacz liniowy stosowany jest do uzyskania jednostronnego kierunkowego światła o wysokiej intensywności. Pozwala doświetlić obiekt z wybranego kierunku lub kierunków.

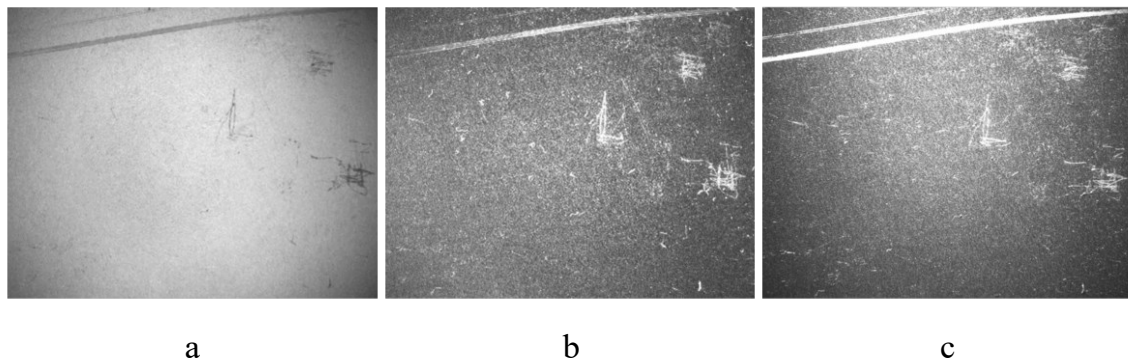


Rys. 7.3. Schematy wybranych geometrii oświetlaczy przemysłowych:

a – oświetlacz kopułowy DL, oświetlacz pierścieniowy DRL, oświetlacze liniowe BL

Ze względu na zmienną ilość światła docierającego na matrycę sensorów kamery w zależności od zastosowanej geometrii oraz mocy oświetlacza konieczne było przeprowadzenie normalizacji średniej intensywności na obrazie cyfrowym. Normalizacja wykonana została poprzez regulację czasu ekspozycji matrycy przy zadanej średniej wartości intensywności pikseli równiej 128.

Rysunek 7.4 prezentuje przykładowe obrazy powierzchni blachy stalowej. W zależności od wykorzystanego oświetlacza oraz sposobu jego montażu względem kamery widoczne są inne efekty. Zastosowanie dedykowanego oświetlacza pozwala na wzmacnianie pewnych cech obiektu poprzez zmianę intensywności pewnych obszarów obrazu. Oświetlacz DL pozwala na zapewnienie obrazu powierzchni bez zakłóceń w postaci odbłasków (Rys. 7.4a). Oświetlacz HRL wzmacnia lokalne defekty powierzchniowe w postaci zarysowań przy zachowaniu równomiernego oświetlenia powierzchni (Rys. 7.4b). Oświetlacz typu BL umieszczony pod niewielkim kątem do powierzchni pozwala na otrzymanie podobnego wzmocnienia zarysowań. Widoczna jest jednak nierównomierność oświetlenia sceny. Środek obrazu jest znacznie jaśniejszy od krawędzi obrazu (Rys. 7.4c).



Rys. 7.4. Obrazy rejestrowanej powierzchni blachy stalowej przy zastosowaniu wybranych oświetlaczy: a – typu DL, b – typu HRL, c – typu BL

Kolejnym zakłóceniem, którego wpływ został uwzględniony jest kontrast na obrazach źródłowych. Projektant systemu obrazowania ma wpływ na część czynników decydujących o kontraście na obrazie cyfrowym, jak dobór oświetlacza oraz parametry akwizycji obrazu. Jednak pomimo odpowiedniego doboru możliwe jest otrzymanie obrazów o niewielkim kontraście choćby ze względu na ograniczenia fizyczne lub charakterystykę powierzchni obrazowanego obiektu. Zmiana kontrastu na obrazach źródłowych poddawanych przekształceniom polegała na zmianie czasu ekspozycji matrycy. Zmniejszenie czasu ekspozycji powodowało zmniejszanie kontrastu na obrazie cyfrowym.

Badania przeprowadzono dla zawężonego zakresu obrazowanych obiektów do powierzchni płaskich. Podejście takie ma na celu wyznaczenie skuteczności estymatorów

ostrości dla podanych założeń bez wpływu błędów wprowadzanych przez inne etapy rekonstrukcji trójwymiarowego obrazu sceny (Rys. 4.3).

7.3 Algorytmy selekcji płaszczyzny ostrej

W idealnych warunkach proces rozmycia obrazu wynikający ze zmiany zdolności skupiającej układu lub zmiany odległości roboczej systemu wizyjnego od badanej płaszczyzny ma charakter procesu normalnego [139]. Powoduje to, że krzywa odpowiadająca wartości estymatora ostrości na kolejnych obrazach stosu ma również kształt funkcji Gaussa. Zależność ta wykorzystywana jest przez autorów publikacji w celu estymacji głębi za pomocą interpolacji funkcją Gaussa. Wpływ zakłóceń występujących w rzeczywistych układach powoduje konieczność zastosowania metod bardziej odpornych.

Zaproponowano dwa rozwiązania:

- zastosowanie funkcji maksimum – przyjęto założenie, że obraz ostry, posiada największą wartość estymatora ostrości. Wraz z oddalaniem się od płaszczyzny przedmiotowej obraz ulega coraz większemu rozmyciu co powoduje zmniejszenie wartości obliczonego estymatora ostrości. Metoda pozwala na wyznaczenie płaszczyzny ostrej z rozdzielczością 1 płaszczyzny,
- zastosowanie metody środka ciężkości (CoG) – zastosowanie tej metody pozwala na zwiększenie rozdzielczości wyznaczania płaszczyzny ostrej w stosunku do funkcji maksimum.

Algorytm środka ciężkości polega on na wyznaczeniu średniej ważonej, gdzie wagami dla kolejnych współrzędnych są wartości obliczonego wskaźnika ostrości. Dodatkową modyfikacją algorytmu jest zwiększenie odporności na zakłócenia poprzez pomijanie w obliczeniach punktów, dla których wartość estymatora ostrości W_k jest mniejsza od połowy wartości maksymalnej wskaźnika ostrości w danym profilu. Funkcja środka ciężkości zwraca wartości niecałkowite. Wartość niecałkowita odpowiada przypisaniu płaszczyzny ostrej między rejestrowanymi rzeczywistymi położeniami płaszczyzny przedmiotowej.

$$CoG = \frac{\sum W_k * k}{\sum W_k} \quad (7.1)$$

$$W_k = \begin{cases} W_k & \text{dla } W_k > \frac{\max(W)}{2} \\ 0 & \text{dla } W_k < \frac{\max(W)}{2} \end{cases} \quad (7.2)$$

gdzie:

CoG – wyznaczona współrzędna środka ciężkości odpowiadająca położeniu płaszczyzny, dla której otoczenie piksela (x,y) uznawane jest za ostre,

k – współrzędna odpowiadająca numerowi obrazu – rejestrowanemu położeniu płaszczyzny przedmiotowej,

W – wektor wartości estymatora ostrości dla pojedynczego punktu sceny (x,y). Zawiera on wartości estymatora ostrości otrzymane poprzez zmianę mocy skupiającej układu optycznego.

7.4 Wskaźniki zastosowane do porównania metod oceny ostrości

Wyniki w postaci obrazu – mapy wysokości nie pozwalają na bezpośrednie porównanie estymatorów oceny ostrości. Konieczne jest zaproponowanie wskaźników pozwalających na jakościową ocenę odwzorowania sceny przez obraz. Przez ograniczenie zakresu obrazowanych scen do powierzchni płaskich można ocenić jakość odwzorowania sceny na podstawie rozrzutu punktów względem wartości oczekiwanej. Na podstawie przyjętego założenia - obrazowania scen powierzchni płaskich - wartość oczekiwana dla całej mapy wysokości jest wartością stałą. Jako wskaźnik będący miarą rozrzutu względem wartości oczekiwanej przyjęto wartość RMSE (pierwiastek błędu średniokwadratowego).

Drugim wykorzystanym wskaźnikiem jakości dopasowania jest bezwzględny błąd dopasowania (AFE). Parametr ten został zdefiniowany jako wartość bezwzględna z różnicy dominanty mapy wysokości oraz wartości oczekiwanej. Wartość oczekiwana została przyjęta heurystycznie osobno dla każdego ze zbiorów stosów obrazów. Wskaźnik ten pokazuje stopień oddalenia położenia płaszczyzny przedmiotowej obliczonej przez zastosowanie danego estymatora od wartości oczekiwanej.

$$AFE = \text{abs}(\text{moda}(HM) - E(HM)) \quad (7.3)$$

gdzie:

AFE - bezwzględny błąd dopasowania,

$moda(HM)$ – moda obliczana na podstawie wartości mapy wysokości,

$E(HM)$ – wartość oczekiwana wartości mapy wysokości dla powierzchni płaskiej

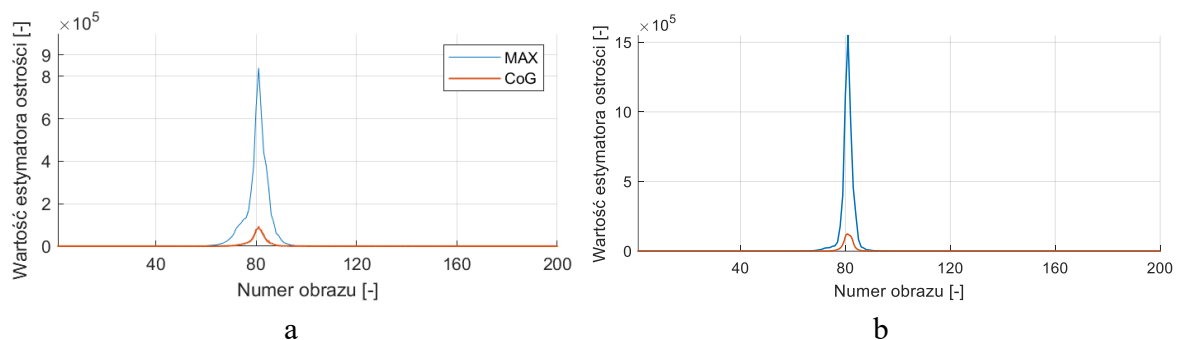
7.5 Omówienie wyników

W rozdziale omówiono otrzymane wyniki stosując estymatory wprowadzone w poprzedniej części rozdziału. Każda z powierzchni była obrazowana 6-krotnie w celu zmniejszenia wpływu zakłóceń losowych. Każdy pomiar polegał na rejestracji 200 obrazów podczas zmiany mocy skupiającej soczewki płynnej w zakresie od -2.00 [D] do 0.00 [D] z krokiem 0.01 [D]. Położenie układu obrazowania pozostawało stałe. Zmianie ulegały powierzchnia obrazowana, parametry akwizycji oraz parametry środowiskowe.

7.5.1 Algorytm selekcji płaszczyzny ostrej

W rozdziale 7.4 omówiono algorytmy porównania estymowanej wartości ostrości punktu sceny między kolejnymi obrazami stosu. W tym celu wykorzystano analizę histogramu wyznaczonego na podstawie mapy wysokości dla zarejestrowanych powierzchni.

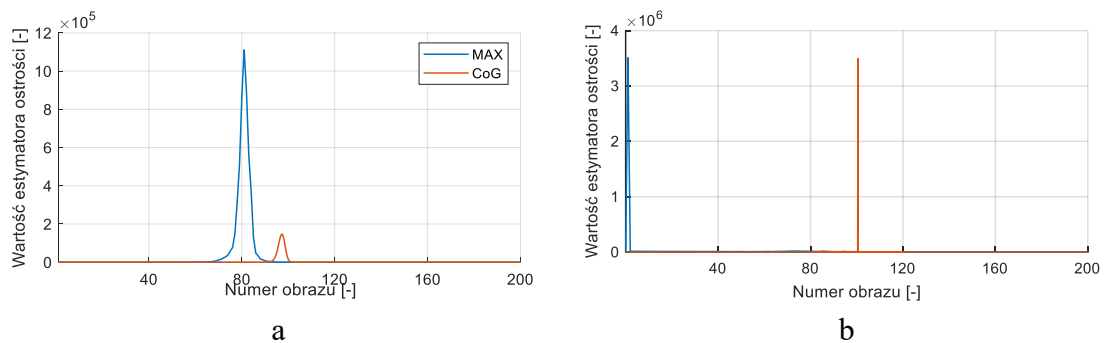
Rysunek 7.5 prezentuje przykładowe histogramy otrzymane podczas obrazowania powierzchni z tworzywa sztucznego dla dwóch algorytmów wyznaczania wskaźnika ostrości. Wynik dla algorytmu maksimum w obu przypadkach wynosił 119. Dla algorytmu CoG przyjął wartości 118.7 dla DSLT oraz 118.5 dla SVAR. Znaczna różnica w wartościach amplitud wynika większej rozdzielczości algorytmu CoG.



Rys. 7.5. Przykładowe histogramy dla zarejestrowanych mapy wysokości:

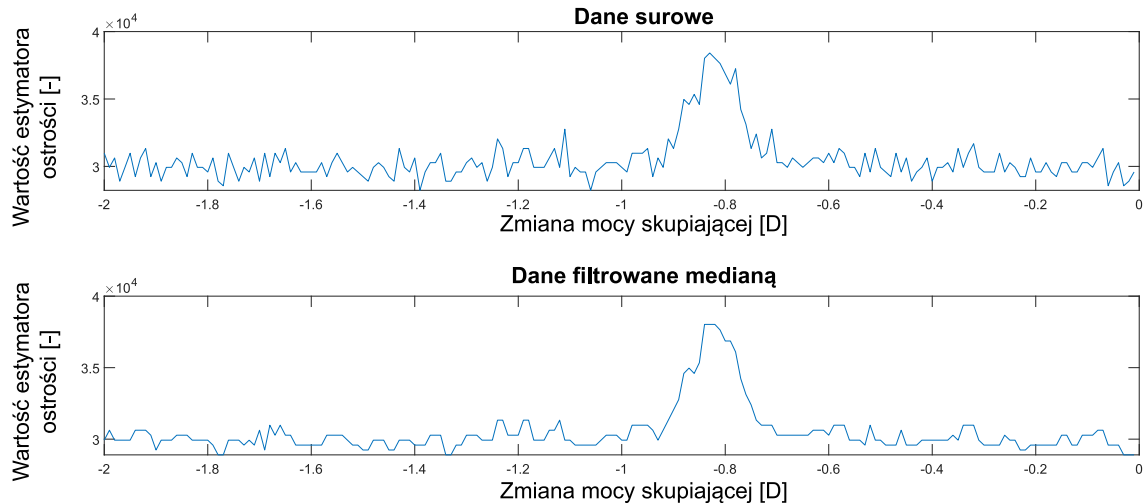
a – dla estymatora DSL, b – dla estymatora SVAR

Poprawność selekcji płaszczyzny ostrej z wykorzystaniem zaproponowanego algorytmu w dużym stopniu zależała od wykorzystanego estymatora ostrości. Estymatory szczególnie podatne na zakłócenia zwracały sygnał o niskim SNR. Powodowało to niepoprawne przyporządkowanie płaszczyzny ostrej dla rozpatrywanego punktu sceny. Metoda CoG powodowała zwrócenie wartości w połowie zakresu, ze względu na występujące w niej uśrednianie. Ze względu na wykorzystanie 200 obrazów pik odpowiadający płaszczyźnie ostrej widoczny jest dla wartości około 100 (Rys. 7.6).



Rys. 7.6. Przykładowe histogramy zarejestrowanych mapy wysokości: a) dla estymatora SETP, b) dla estymatora DRB histogram został przedstawiony w formie wykresu ciągłego ze względu czytelność

Przeprowadzono również badania wpływu dodatkowej filtracji wartości estymatora ostrości na poprawę jakości odwzorowania. Zastosowano filtr medianowy o rozmiarze jądra przekształcenia $1 \times 1 \times 3$ – realizujący filtrację tylko w kierunku osi Z. Efektem jest wygładzenie przebiegu wartości estymatora ostrości (Rys. 7.7). Nie zaobserwowano jednak by działanie to miało zauważalnie korzystny wpływ na wyniki selekcji płaszczyzny ostrej. Z tego powodu oraz ze względu na potrzebną moc obliczeniową konieczną do przetworzenia całego stosu obrazów zrezygnowano z wykonywania dodatkowej filtracji.



Rys. 7.7. Przebieg wartości estymatora ostrości dla jednego punktu sceny w zależności od zmiany mocy skupiającej. Porównano przebieg wartości niefiltrowanej oraz po filtracji medianą o rozmiarze jądra przekształcenia $1 \times 1 \times 3$

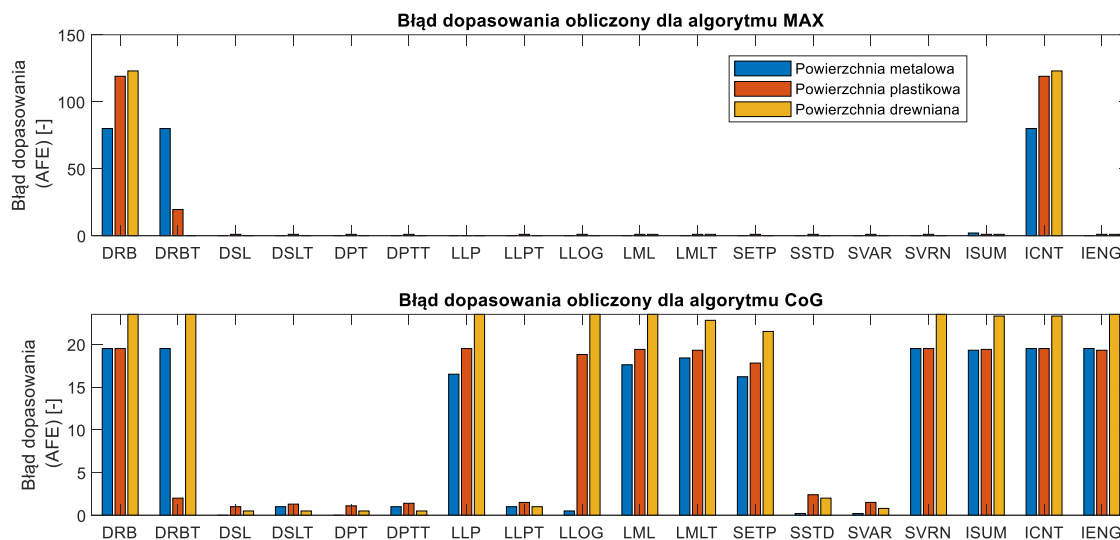
7.5.2 Wpływ tekstury powierzchni

Wyniki zebrane dla warunków standardowych stanowiły referencję dla dalszych pomiarów. Warunkami standardowymi były obrazy zarejestrowane z zastosowaniem oświetlenia typu DL. W obliczeniach dla estymatorów o zmiennym rozmiarze jądra wykorzystano rozmiar jądra 7×7 . Kontrast zapewniono poprzez dostosowanie czasu ekspozycji podczas obrazowania do maksymalnej wartości, dla której nie zaobserwowano zjawiska nasycenia wartości intensywności pikseli.

Na rysunku 7.8 zestawiono otrzymane wyniki. Dla każdego algorytmu selekcji płaszczyzny ostrej przygotowano osobne zestawienie. Wykres słupkowy prezentuje bezwzględny błąd przyporządkowania płaszczyzny ostrej. Kolory słupków odpowiadają pomiarom wykonanym dla różnych typów powierzchni. Wyniki dla funkcji maksimum pokazują trzy estymatory o bardzo wysokim błędzie – powyżej 100: DRB, DRBT oraz ICNT. Wyniki te znacząco odstają od pozostałych opera-estymatorów. Pozostałe estymatory posiadają AFE poniżej wartości 3.

Wyniki dla funkcji CoG odbiegają od przedstawionych dla selekcji funkcją maksimum. Wszystkie wartości mieszczą się w zakresie do 30. Wyniki błędu bezwzględnego mniejsze od 3 posiada tylko sześć estymatorów: DSL, DSLT, DPT, DPTT, LLPT, SSTD oraz SVAR.

W obu przypadkach wartości otrzymane dla danego estymatora są porównywalne dla każdej z powierzchni. Nieznacznie większe błędy widoczne są dla obrazowanej powierzchni drewna.

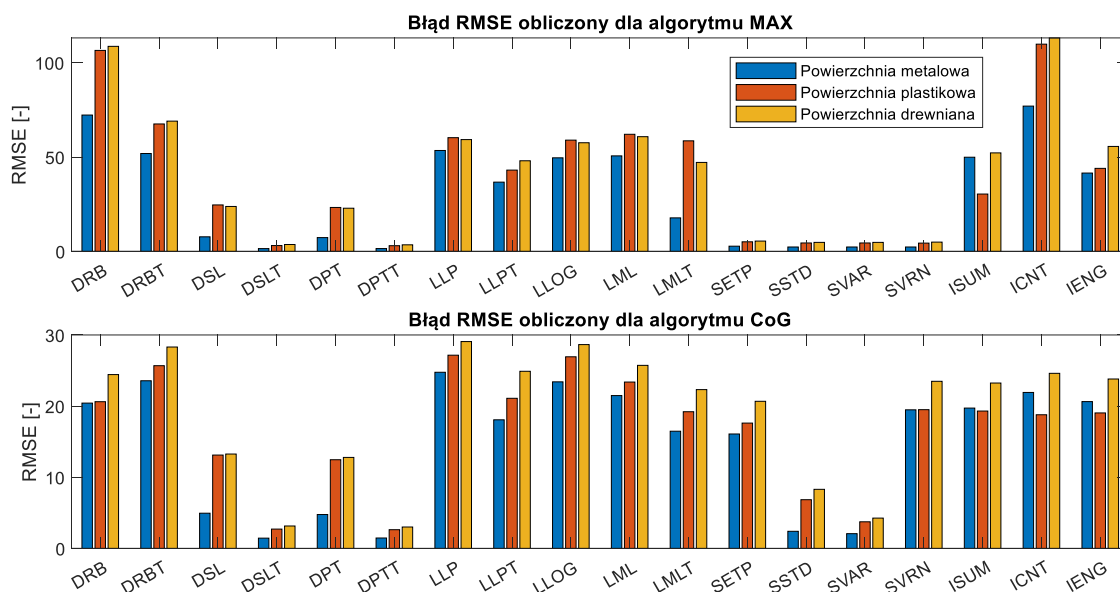


Rys. 7.8. Wartość AFE w zależności od zastosowanego estymatora, dla każdego z rozpatrywanych algorytmów wyznaczania płaszczyzny ostrej

Wyniki błędu średniokwadratowego są spójne z wynikami AFE (Rys. 7.9). Dla algorytmu selekcji płaszczyzny ostrej z zastosowaniem metody maksimum część estymatorów posiada wartości powyżej 50. Najlepsze wyniki - wartości RMSE poniżej 6 otrzymywane są dla sześciu estymatorów: DSLT, DPTT, SETP, SSTD, SVAR oraz SVRN.

Wszystkie wyniki dla algorytmu CoG zawierają się w zakresie do 30. Wyniki poniżej wartości 6 otrzymywane są dla estymatorów DSLT, DPTT, SSTD oraz SVAR.

Widoczna jest ogólna zależność między badanymi materiałami. Najmniejsze wartości RMSE osiągane są dla powierzchni metalowej, a najwyższe dla powierzchni drewnianej.



Rys. 7.9. Wartości RMSE w zależności od zastosowanego estymatora dla obu algorytmów wyznaczania płaszczyzny ostrej. Wyniki zgrupowano dla trzech rozważanych powierzchni

Zastosowanie algorytmu selekcji płaszczyzny ostrej funkcją maksimum zwraca akceptowalne wartości dla sześciu estymatorów: DSLT, DPTT, SETP, SSTD, SVAR oraz SVRN. Natomiast porównywalne wskazania w przypadku zastosowania algorytmu CoG otrzymywane są dla czterech estymatorów: DSLT, DPTT, SSTD oraz SVAR. Z powodu osiągnięcia nieakceptowalnych rezultatów dla większości branych pod uwagę estymatorów oceny ostrości pozostałe wyniki przedstawione w tym rozdziale zawężone zostały do sześciu: DSLT, DPTT, SETP, SSTD, SVAR oraz SVRN. Pozwoliło to zwiększyć czytelność analizy poprzez wykluczenie estymatorów, które nie zapewniały wymaganej odporności już dla warunków standardowych.

7.5.3 Wpływ rozmiaru jądra przekształcenia

Z sześciu wybranych w poprzednim podrozdziale estymatorów dwa mają stały rozmiar jądra: DSL oraz DPT. Są to klasyczne filtry o rozmiarze 3x3. Modyfikacja zaproponowana w tym podrozdziale nie ma wpływu na ich działanie. Pozostałe estymatory umożliwiają zmianę rozmiaru jądra. W przypadku estymatorów w wersji tennengard objawia się to poprzez zmianę obszaru uśredniania wartości estymatora ostrości. Zmiana rozmiaru jądra

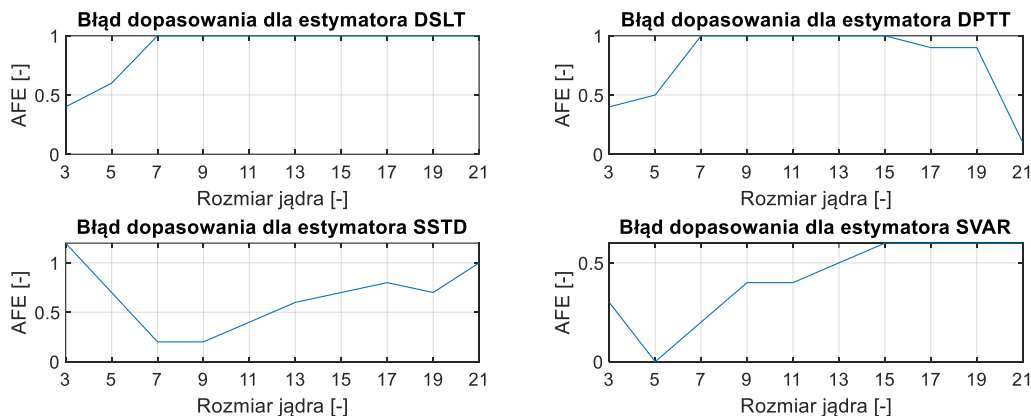
dla estymatorów SSTD oraz SVAR umożliwia uwzględnienie innej liczby pikseli podczas obliczania odpowiedniej miary statystycznej.

Pomiary wykonano dla serii rozmiarów masek od 3×3 do 21×21 . Serię wygenerowano z krokiem równym 2, ze względu na wymaganie zastosowania nieparzystego rozmiaru jądra. Porównanie wykonano dla powierzchni metalowej rejestrowanej z zastosowaniem oświetlacza typu DL.

W przypadku algorytmu selekcji płaszczyzny ostrej maksimum otrzymano zerowe wartości błędu AFE w całym zakresie.

Rysunek 7.10 prezentuje wartości błędu AFE w zależności od rozmiaru jądra dla algorytmu CoG. W zestawieniu pominięto estymatory o stałym rozmiarze jądra. W przypadku algorytmu CoG wartości AFE mieszczą się w zakresie do 1.

Dla obu algorytmów otrzymane wartości AFE są akceptowalne. Dla tak niewielkich wartości nie jest obserwowany trend zależny od rozmiaru jądra wykorzystywanych estymatorów. Wartości AFE dla estymatorów DSL oraz DPT nie zależą od rozmiaru jądra i dla rozważanej mapy wysokości wynoszą 0.

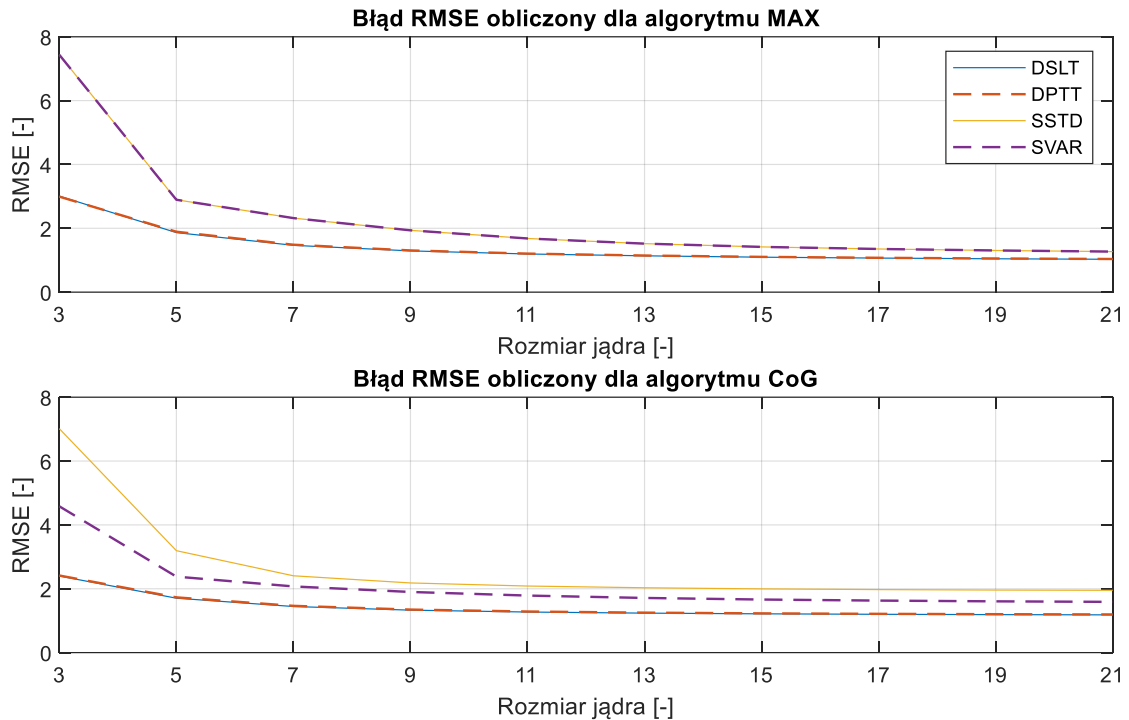


Rys. 7.10. Wartości AFE w zależności od rozmiaru jądra dla wybranych do porównania estymatorów. Wartości dla algorytmu wyznaczania płaszczyzny ostrej CoG

Estymatory DSL oraz DPT osiągnęły wartości RMSE równe odpowiednio 7.7 i 4.9 dla algorytmu maksimum. Dla algorytmu CoG otrzymano wyniki RMSE równe kolejno 7.3 oraz 4.8.

Rysunek 7.11 prezentuje wartości błędu RMSE. Dla algorytmu wyznaczania płaszczyzny ostrej funkcją maksimum w całym badanym zakresie wartości RMSE mieszczą się

poniżej 8. Dla estymatorów o zmiennym rozmiarze jądra wartość RMSE spada wraz ze wzrostem rozmiaru jądra przekształcenia. Najlepsze wyniki zwracane są dla obu algorytmów przez estymatory DPTT oraz DSLT.



Rys. 7.11. Wartości RMSE w zależności od rozmiaru zastosowanego jądra przekształcenia dla obu algorytmów wyznaczania płaszczyzny ostrej

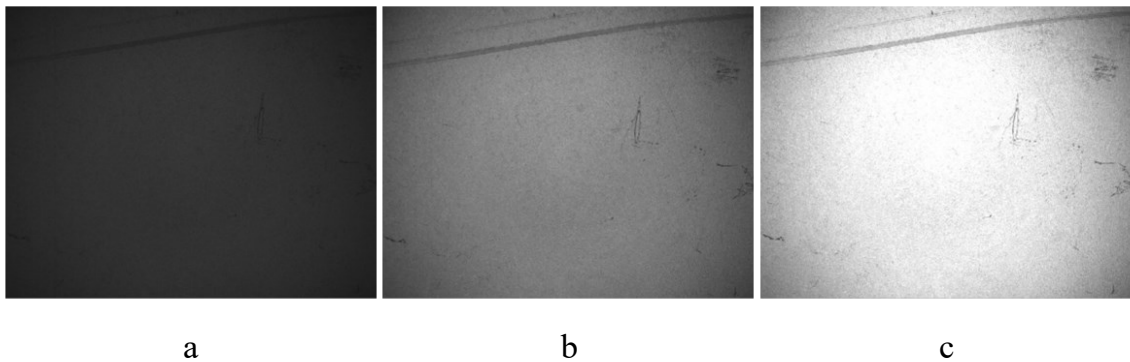
Zmiany RMSE są największe dla mniejszych rozmiarów jądra. Im większy rozmiar jądra tym mniejszy jest wpływ jego zmiany na wartość RMSE. Podczas doboru odpowiedniego dla danej aplikacji pomiarowej rozmiaru jądra, należy również zwrócić uwagę na wzrost wymaganej mocy obliczeniowej, która rośnie wraz z jego zwiększaniem.

7.5.4 Wpływ kontrastu

Jednym z badanych zakłóceń jest wpływ kontrastu na obrazie źródłowym na jakość odwzorowania sceny. Zmiana kontrastu nie była symulowana cyfrowo poprzez zastosowanie przekształceń obrazu. Zmiana kontrastu odbywała się w sposób analogowy odpowiadający warunkom spotkanym na przemysłowych liniach produkcyjnych.

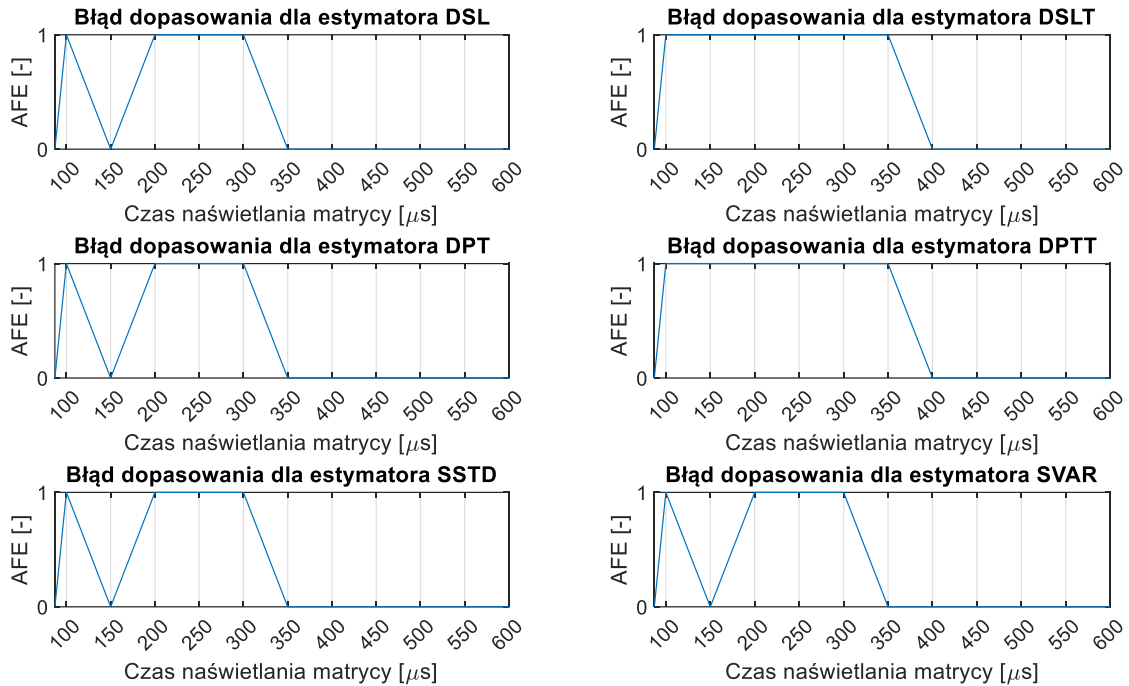
Kontrast na obrazie zmieniano poprzez regulację czasu ekspozycji sensora kamery. Zmiana taka w warunkach statycznych jest również tożsama ze zmianą mocy oświetlacza wykorzystywanego w systemie wizyjnym. Pomiary wykonano dla sekwencji czasu ekspozycji w zakresie od $87\mu\text{s}$ do $600\mu\text{s}$ z krokiem $50\mu\text{s}$ (Rys. 7.12). Otrzymano w ten sposób dwanaście próbek prezentujących zależność wartości błędów od kontrastu na obrazach źródłowych. Wartość $87\mu\text{s}$ wynika z minimalnego czasu ekspozycji możliwego do ustawienia dla stosowanego sensora.

Dla wartości $600\mu\text{s}$ następowało nasycenie części pikseli matrycy. Nasycenie powoduje ograniczenie wartości intensywności pikseli na obrazie cyfrowym względem sygnału analogowego. W konsekwencji zmniejszany jest kontrast na obrazie cyfrowym. Rozpatrywany zbiór rozszerzono o obrazy z nasyceniem ze względu na obserwację obecności tego niekorzystnego zjawiska w zastosowaniach przemysłowych.



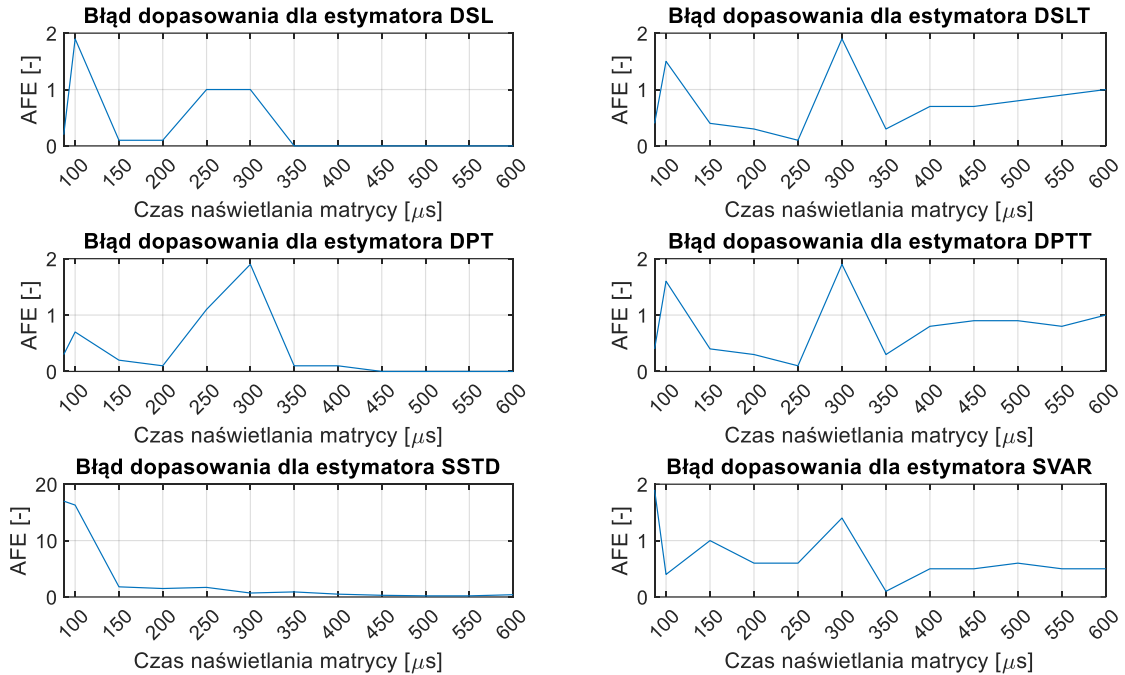
Rys. 7.12. Zarejestrowane obrazy powierzchni blachy stalowej przy zmiennym kontraście:
a – czas ekspozycji $87\mu\text{s}$ b – czas ekspozycji $300\mu\text{s}$, c – czas ekspozycji $600\mu\text{s}$

Rysunek 7.13 prezentuje wyniki AFE w zależności od czasu ekspozycji sensora dla danego stosu obrazów. Płaszczyznę ostrą wyznaczono algorytmem maksimum. Wyniki mieszczą się w zakresie do 1.



Rys. 7.13. Wartości AFE w zależności od kontrastu dla wybranych do porównania estymatorów.
Wartości dla algorytmu selekcji płaszczyzny ostrej maksimum

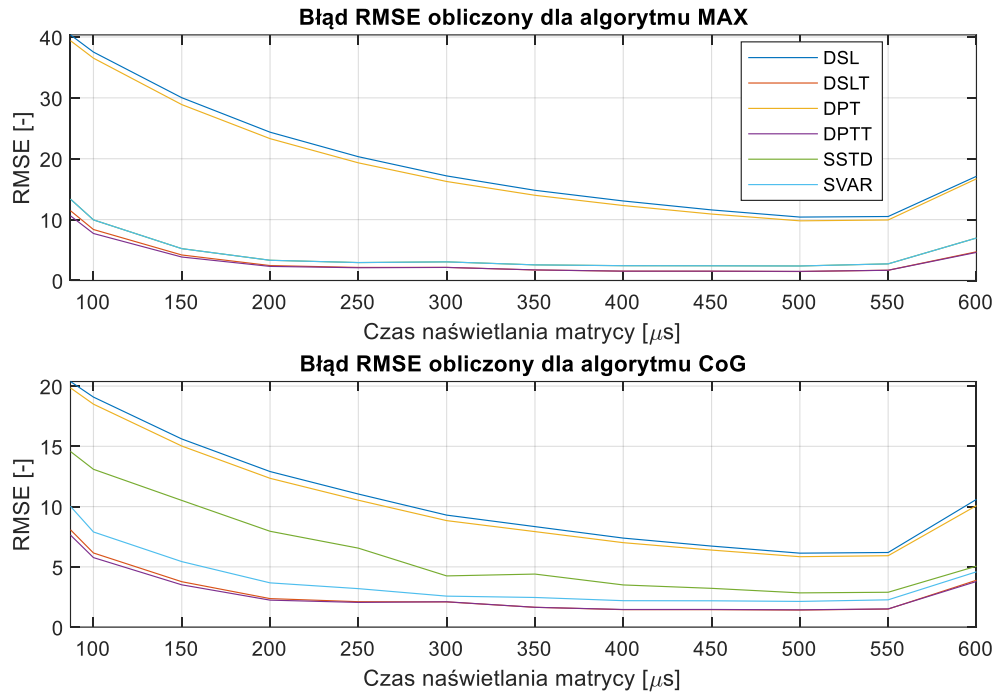
Rysunek 7.14 prezentuje wyniki AFE w zależności od czasu ekspozycji matrycy dla danego stosu obrazów. Płaszczyznę ostrą wyznaczono algorytmem CoG. Wyniki są tożsame z otrzymanymi dla algorytmu maksimum. Błędy dla większości estymatorów są nieznacznie większe. Wyjątkiem jest estymator SSTD, który dla obrazów o niewielkim kontraście – czasy ekspozycji 87 μs oraz 100 μs , zwrócił błąd AFE powyżej 15. Dla pozostałych estymatorów wartości błędów są na tyle niewielkie, że nie zauważono trendu AFE w zależności od kontrastu.



Rys. 7.14. Wartości AFE w zależności od kontrastu dla wybranych do porównania estymatorów.
Wartości dla algorytmu wyznaczania płaszczyzny ostrej CoG

Znaczące różnice można odczytać na rysunku 7.15. Prezentuje on wartość błędu RSME w zależności od kontrastu dla obu algorytmów wyznaczania płaszczyzny ostrej. Zauważalna jest tendencja zmniejszania się błędu wraz ze zwiększaniem kontrastu. Najlepsze wyniki osiągają estymatory o zmiennym rozmiarze jądra przekształcenia. Dla algorytmu wyznaczania płaszczyzny ostrej funkcją maksimum i czasów powyżej 100 μ s błąd RMSE mieści się poniżej wartości 10. Natomiast dla czasów powyżej 200 μ s osiąga wartości poniżej 4. W przypadku algorytmu CoG zauważalna jest poprawa działania dla estymatorów DSLT, DPTT oraz SVAR. Dla czasów powyżej 150 μ s wartość błędu spada poniżej 5.

Wyjątkiem od malejącego trendu jest wartość błędu dla 600 μ s. Wartość błędu rośnie. Spowodowane jest to nasyceniem wartości intensywności części pikseli powodującym zmniejszenie kontrastu na obrazie.



Rys. 7.15. Wartości RMSE w zależności od kontrastu dla obu algorytmów wyznaczania płaszczyzny ostrej

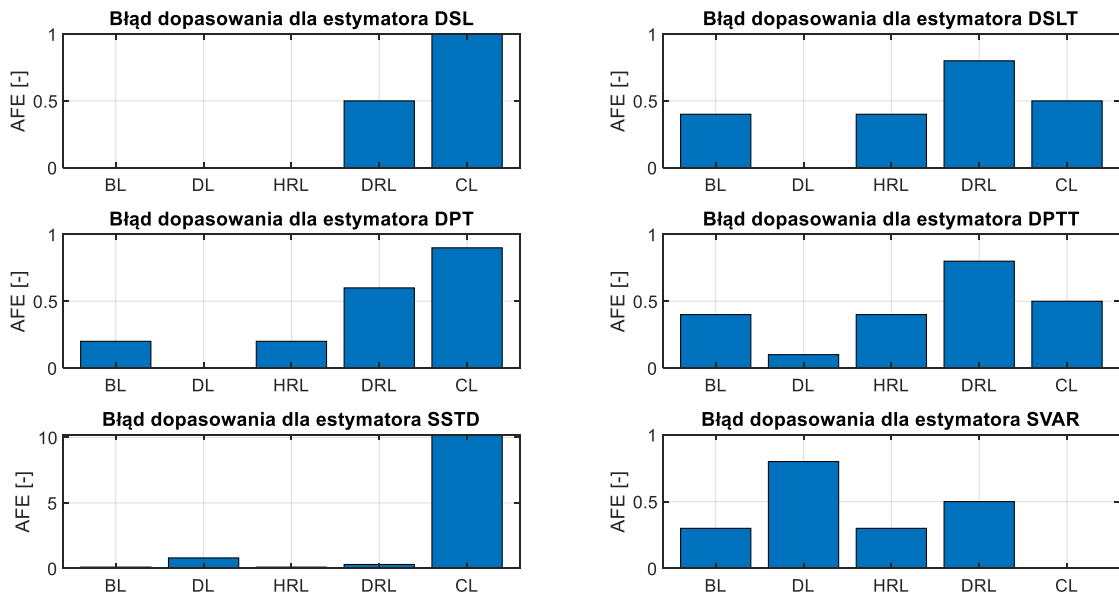
Wpływ kontrastu został zbadany pośrednio poprzez zmianę czasu ekspozycji sensora. Zmiany kontrastu miały ograniczony wpływ na wartość AFE. Wyjątkiem był estymator SST, który znacząco odbiegał wartością błędu AFE dla czasu ekspozycji poniżej 150 μ s. Niskie wartości błędu nie pozwoliły na zaobserwowanie trendu wpływu kontrastu na AFE.

Wartość RMSE lepiej prezentuje wpływ kontrastu na odwzorowanie mapy wysokości. Wraz ze zwiększaniem kontrastu do 550 μ s wartość RMSE zmniejsza się. Wyjątkiem jest pomiar dla czasu ekspozycji równemu 600 μ s, dla którego błąd rośnie. Spowodowane jest to nasyceniem części pikseli obrazu. Nasycenie wpływa na zmniejszenie kontrastu oraz pogorszenie jakości odwzorowania sceny.

7.5.5 Wpływ geometrii oświetlenia

Kolejnym zbadanym typem zakłócenia jest oświetlenie sceny. Wprowadzenie zmienności oświetlenia sceny zrealizowano poprzez zmiany geometrii układu oświetlacza-kamera. Zmiany położenia i typu oświetlacza powodują powstawanie odbić, lokalnego nasycenia obrazu oraz nierównomierności oświetlenia sceny. W tym podrozdziale przedstawione zostaną wyniki otrzymane przez zastosowanie oświetlaczy o różnej geometrii oraz różnym stopniu rozproszenia światła.

Na podstawie zebranych obrazów wyznaczono AFE dla map wysokości zarejestrowanych z wykorzystaniem każdego z oświetlaczy. Dla każdego z rozważanych estymatorów otrzymano wartości AFE równą 0. Przy zastosowaniu algorytmu CoG wartość AFE mieści się w zakresie do 1. Wyjątkiem jest estymator SSTD, który dla obrazów zarejestrowanych z wykorzystaniem oświetlacza CL zwrócił wartość AFE równą 10 (Rys. 7.16).

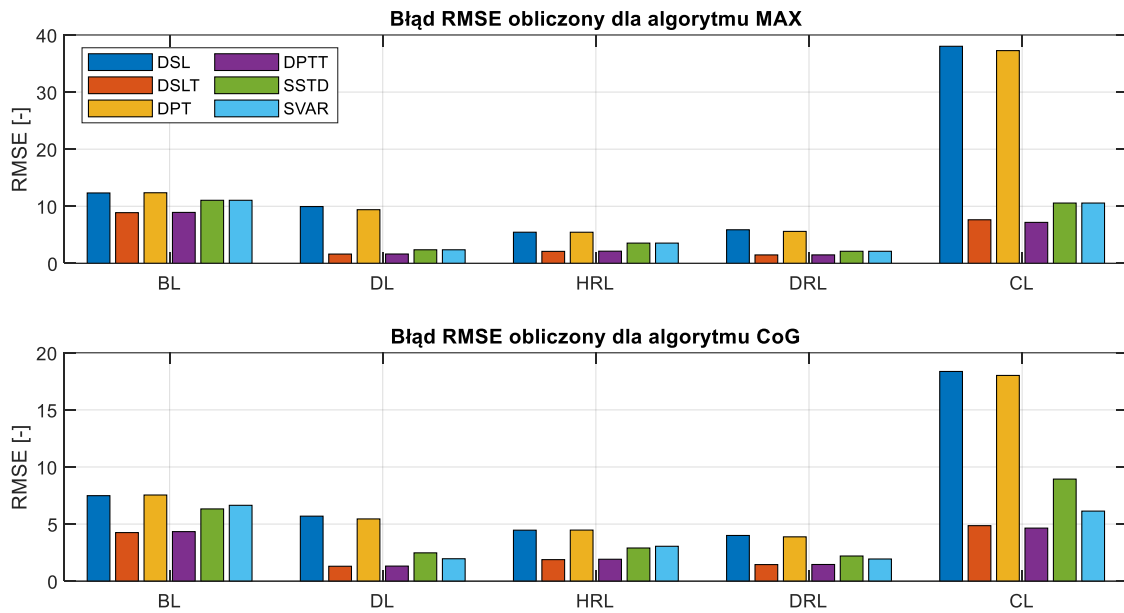


Rys. 7.16. Wartości AFE w zależności od zastosowanego oświetlacza dla wybranych do porównania estymatorów. Wartości dla algorytmu wyznaczania płaszczyzny ostrej CoG

Wartości RMSE są zróżnicowane w zależności od zastosowanego oświetlacza oraz estymatora (Rys. 7.17). W przypadku algorytmu wyznaczania płaszczyzny ostrej maksimum najgorsze wyniki osiągnął oświetlacz CL. Dla estymatorów DPT oraz DSL otrzymano wartość RMSE około 40. Pozostałe estymatory zwróciły wartości RMSE około 10. Podobne

wartości – około 10 dla wszystkich estymatorów, otrzymano dla oświetlacza BL. Dla pozostałych oświetlaczy otrzymano lepsze wyniki. W ich przypadku estymatory umożliwiające zmianę rozmiaru jądra przekształcenia utrzymały wartość RMSE poniżej 4.

Algorytm CoG pozwolił zredukować wartość RMSE o połowę dla oświetlaczy CL oraz BL. Dla pozostałych estymatorów wartości błędów zmniejszyły się nieznacznie. Estymatory umożliwiające zmianę rozmiaru jądra przekształcenia utrzymały wartość RMSE poniżej 3.



Rys. 7.17. Wartości AFE w zależności od zastosowanego oświetlacza dla wybranych do porównania estymatorów

8 Transformacja obraz – świat

Transformacja obraz – świat w metodzie obrazowania SFF różni się w zależności od metody akwizycji obrazu. W przypadku zastosowania optyki stałoogniskowej transformacja otrzymywana jest przez synchronizację akwizycji z układem napędowym. Pozycja płaszczyzny przedmiotowej związana jest bezpośrednio z położeniem systemu wizyjnego, przemieszczanego przez układ napędowy. Dla zarejestrowanego stosu obrazów konieczne jest przechowywanie informacji o pozycji dla każdego z zarejestrowanych obrazów. Na podstawie tej informacji możliwe jest przekształcenie z układu współrzędnych związanego z mapą wysokości na układ współrzędnych związany ze stanowiskiem.

Rozdzielczość przestrzenna związana jest z przemieszczeniem pomiędzy akwizycją kolejnych obrazów stosu. Wartość ta jest w przybliżeniu stała dla niewielkich zakresów przemieszczeń (dla zakresów przemieszczeń, gdzie wpływ zniekształceń zidentyfikowanych w rozdziale 4 jest pomijalny).

Transformacja obraz – świat przy zastosowaniu optyki sterowalnej nie może być związana z układem napędowym ze względu na jego eliminację. Płaszczyzna obrazowa ulega przemieszczeniu przez zmianę mocy skupiającej układu optycznego. Konieczna jest synchronizacja rejestracji kolejnych obrazów ze sterowaniem soczewki. Przypadek ten jest o tyle trudniejszy, że informacja o zastępczej mocy skupiającej nie przekłada się bezpośrednio na wysokość. Konieczne jest wyznaczenie funkcji przejścia umożliwiającej przeliczenie zastępczej mocy skupiającej na przemieszczenie płaszczyzny przedmiotowej. Po wyznaczeniu funkcji możliwe będzie zaproponowanie przekształcenia lokalnego układu współrzędnych związanego z mapą wysokości na układ współrzędnych stanowiska.

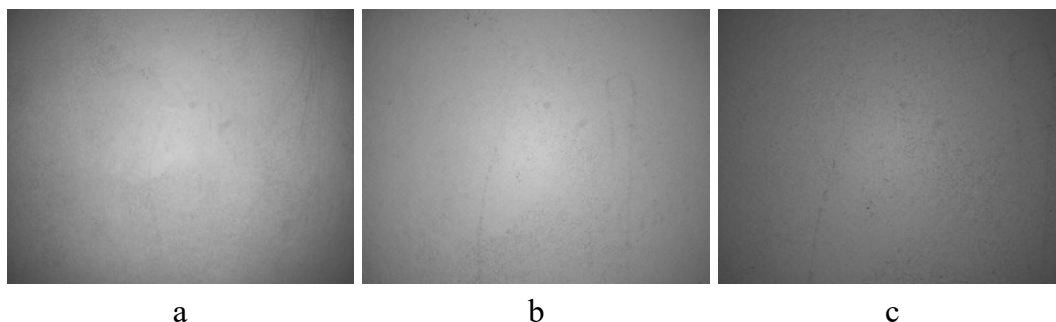
Kolejne utrudnienie stanowi próbkowanie wykonywane ze stałym interwałem mocy skupiającej. Podejście takie nie przekłada się na stały interwał przemieszczenia. Efektem tego jest zmienna rozdzielczość przestrzenna w osi Z. Konieczne jest wyznaczenie krzywej położenia płaszczyzny przedmiotowej w funkcji mocy skupiającej soczewki.

8.1 Eksperymentalne wyprowadzenie funkcji przejścia

Podejście doświadczalne polega na wyznaczeniu funkcji przejścia między lokalnym układem współrzędnych związanym z obrazem, a układem współrzędnych stanowiska z wykorzystaniem wzorcowania. W celu wyznaczenia funkcji przejścia wykorzystano stanowisko omówione w rozdziale 6 z napędem w osi Z.

Badania obejmowały obrazowanie sceny płaskiej przy zmianie pozycji układu optycznego względem badanej powierzchni. Dla danego położenia systemu wizyjnego względem powierzchni bazowej wyznaczano moc skupiającą soczewki, dla której estymator ostrości przybierał wartość maksymalną. Wartość mocy skupiającej powiązana została z pozycją na osi Z stanowiska dla maksymalnej wartości estymatora.

Płaszczyznę referencyjną stanowiła płyta znajdująca się na podstawie stanowiska. Zmiana odległości roboczej w rozpatrywanym zakresie 300 mm wpływała znacząco na zmianę warunków oświetleniowych. Wraz ze zmniejszaniem odległości roboczej ilość światła docierającego na sensor ulegała zwiększaniu. Aby nie dopuścić do wystąpienia nasycenia na obrazie, wprowadzano korekty czasu ekspozycji. Redukcję czasu ekspozycji wykonywano skokowo w momencie przekroczenia wartości 240 intensywności przez którykolwiek z pikseli stosu obrazów. Zmiana czasu ekspozycji odbywała się w zakresie $\langle 0.3 \text{ ms}, 1 \text{ ms} \rangle$.



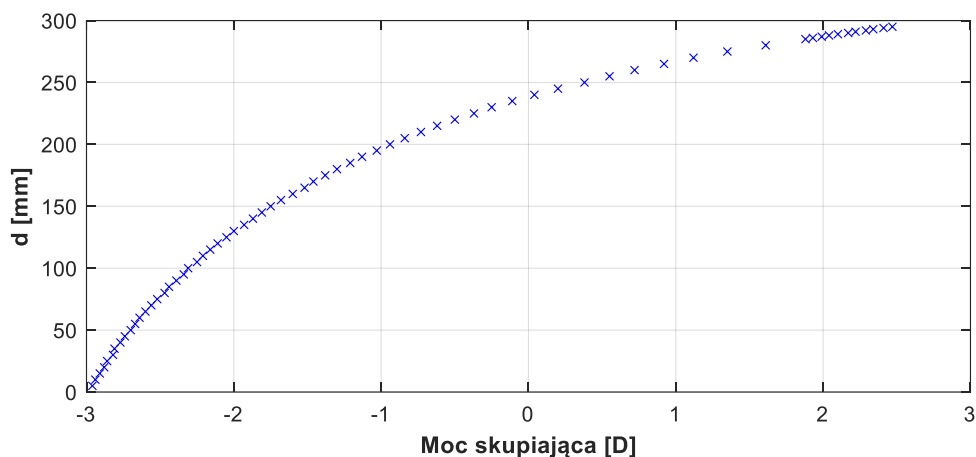
Rys. 8.1. Zmiana średniej intensywności obserwowana dla różnych odległości roboczych:

a – obraz ostry otrzymany przy $d = 0 \text{ mm}$, b – obraz ostry otrzymany przy $d = 220 \text{ mm}$,

c – obraz ostry otrzymany przy $d = 300 \text{ mm}$

Do estymacji ostrości wykorzystano estymator DSLT o rozmiarze jądra 7×7 . Następnie porównano ostrość w stosie obrazów. Do porównania wykorzystano część obrazu zawę-

żoną do ROI o wymiarach 200×200 pikseli. Próbkę pobierano z interwałem 5 mm. Dla odległości w zakresie (2900 mm, 3000 mm) próbkowanie zagęszczono do interwału przemieszczenia o wartości 1 mm.



Rys. 8.2. Wykres położenia płaszczyzny przedmiotowej w funkcji mocy skupiającej, wyniki uzyskane w badaniach doświadczalnych

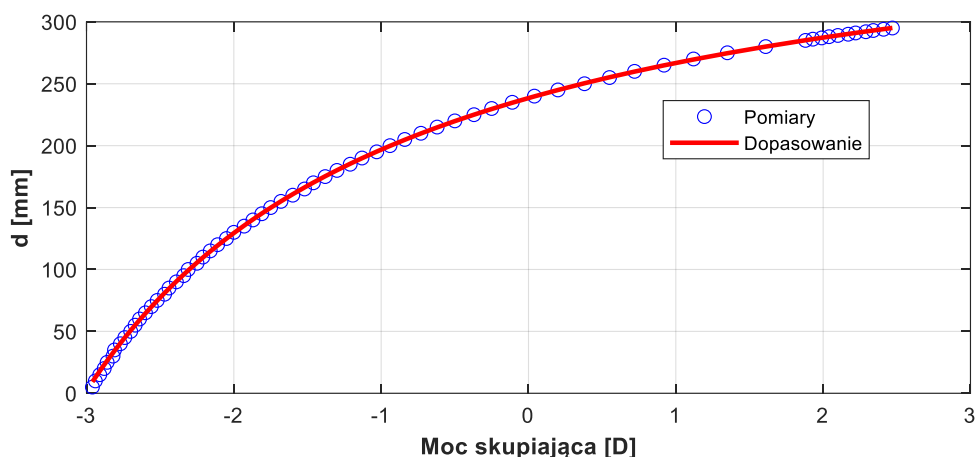
Na podstawie otrzymanych danych przystąpiono do wyznaczenia krzywej zależności między mocą skupiającą a położeniem płaszczyzny przedmiotowej. Uwzględniając zależności 2.2 i 2.5 opisujące DoF oraz moc skupiającą, można wyznaczyć proporcjonalność w postaci:

$$d \sim \frac{1}{\phi} \quad (8.1)$$

Zdecydowano się na wykonanie modelu parametrycznego i dopasowanie jego współczynników [a, b, c] do posiadanych danych. Przyjęto model postaci:

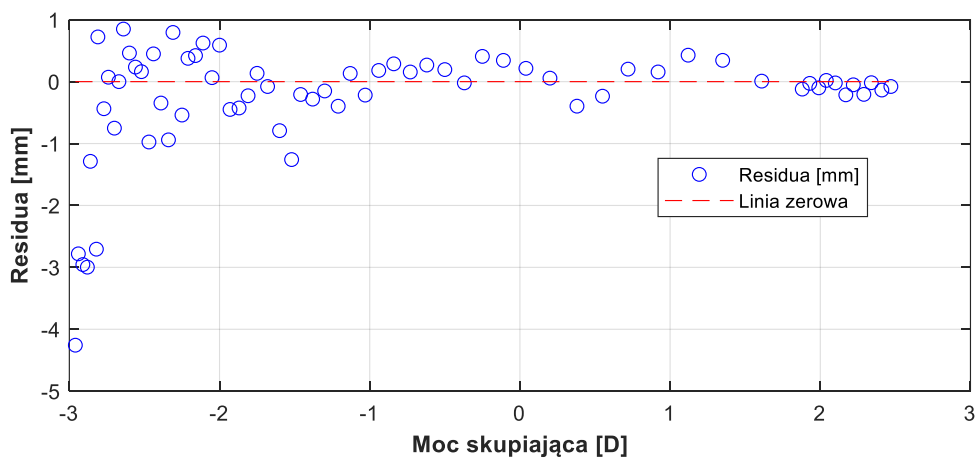
$$d = \frac{a}{(\phi - c)} + b \quad (8.2)$$

Obliczenia wykonano metodą najmniejszych kwadratów. Otrzymaną krzywą oraz z danymi źródłowymi zawarto na rysunku 8.3. Wyznaczono również parametr jakości dopasowania $R^2 = 0.9999$.



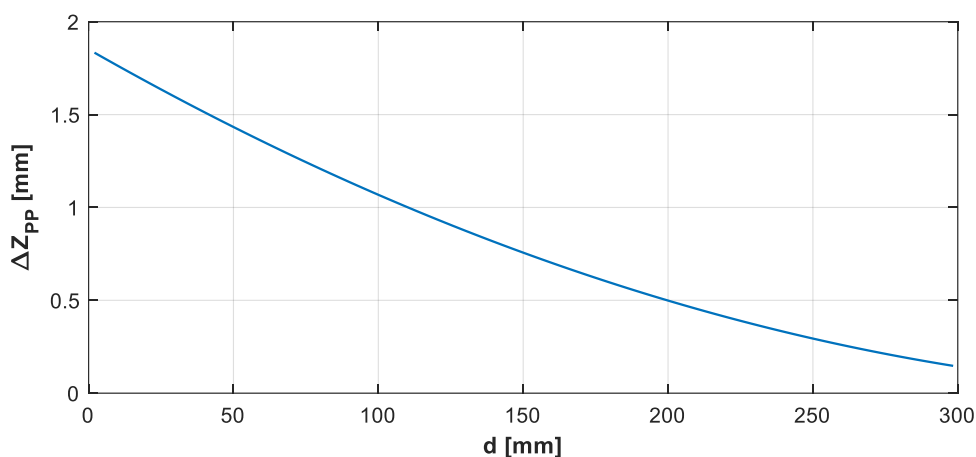
Rys. 8.3. Dopasowanie wyników pomiarów do modelu funkcji hiperboli

Rysunek 8.4 zawiera wartości residua – wartości różnicy między wartościami rzeczywistymi a zwracanymi przez model. Wprowadzono również linię zerową tożsamą z pełną zgodnością modelu. Występuje symetryczność względem linii zerowej oraz nie występuje przesunięcie wartości średniej. Świadczy to o poprawnym dopasowaniu. Większy rozrzut widoczny jest dla ujemnych wartości mocy skupiającej soczewki. Związane jest to ze zmianą DoF. Ujemne wartości mocy skupiającej odpowiadają większym odległościom roboczym. Występują nieliczne wartości odstające o wartości dwukrotnie większej od pozostałych. Mogą one być związane z szumami w danych lub błędem odczytu podczas badań.



Rys. 8.4. Residua otrzymane po procesie dopasowania modelu

Rozdzielczość obrazowania w osi Z (ΔZ) powiązana jest z przemieszczeniem płaszczyzny przedmiotowej podczas rejestracji stosu obrazów. Rysunek 8.5 przedstawia zależność między minimalną zmianą pozycji płaszczyzny przedmiotowej a położeniem w osi Z. Współrzędna d została wyznaczona w odniesieniu do układu współrzędnych związanego ze stanowiskiem. Najlepsza rozdzielczość ΔZ_{pp} o wartości około $150\ \mu\text{m}$ otrzymywana jest dla najmniejszego FOV (górna granica zakresu pomiarowego). Najgorszą rozdzielczość ΔZ_{pp} wynoszącą około $1.8\ \text{mm}$ otrzymywano dla dolnej granicy zakresu pomiarowego – na powierzchni stołu pomiarowego stanowiska badawczego.



Rys. 8.5. Rozdzielczość ΔZ_{pp} wynikająca z pozycjonowania płaszczyzny przedmiotowej w funkcji d

Wartości rozdzielczości ΔZ_{pp} z rysunku 8.5 nie są tożsame z parametrem rozdzielczości obrazowania ΔZ . Na wartość ΔZ ma również wpływ zastosowany algorytm selekcji płaszczyzny ostrej. Przyjęty w pracy algorytm CoG pozwala na obliczeniową poprawę rozdzielczości ΔZ w stosunku do ΔZ_{pp} .

Wyznaczono również rozdzielczości w osiach X oraz Y, których wartości zależą od odległości roboczej. Procedura wyznaczania tej zależności oparta została na pomiarze FOV. Wykonano serię pomiarów wzorca przy zmiennej odległości roboczej. Przy uwzględnieniu rozdzielczości sensora pozwala to na wyznaczenie rozdzielczości obrazowania dla osi X oraz Y na podstawie równań 8.3 oraz 8.4.

$$\Delta Y = \frac{FOV_Y}{R_{SY}} \quad (8.3)$$

gdzie:

ΔY – rozdzielczość obrazowania w osi Y,

FOV_Y – rozmiar FOV w osi Y,

R_{S_Y} – rozdzielczość sensora w osi Y, dla zastosowanej kamery wynosi 2048 pikseli.

$$\Delta X = \frac{FOV_X}{R_{S_X}} \quad (8.4)$$

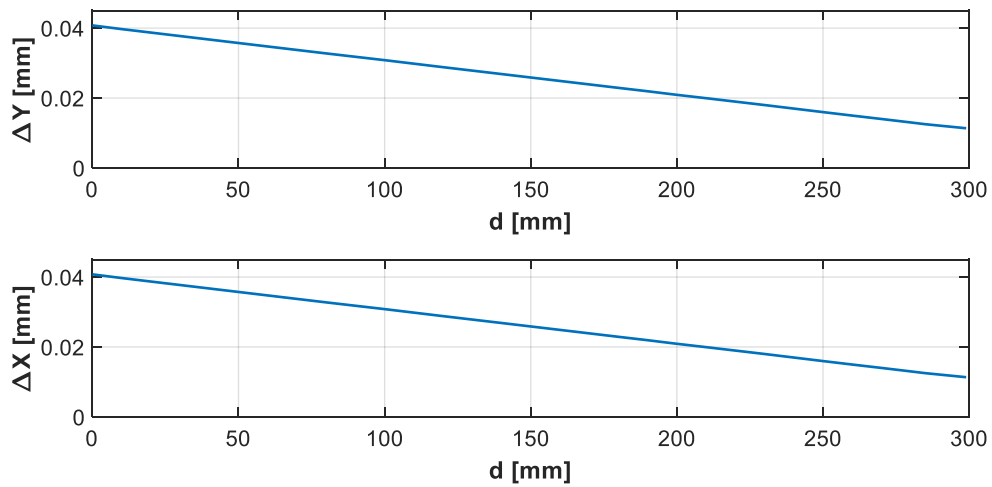
gdzie:

ΔX – rozdzielczość obrazowania w osi X,

FOV_X – rozmiar FOV w osi X,

R_{S_X} – rozdzielczość sensora w osi X, dla zastosowanej kamery wynosi 2592 pikseli.

Rysunek 8.6 prezentuje zależność otrzymanych rozdzielczości obrazowania ΔX oraz ΔY w funkcji odległości d. Wartość rozdzielczości dla tej samej płaszczyzny w obu osiach jest równa ($\Delta X = \Delta Y$).



Rys. 8.6. Rozdzielczość obrazowania ΔX oraz ΔY w funkcji odległości d

Znajomość wyznaczonych powyżej funkcji pozwala na wykonanie kalibracji wygenerowanej mapy wysokości. Efektem tej transformacji jest przekształcenie trójwymiarowego obrazu z lokalnego układu współrzędnych związanego z obrazem do układu współrzędnych związanego ze stanowiskiem.

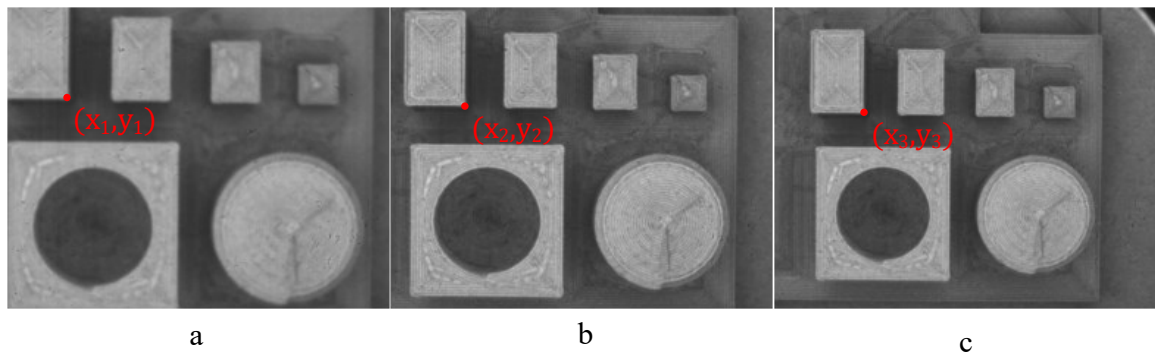
9 Kompensacja błędów obrazowania

W rozdziale 4 „Modyfikacja metody SFF” omówiono szereg zjawisk mających wpływ na jakość odwzorowania sceny na obrazie 3D. Ich wpływ jest szczególnie widoczny poza zakresem obrazowania spotykanym w dotychczasowych zastosowaniach metody SFF. Wykorzystanie metody SFF w zastosowaniach przemysłowych wiąże się z koniecznością kompensacji wpływu omówionych zjawisk na jakość generowanego obrazu 3D.

W ramach badań potwierdzono, że nie jest możliwa pełna eliminacja występujących zjawisk na poziomie doboru konfiguracji sprzętowej. Z tego powodu zaproponowano opracowanie algorytmów kompensujących ich wpływ na jakość odwzorowania obiektu przez obraz 3D.

9.1 Zmiana powiększenia podczas rejestracji stosu obrazów

Kolejnym z zakłóceń występujących podczas rejestracji stosu obrazów dwuwymiarowych z wykorzystaniem optyki sterowalnej jest zmiana powiększenia. W konsekwencji tego zjawiska zachodzi zmiana kąta widzenia obiektywu, która przekłada się na zmianę wymiarów pola widzenia. Oznacza to, że na dwuwymiarowym obrazie źródłowym rejestrowany jest inny obszar sceny zależnie od przyjętej mocy skupiającej soczewki. Rysunek 9.1 prezentuje zestaw trzech obrazów zarejestrowanych przy zmianie położenia płaszczyzny przedmiotowej. Na obrazach widoczne jest przemieszczenie wybranego punktu sceny w układzie współrzędnych związanym z obrazem. Punkt oznaczony na narożniku elementu konstrukcyjnego opisany współrzędnymi (x_1, y_1) na obrazie 9.1a, następnie współrzędnymi (x_2, y_2) na obrazie 9.1b oraz współrzędnymi (x_3, y_3) na obrazie 9.1c.

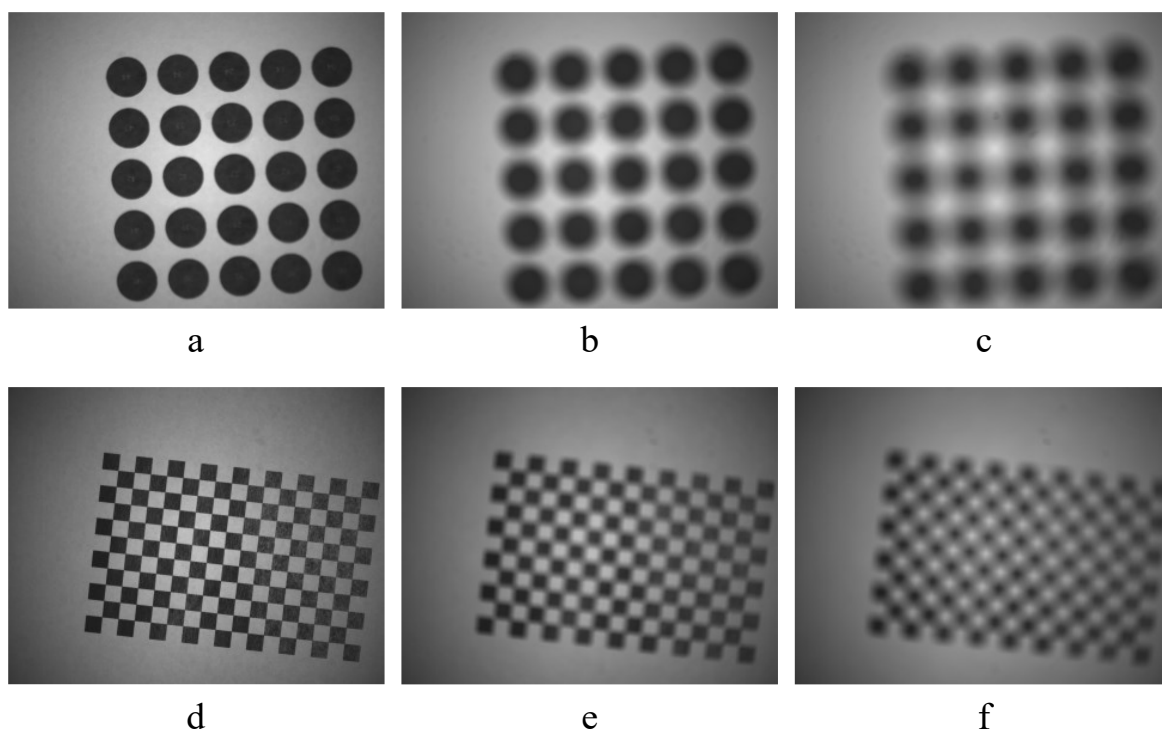


Rys. 9.1. Wybrane obrazy zarejestrowane podczas zmiany mocy skupiającej soczewki płynnej z zaznaczonym punktem wierzchołka elementu konstrukcyjnego:

- a – wierzchołek w położeniu (x_1, y_1) , b – wierzchołek w położeniu (x_2, y_2) ,
c – wierzchołek w położeniu (x_3, y_3)

Wyznaczenie mapy wysokości metodą SFF wymaga porównania wartości estymatora ostrości w dokładnie tym samym punkcie dla zmiennych położen płaszczyzny przedmiotowej. Obserwowane zmiany położenia punktów na obrazach źródłowych zarejestrowanych w stosie uniemożliwiają jednak porównywanie estymatorów ostrości tych samych punktów. Zjawisko to generuje konieczność opracowania algorytmu kompensacji pozwalającego na utrzymanie punktów sceny w tej samej lokalizacji na wszystkich obrazach stosu.

W celu kompensacji konieczne było wyznaczenie krzywej zmiany powiększenia w funkcji zmiany mocy skupiającej. Dodatkową trudnością podczas obrazowania przy zmianie mocy skupiającej układu jest wykorzystanie optyki o niewielkiej głębi ostrości. Skutkuje to rozmyciem części obszarów obrazu podczas zmiany położenia płaszczyzny przedmiotowej (Rys. 9.2). Nie jest zatem możliwe ustalenie pozycji wszystkich punktów i krawędzi na obrazach zarejestrowanych w stosie. Dotyczy to elementów sceny obrazowanych poza zakresem głębi ostrości (Rys. 9.2c, 9.2f).

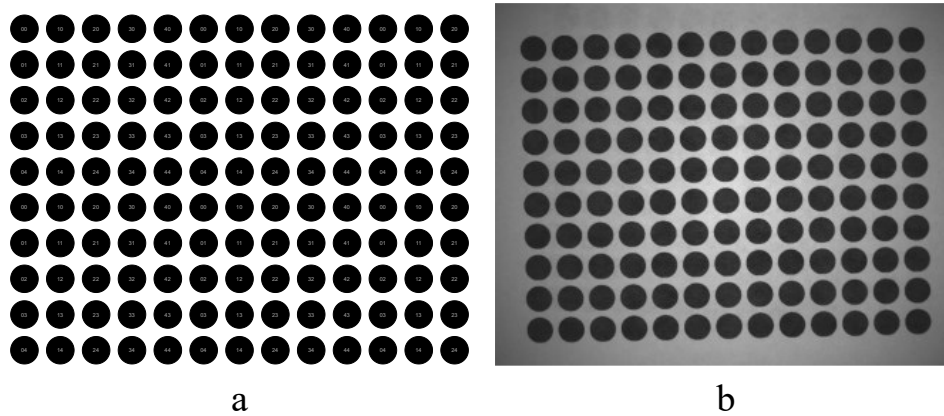


Rys. 9.2. Wybrane obrazy zarejestrowane podczas zmiany mocy skupiającej soczewki płynnej: a-c – wzorec matrycowy kołowy, d-f – wzorec szachownicy
a, d – obraz ostry, b, e – obraz z nieostrymi krawędziami, c, f – obraz znacznie rozmyty

Obrazowanie wzorca opisanego szachownicą poza głębią ostrości uniemożliwia wyznaczenie punktów charakterystycznych wzorca. Nie jest zatem możliwa realizacja kalibracji utrzymującej punkty charakterystyczne w tej samej pozycji na obrazie.

W celu wyeliminowania tego zjawiska w badaniach zastosowano wzorec płaski zdefiniowany w formie macierzy 13×10 okręgów (Rys. 9.3a). W opracowanym algorytmie wykorzystano charakterystykę rozmycia punktu wzorca zarejestrowanego na obrazie. Rozmycie punktu wzorca jest symetryczne we wszystkich kierunkach na obrazie (Rys. 9.2b).

Zastosowanie tego typu wzorca pozwala na wykorzystanie algorytmu wyznaczania współrzędnych środka okręgów niezależnie od tego czy ich krawędzie są ostre, czy uległy rozmyciu (Rys. 9.2b, 9.2e). Do wyznaczenia pozycji środka okręgów posłużono się algorytmem wyznaczania środka ciężkości obszarów opisujących każdy z punktów wzorca. Algorytm ten umożliwia zaznaczenie środka okręgu niezależnie od stopnia rozmycia jego krawędzi.

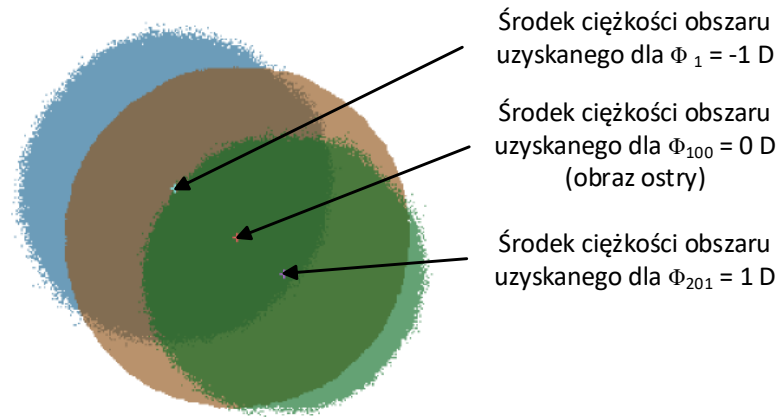


Rys. 9.3. Zaproponowany wzorec kalibracyjny w formie macierzy 13×10 okręgów:
 a – rysunek wzorca, b – obraz wzorca dla ustawienia płaszczyzny przedmiotowej na powierzchni obrazowanego wzorca

Jako wyznacznik zmiany powiększenia przyjęto względne przemieszczenie środka ciężkości okręgów względem punktu przejścia osi optycznej przez matrycę. Projektowo przyjmuje się, że punkt przejścia osi optycznej przez sensor kamery przypada w jego środku geometrycznym. Dla zastosowanej kamery środek definiują współrzędne $(x, y) = (1296, 1024)$. Jednak ze względu na błędy montażowe sensora w kamerze, błędy osiowości obiektywu lub inne czynniki, punkt przejścia osi optycznej przez sensor kamery może ulec przesunięciu.

Zaproponowano wyznaczenie rzeczywistych współrzędnych opisujących oś optyczną na matrycy w sposób doświadczalny. W tym celu zarejestrowano stos 201 obrazów wzorca podczas zmiany mocy skupiającej w zakresie $[-1D, 1D]$ w stosunku do ostrego obrazu wzorca (Rys. 9.3b).

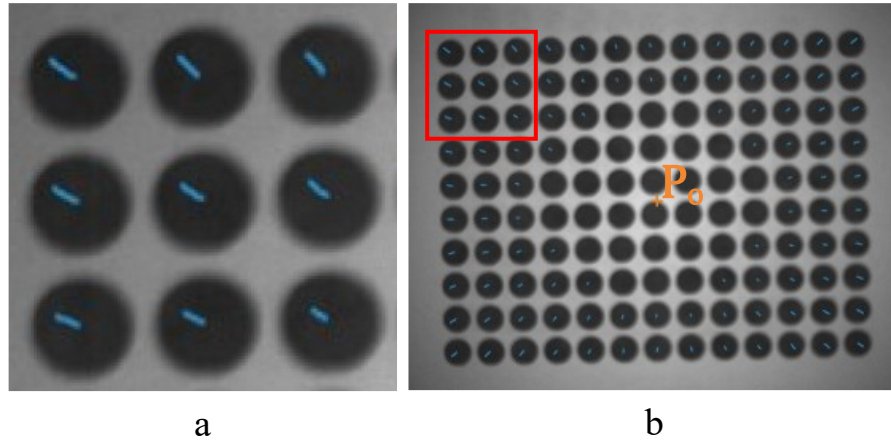
Rysunek 9.4 prezentuje przemieszczenie obszaru wybranego okręgu wzorca dla skrajnych wartości mocy skupiającej oraz dla położenia płaszczyzny przedmiotowej na powierzchni wzorca. Na rysunku oznaczono położenia środków ciężkości dla trzech obrazów obserwowanego obszaru. Wyznaczenie współrzędnych środków ciężkości okręgów pozwoliło na wyznaczenie trajektorii zmian położenia każdego z okręgów podczas zmian mocy skupiającej podczas akwizycji testowego stosu obrazów.



Rys. 9.4. Porównanie przemieszczenia obszarów wybranego okręgu w zależności od nastawy mocy skupiającej soczewki; regiony dla obrazu ostrego (brązowy) oraz dla nastaw mocy skupiającej soczewki -1D (niebieski) oraz 1D (zielony) względem obrazu ostrego

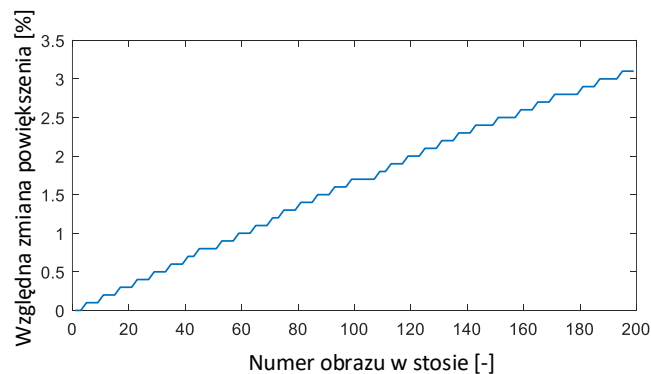
Rysunek 9.5 prezentuje obraz wzorca kalibracyjnego wraz z naniesionymi trajektoriami zakreślanymi przez środki ciężkości okręgów podczas zmiany nastawy soczewki płynnej. Obliczone trajektorie wykorzystano do dopasowania prostych metodą najmniejszych przycinanych kwadratów (*Least Trimmed Squares* – LTS). W stosunku do metody najmniejszych kwadratów, metoda LTS charakteryzuje się zwiększoną odpornością na występowanie wartości odstających [140].

Kolejny krok stanowiło wyznaczenie punktu przecięcia otrzymanych prostych – punktu P_o będącego rzeczywistym punktem przejścia osi optycznej przez matrycę sensorów kamery. Wyznaczony zestaw prostych nie przecinał się idealnie w jednym punkcie. W celu wyznaczenia punktu P_o wykorzystano narzędzia optymalizacyjne. Jako kryterium minimalizacji przyjęto sumę odległości punktu P_o od wyznaczonego zbioru prostych. Obliczone współrzędne punktu P_o oddalone były o około 20 pikseli od rzeczywistego środka geometrii matrycy sensorów kamery (Rys. 9.5b). Przesunięcie to oznacza błąd pozycjonowania matrycy sensorów zmontowanej w kamerze względem osi optycznej o około $90 \mu\text{m}$.



Rys. 9.5. Obraz wzorca: a - powiększenie obrazu elementów wzorca z oznaczonymi trajektoriami przemieszczenia środka ciężkości okręgów, b – obraz wzorca z oznaczoną rzeczywistą pozycją osi optycznej – P_o

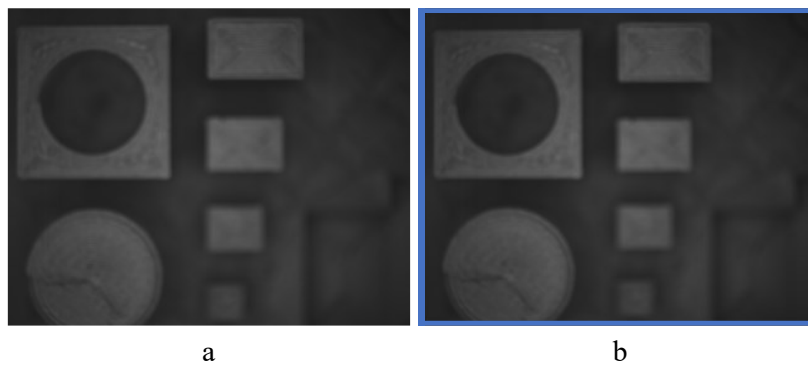
Wyznaczona pozycja punktu P_o oraz współrzędne położenia środków ciężkości okręgów dla kolejnych obrazów stosu pozwoliły na wyznaczenie zmian powiększenia w zarejestrowanym stosie 201 obrazów. Wyznaczono charakterystykę względnej zmiany powiększenia w funkcji zmiany mocy skupiającej soczewki widoczną na rysunku 9.6. Wyniki wskazują na zmianę powiększenia w zakresie do 3%. W przypadku wykorzystanej matrycy sensorów takie zmiany mogą powodować przesunięcia położenia punktów i krawędzi na obrazach do 30 pikseli.



Rys. 9.6. Wykres wyznaczonej funkcji względnej zmiany powiększenia w funkcji zmiany mocy skupiającej soczewki płynnej w zakresie (-1D do 1D)

Wyznaczoną charakterystykę wykorzystano do normalizacji rozmiaru każdego z obrazów źródłowych zarejestrowanych w stosie. Pozwoliło to na utrzymanie punktów charakterystycznych sceny w tej samej pozycji na obrazach znormalizowanych.

Stos obrazów znormalizowanych zapewnia poprawne porównanie ostrości wszystkich punktów sceny w metodzie SFF. Wprowadzona kompensacja wprowadza dodatkowy niekorzystny efekt. Normalizacja stosu obrazów powoduje zmianę rozdzielczości obrazów, co w konsekwencji prowadzi do powstawania zewnętrznej ramki o intensywności równej 0 dla obszarów, które nie zostały zobrazowane w całym stosie w wyniku zmian powiększenia obrazów (Rys. 9.7).

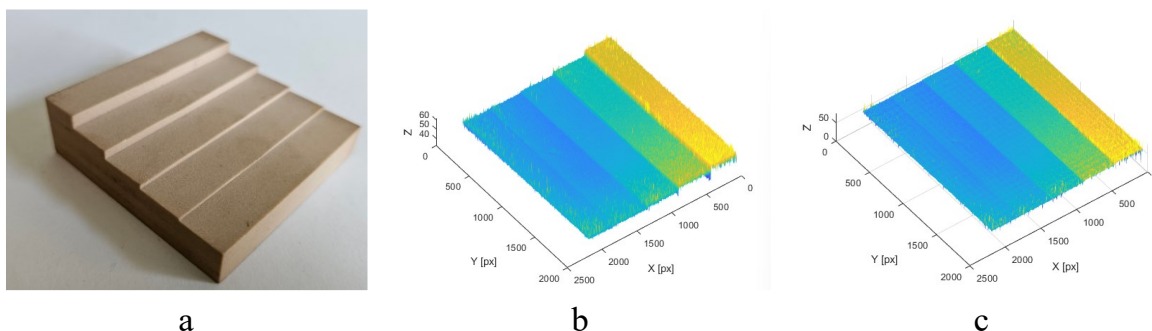


Rys. 9.7. Wybrany obraz źródłowy ze stosu: a – przed kompensacją, b – po przeprowadzeniu kompensacji (widoczna ramka wynikająca ze zmiany rozdzielczości obrazu)

Wyniki dla obrazowania scen trójwymiarowych wskazują, na to że wprowadzona kompensacja powoduje redukcję wartości RMSE rzędu 30–60%. Wartość ta jest zależna od obrazowanego elementu. Największa redukcja RMSE zaobserwowana została dla obiektów o niejednorodnej teksturze oraz dla obiektów o większej liczbie skokowych zmian wysokości.

Rysunek 9.8 prezentuje wynik działania zaproponowanego algorytmu kompensacji przy obrazowaniu sceny trójwymiarowej. Rysunek 9.8a zawiera obrazowany element wzorca schodkowego o zmianie wysokości między kolejnymi stopniami równą odpowiednio: 0.5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm. Rysunki 9.8b oraz 9.8c przedstawiają kolejno obraz trójwymiarowe, przy budowie którego nie wykorzystano proponowanego algorytmu kompensacji oraz obraz z wdrożonym algorytmem kompensacji. Widoczne są różnice w pobliżu krawędzi oraz na powierzchniach schodków. Algorytm kompensacji pozwolił na redukcję

szumów oraz artefaktów widocznych na obrazie 9.8b. Szczególnie zauważalne jest zmniejszenie liczby artefaktów na granicy obrazu, gdzie wpływ zmiany powiększenia był największy.



Rys. 9.8. Wpływ algorytmu kompensacyjnego na przykładzie wzorca schodkowego:

a – widok wzorca, b – obraz trójwymiarowy wzorca bez wykonania algorytmu kompensacji na obrazach źródłowych, c – obraz trójwymiarowy wzorca uwzględniający algorytm kompensacji

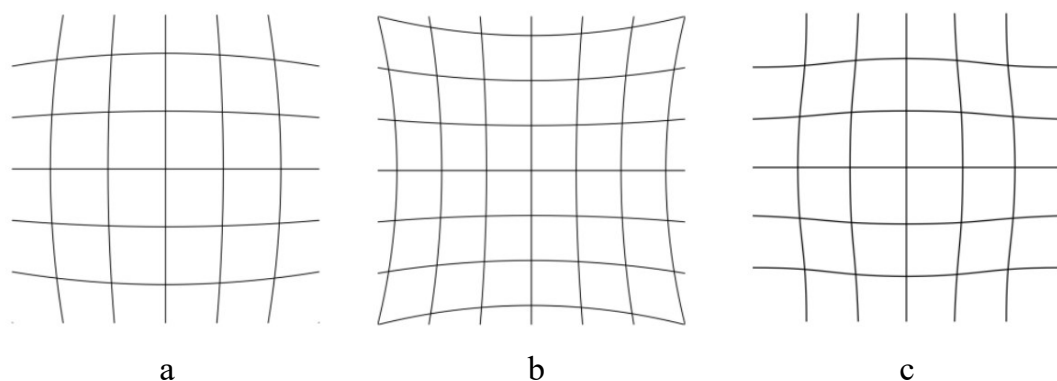
9.2 Aberracje optyczne

Aberracje optyczne to zniekształcenia obrazu powstające z powodu niedoskonałości występujące w układach optycznych. Źródła tego zjawiska związane są z projektowaniem soczewek oraz metodami ich produkcji. Na rysunku 9.9 został przedstawiony podział aberracji optycznych występujących w wizji maszynowej. Część z nich wpływa na rejestrowany obraz tylko w pewnych warunkach: wpływ aberracji chromatycznych widoczny jest przy stosowaniu oświetlaczy o szerokim zakresie spektrum, koma wpływa na obraz tylko przy oświetleniu kątowym. Kompensacja wpływu aberracji możliwa jest na poziomie sprzętowym przez odpowiednie projektowanie soczewek w obiektywie, stosowanie filtrów optycznych lub wykorzystanie powłok napyłanych na soczewki [10].



Rys. 9.9. Podział aberracji optycznych [141]

Jednym z rodzajów aberracji przedstawionych na rysunku 9.9 jest dystorsja. Zjawisko to związane jest ze zmianą powiększenia w poszczególnych obszarach obrazu, spowodowaną wadami soczewek. Dzieli się na kilka typów, z których najczęściej spotykanym jest dystorsja promieniowa. Anomalia ta powoduje promieniowe przemieszczenia punktów sceny na obrazie. Rysunek 9.10 prezentuje wpływ dystorsji na obraz siatki.

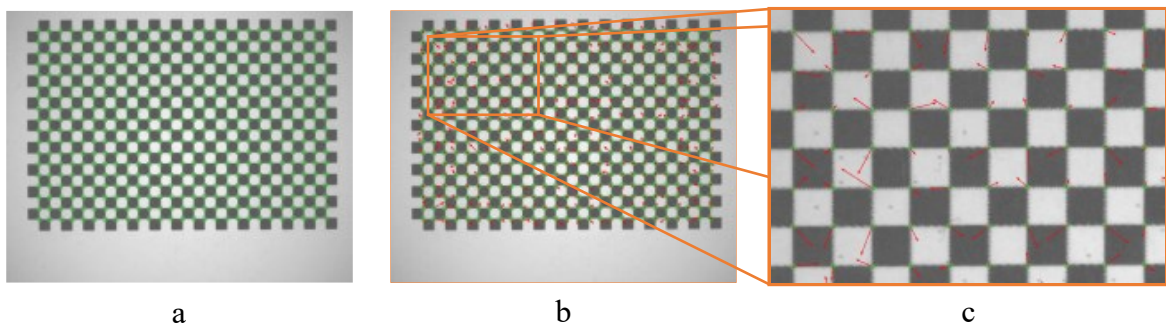


Rys. 9.10. Wpływ dystorsji na obraz regularnej siatki: a – dystorsja dodatnia (beczkowa), b – dystorsja ujemna (poduszkowa), c – złożona [142]

Głównym czynnikiem mającym wpływ na dystorsję układu optycznego jest ogniskowa obiektywu. Największy wpływ dystorsji na obraz otrzymywany jest dla obiektywów o małej wartości ogniskowej. Efekt ten nazywany jest „rybim okiem”.

Ze względu na wykorzystanie w pracy optyki sterowalnej wpływającej bezpośrednio na moc skupiającą, zasadne jest zbadanie wpływu zmian mocy skupiającej na błędy powodowane dystorsją.

W tym celu przeprowadzono doświadczenia eksperymentalne, w których wykorzystano wzorec szachownicy. Wzorec ten jest standardowo stosowany w celu kompensacji wpływu dystorsji na obraz (Rys. 9.11). Proces kompensacji opiera się na wykrywaniu narożników kwadratów szachownicy na obrazie źródłowym (Rys. 9.11a). Porównując wykrytą na obrazie siatkę punktów sprawdzane są przemieszczenia względem siatki regularnej. Na tej podstawie estymowany jest model kamery. Model ten zawiera informacje o ogniskowej oraz położeniu środka optycznego (*principal point*). Estymowany jest również model dystorsji. W zależności od zastosowanego obiektywu zakłada się różne modele dystorsji. W pracy wybrano wielomianowy model dystorsji stosowany dla obiektywów o ogniskowej powyżej 25 mm.

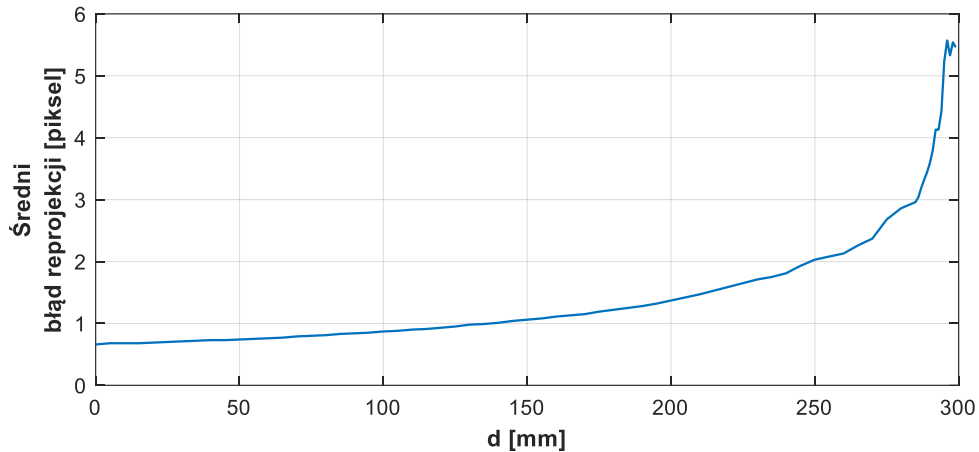


Rys. 9.11. Proces kompensacji dystorsji: a – wzorec szachownicy z zaznaczonymi wierzchołkami kwadratów, b – naniesione wektory błędów reprojektacji, c – powiększenie części obrazu b (długość wektorów zwiększono 25-krotnie dla zwiększenia czytelności)

Po estymacji modelu kamery oraz dystorsji możliwe jest wyznaczenie transformacji pozwalającej przeliczyć położenie punktów na obrazie. Na rysunku 9.11b zaznaczono wektory przemieszczeń koniecznych do kompensacji dystorsji dla tego obrazu. Proces ten nazywany jest reprojektacją obrazu, a długości wektorów błędem reprojektacji.

W badaniach własnych wykonano serię obrazów płaskiego wzorca szachownicy. Obrazy zebrano w pełnym zakresie pomiarowym dla osi Z, z interwałem 5 mm. Próbkowanie zagęszczono do 1 mm dla zakresu 0 – 15 mm. Seria zawiera obrazy ostre, dla których położenie płaszczyzny przedmiotowej pokrywało się z płaszczyzną szachownicy.

Rysunek 9.12 prezentuje wyniki otrzymane po dopasowaniu modeli dystorsji dla każdej z rozpatrywanych płaszczyzn. Średni błąd reprojektacji zależy od odległości, przy której wykonano obrazowanie (d). Największe wartości błędów występują dla $d = 300 \text{ mm}$ – pozycji, w której wzorzec umieszczony jest najbliżej systemu wizyjnego.



Rys. 9.12. Przebieg wartości średniego błędu reprojektacji w funkcji d

W procesie obrazowania metodą SFF zmiany dystorsji na poszczególnych poziomach stosu obrazów mają niekorzystny efekt na proces rekonstrukcji sceny. Zmiana wartości średniego błędu reprojektacji oznacza zmianę położenia punktów sceny na poszczególnych obrazach stosu, podobnie jak w zagadnieniu badawczym rozpatrywanym w rozdziale 9.1. Kwestia ta ma wpływ na etap selekcji płaszczyzny ostrej. Skala zniekształceń powodowana przez zmiany dystorsji jest jednak mniejsza niż w przypadku zmiany powiększenia podczas rejestracji stosu obrazów.

Wartość średniego błędu reprojektacji dla zakresu do 285 mm jest mniejsza niż 3 piksele. Stanowi to akceptowalną wartość, niższą niż średnica jądra estymatora ostrości dobrana w rozdziale 7. W pozostałej części zakresu pomiarowego ($d > 285 \text{ mm}$) wartość średniego błędu reprojektacji gwałtownie rośnie. Maksymalną wartość błędu reprojektacji wynoszącą 6 pikseli zaobserwowano na granicy zakresu pomiarowego.

Podsumowując, eksperymenty wykazały zmianę dystorsji podczas rejestracji stosu obrazów. Efekt ten dla większości zakresu pomiarowego $d \in \langle 0, 285 \rangle$ pozostaje akceptowalny, ze względu na niewielkie wartości błędów. Wpływ dystorsji w tym zakresie jest na

tylko znikomy, że możliwe jest przyjęcie uproszczonej kompensacji polegającej na transformacji całego stosu obrazów z wykorzystaniem pojedynczego modelu dystorsji, estymowanego dla środka zakresu pomiarowego. Dopuszczalną alternatywą jest również pominięcie korekty dystorsji w przypadku systemów, w których konieczna jest minimalizacja czasu rejestracji obrazu 3D.

W zakresie $d \in \langle 0, 285 \rangle$ większa wartość błędu reprojekcji ogranicza możliwości zastosowań metody w zadaniach pomiarowych. Wartość błędów reprojekcji do 6 pikseli nie wyklucza wykorzystania metody w zadaniach kontroli wykonania produktu. W takim przypadku może jednak wystąpić większa liczba zakłóceń i artefaktów na obrazie 3D.

W proponowanej konfiguracji sprzętowej zastosowano uproszczoną metodę kompensacji zmian dystorsji podczas akwizycji stosu obrazów. Przy projektowaniu analogicznych systemów w odmiennych konfiguracjach zaleca się weryfikację toru optycznego w celu oceny możliwości zastosowania podobnego uproszczenia. W przypadku istotnego wpływu dystorsji rekomenduje się kompensację zmian poprzez uwzględnienie zmian modelu dystorsji w procesie reprojekcji.

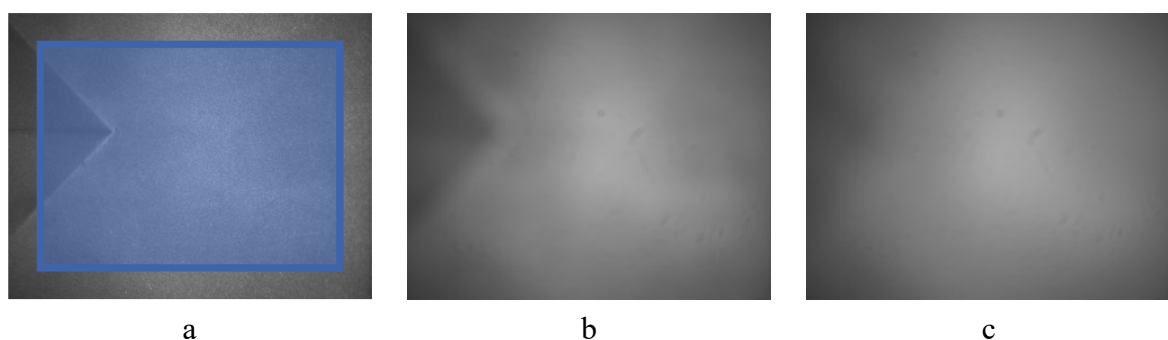
9.3 Zmiana natężenia oświetlenia powierzchni podczas rejestracji stosu obrazów

Podczas rejestracji stosu obrazów metodą klasyczną, tj. przez ruch systemu wizyjnego zmianie ulega konfiguracja oświetlacz – obiekt – kamera. Zmiana obejmuje zarówno zmianę kąta odbicia światła na obiekcie oraz zmianę drogi, jaką pokonuje promień światła między oświetlaczem i sensorem kamery. Założono, że unieruchomienie kamery w metodzie wykorzystującej optykę sterowalną wyeliminuje lub zminimalizuje ten efekt.

Należy jednak dodatkowo zweryfikować czy zmiana mocy skupiającej wprowadzana przez soczewkę płynną nie powoduje również zmian ilości światła docierającego na sensor kamery.

Zmiany intensywności pikseli podczas rejestracji stosu mają wpływ na estymację oraz porównanie i selekcję płaszczyzny ostrej na podstawie wartości estymatora. Przy braku odpowiedniej kompensacji zmian intensywności mogą wystąpić błędy w estymacji głębi i artefakty na obrazie 3D.

W ramach badań zarejestrowano stosy obrazów powierzchni i przeprowadzono analizę zmian intensywności (Rys. 9.13) Analiza porównawcza intensywności w poszczególnych punktach okazała się niewystarczająco wiarygodna z powodu efektu rozmycia oraz zmian powiększenia. Zaproponowano porównanie poprzez wyznaczenie średniej intensywności w obszarach ROI (Rys. 9.13a). Uśrednienie w obszarach ROI minimalizowało również wpływ tekstury powierzchni.



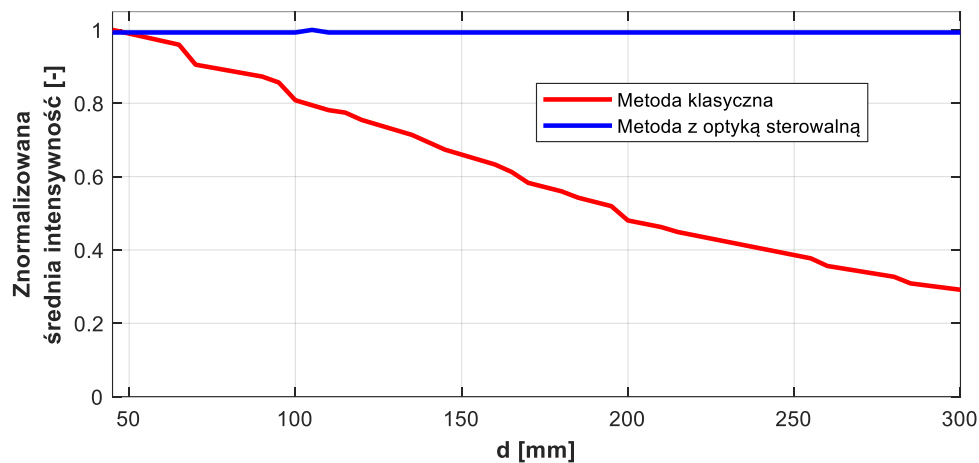
Rys. 9.13. Wybrane elementy stosu obrazów:

a – obraz ostry z z zaznaczonym obszarem ROI, b, c – obrazy nieostre

W ramach badań wykonano analizę stosu obrazów zarejestrowanych w pełnym zakresie obrazowania, tj. przy przemieszczeniu płaszczyzny przedmiotowej o 300mm. Dla porównania, identyczny stos obrazów zarejestrowano z wykorzystaniem metody klasycznej. Wartość wyznaczonych intensywności średnich znormalizowano.

Rysunek 9.14 prezentuje średnią intensywność obrazu w funkcji położenia płaszczyzny przedmiotowej. Wyniki jednoznacznie wskazują na brak zmian średniej intensywności obrazów podczas rejestracji stosu obrazów metodą wykorzystującą optykę sterowalną.

W przypadku wyników dla stosu wykonanego metodą klasyczną widoczny jest znaczny wpływ przemieszczenia systemu wizyjnego na spadek intensywność pikseli na obrazie. Dla przemieszczenia 250 mm względna zmiana intensywności wynosiła około 70%.



Rys. 9.14. Zestawienie średniej intensywności obrazu w stosie w funkcji położenia płaszczyzny przedmiotowej dla metody klasycznej i zmodyfikowanej wykorzystującej soczewkę płynną

Podsumowując, rezultaty badań wskazują na brak zależności między zmianą mocy skupiającej soczewki płynnej a zmianami intensywności pikseli w stosie obrazów. Modyfikacja metody klasycznej przez wprowadzenie płynnej soczewki pozwoliła na wyeliminowanie tego niepożądanego efektu. Uzyskane wyniki potwierdzają brak konieczności stosowania algorytmu kompensacji zmian intensywności pikseli na obrazach zarejestrowanych w formie stosu.

9.4 Mapa ufności

W celu oceny wiarygodności rekonstrukcji zaproponowano implementację mapy ufności. Odzwierciedla ona poziom pewności estymowanych wartości głębokości każdego punktu obrazu 3D. Mapa ufności generowana jest dla każdego rejestrowanego obrazu 3D i pozwala na selekcję punktów, dla których istnieje podejrzenie niepoprawnego odwzorowania sceny.

W pracy nie udało się zaproponować algorytmu kompensującego efekt zbyt dużego rozmycia krawędzi prezentowanego na rysunku 4.6, bezpośrednio na poziomie analizy stosu obrazów.

Zaproponowano inne rozwiązanie, w którym wykorzystano mapę ufności do filtracji niepoprawnie wyznaczonych punktów na zrekonstruowanym obrazie 3D. Wprowadzenie mapy ufności jest zatem odpowiedzią na zadanie badawcze **ZB_24** związane z wpływem znacznego rozmycia krawędzi podczas rejestracji stosu obrazów.

Punkty o niskim współczynniku ufności mogą zostać odrzucone lub poddane dodatkowej filtracji. Odrzucenie punktów wiąże się z tworzeniem obszarów na obrazie 3D, w których brakuje informacji o głębokości. Filtracja pozwala natomiast na wyznaczenie nowych współrzędnych dla punktów o niskim poziomie ufności. Współrzędne wyznaczone są wówczas na podstawie informacji z jego sąsiedztwa, z wykorzystaniem średniej lub mediany.

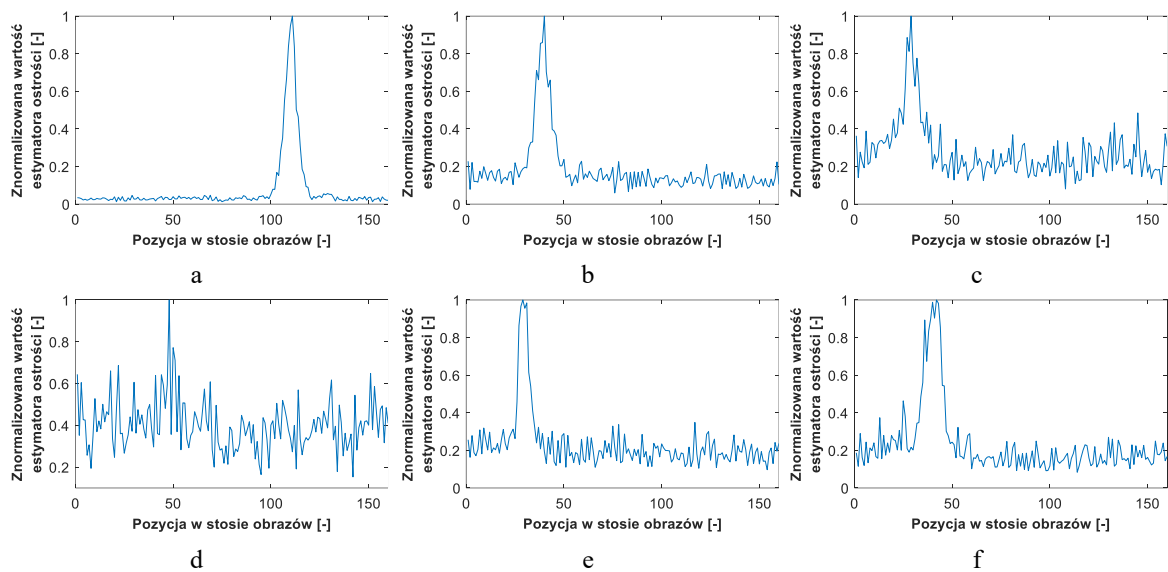
Pewność estymacji informacji przestrzennych można oceniać na podstawie:

- krzywej ostrości – podejście związane z procesem budowy obrazu 3D w metodzie SFF,
- lokalnych zmian wysokości na obrazie 3D – podejście uniwersalne, stosowane do dowolnej metody obrazowania trójwymiarowego.

Pierwsza z metod pozwala na obliczenie wskaźnika ufności dla każdego punktu obrazu na podstawie wektora W , zawierającego wartości estymatora ostrości. W zależności od struktury geometrycznej obrazowanej powierzchni, tekstury oraz parametrów obrazowania krzywa ostrości może przyjmować różny kształt.

Rysunek 9.15 prezentuje wybrane kształty krzywych ostrości. Rysunek 9.15a zawiera idealny przypadek o wysokim stosunku sygnału do szumu. Zauważalny jest jeden wyraźny, ostry pik, gdzie ostrość osiąga maksimum. Widoczny jest również bardzo niski poziom wartości estymatora ostrości dla tła – w okolicach zera.

Rysunki 9.15b oraz 9.15c to przypadki z rosnącym poziomem szumu. Występują tam wielokrotne maksima lokalne związane z szumami wysokoczęstotliwościowymi. Krzywa jest bardziej nieregularna, jednak wciąż wyraźne jest maksimum globalne o największej amplitudzie. Poziom ufności dla tego punktu powinien być mniejszy. Skrajny przypadek występuje na rysunku 9.15d. Stosunek poziomu szumu do sygnału nie pozwala na pewność poprawnej selekcji płaszczyzny ostrej, co przekłada się na estymację głębi. Rysunki 9.15e oraz 9.15f prezentują krzywe z pikiem ostrości o większej szerokości. Szerokość piku ostrości może być związana z większą głębią ostrości. Widoczne są również szумы w okolicach piku ostrości.



Rys. 9.15. Wybrane przebiegi krzywej ostrości: a-d – zmiana poziomu szumu na krzywej, e-f – zmiana szerokości piku

Na podstawie analizy kształtów krzywych ostrości zaproponowano algorytmy generowania mapy ufności:

- szerokość piku ostrości,
- stosunek amplitudy piku do średniej tła,

- stosunek amplitudy piksu do odchylenia standardowego tła.

Każdy z wymienionych algorytmów generowania mapy ufności umożliwia detekcję różnych zakłóceń. Szerokość piksu ostrości odpowiada przypadkom krzywych z rysunku 9.15e i 9.15f. Jest to dobry wskaźnik przy obiektach o słabym kontraście, jednak przy występowaniu szumów wysokoczęstotliwościowych o wysokiej amplitudzie wskazania mogą być błędne.

Stosunek amplitudy do średniej tła oraz odchylenia standardowego tła pozwalają na uwzględnienie kształtu krzywej ostrości poza pikiem. Porównanie do średniej jest prostszą i szybszą metodą. Uśrednianie nie uwzględnia jednak występowania szumów wysokoczęstotliwościowych, dlatego zaproponowany został również algorytm porównujący amplitudę piksu do odchylenia standardowego tła.

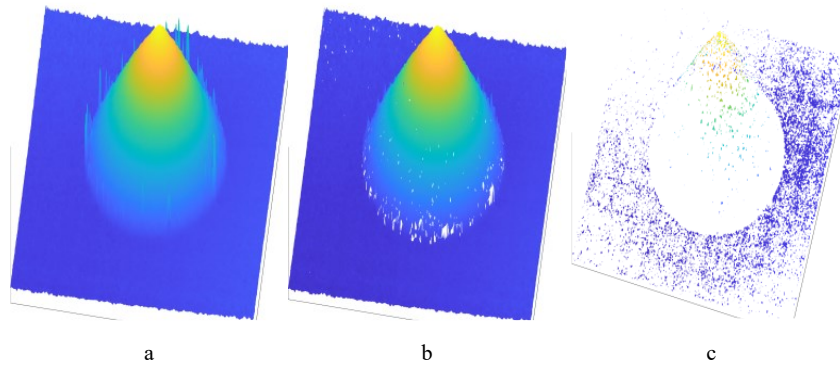
Inne podejście to generowanie mapy ufności bezpośrednio na podstawie obrazu trójwymiarowego. W tym celu wykorzystywane są informacje przestrzenne oraz metody statystyczne, takie jak:

- lokalna ciągłość – porównanie, czy w sąsiedztwie znajdują się punkty o zbliżonej wysokości,
- gradient wysokości – wskaźnik sprawdzający amplitudę zmian wysokości w stosunku do otoczenia,
- lokalna wariancja wysokości – wskaźnik odwrotnie proporcjonalny do wariancji wysokości w sąsiedztwie.

Metody te zależne są od przyjętego rozmiaru sąsiedztwa – rozmiaru jądra, dla którego wykonywane są obliczenia. Wrażliwe są również na naturalne krawędzie obiektu.

Wybór odpowiedniego algorytmu spośród zaproponowanych zależy od rodzaju obrazowanego obiektu oraz charakteru szumów obecnych w obrazie 3D. Można także łączyć mapy ufności uzyskane różnymi metodami, aby poprawić skuteczność filtracji.

Rysunek 9.16 prezentuje zastosowanie mapy ufności do filtracji szumów wysokoczęstotliwościowych przy podstawie stożka. Niewłaściwy dobór algorytmów mapy wysokości oraz wartości progowych do obiektu może skutkować również stratą informacji (Rys. 9.16c).



Rys. 9.16. Wykorzystanie mapy ufności do filtracji obrazu 3D:
a – obraz surowy, b – odfiltrowane szumy, c – zbyt intensywna filtracja

10 Weryfikacja metody obrazowania

Metody obrazowania trójwymiarowego omówione w rozdziale 3 osiągają zbliżoną funkcjonalność w zakresie parametrów obrazowania oraz realizacji zadań kontrolno-pomiarowych. Systemy oparte na triangulacji laserowej, jak i stereowizji wykorzystującej światło strukturalne, dostępne są w postaci rozwiązań komercyjnych. Systemy takie można dobrać do potrzeb większości standardowych aplikacji przemysłowych. Realizując badania przemysłowe zauważono jednak wady obu metod, szczególnie w zakresie występowania okluzji na obrazach 3D. Opracowana i opisana w pracy metoda SFF powstała między innymi w odpowiedzi na zapotrzebowanie przemysłowe dotyczące realizacji wybranych zadań kontrolnych i pomiarowych. W rozdziale wskazano i omówiono wybrane zadania obejmujące przykłady obrazowania i kontroli geometrii otworu.

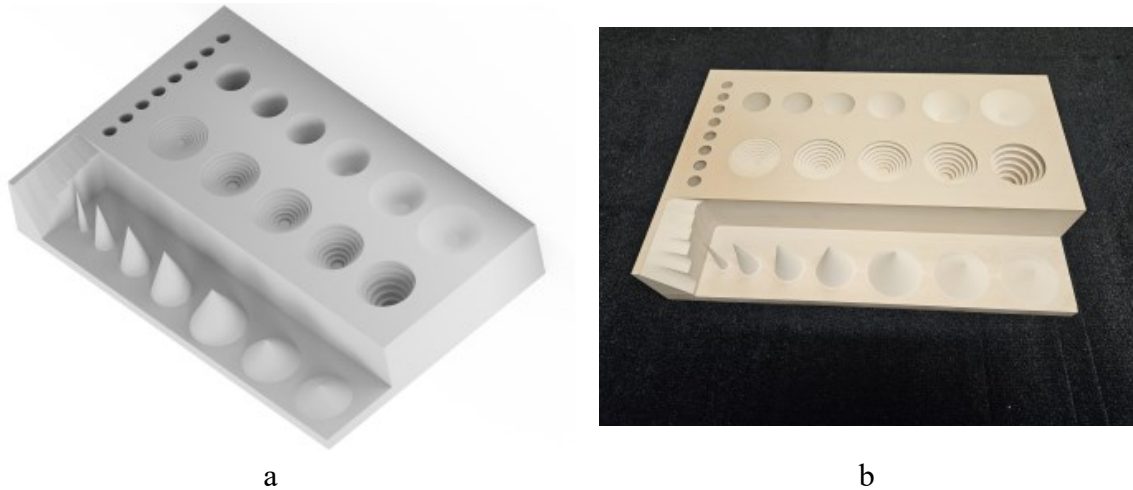
10.1 Analiza geometrii otworu

Opracowaną metodę SFF porównano z komercyjnymi skanerami przemysłowym w zadaniu obrazowania otworów kształtowych. Do pomiarów porównawczych wykorzystano dwa dostępne na rynku skanery pomiarowe przystosowane do pracy w warunkach przemysłowych:

- SICK Trispector 1030 - skaner wykorzystujący metodę triangulacji laserowej (**MTL**) z laserem ustawionym pod kątem 45° względem osi kamery, umożliwiający obrazowanie z rozdzielczością przestrzenną $\Delta X = \Delta Y = 220 \mu\text{m}$,
- Photoneo PhoXi 3D Scanner S – skaner wykorzystujący metodę oświetlenia strukturalnego (**MOS**) z projektorem ustawionym pod kątem 47.5° względem osi kamery, umożliwiający obrazowanie z rozdzielczością przestrzenną $\Delta X = \Delta Y = 200 \mu\text{m}$.

Badania przedstawione w niniejszym rozdziale przeprowadzono na autorskim projekcie wzorca pomiarowego. Wzorzec zaprojektowano pod kątem realizacji obrazowania w

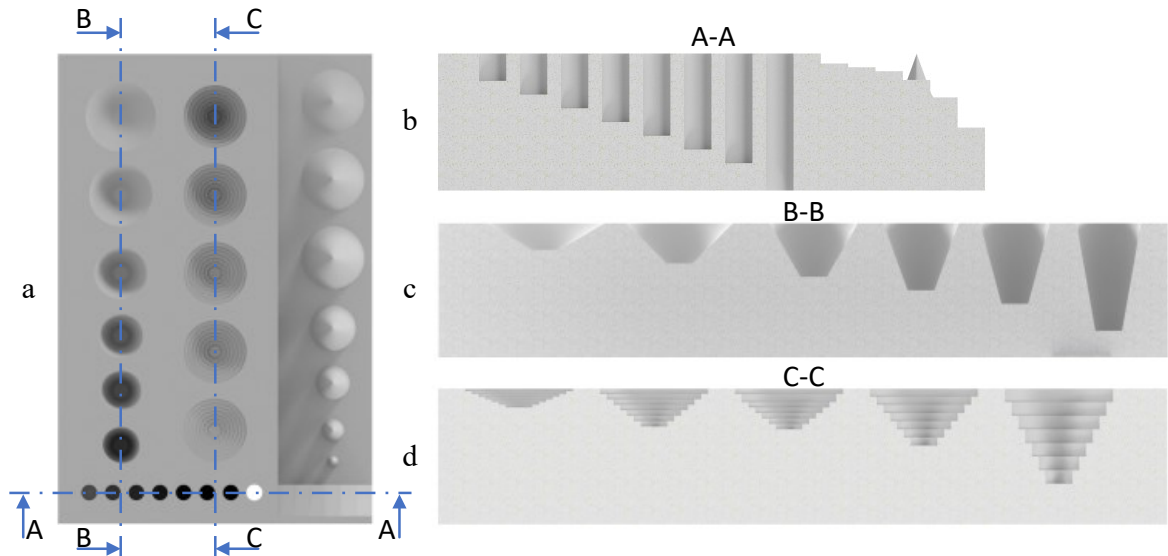
trybie porównawczym dla trzech wskazanych metod. Wzorzec wykonano z materiału Necuron, który jest poliuretanowym tworzywem sztucznym o wysokiej porowatości (Rys. 10.1). Struktura ta determinuje specyficzny sposób oddziaływania materiału ze światłem, w którym dominującym zjawiskiem jest rozproszenie światła wykorzystanego do oświetlenia. Jednocześnie materiał znacząco ogranicza występowanie odbić lustrzanych.



Rys. 10.1. Zaprojektowany dedykowany wzorzec geometrii otworów:
a – projekt CAD, b – wykonanie w materiale Necuron

Wzorzec zawiera serie otworów o zmiennych parametrach geometrycznych. Rysunek 10.2 prezentuje projekt wzorca wraz z przekrojami przez poszczególne otwory. Wzorzec zawiera trzy typy geometrii otworów:

- otwór walcowy – otwór o cylindrycznym kształcie i stałej średnicy na całej długości ($\varnothing = 10\text{mm}$); wzorzec zawiera serię otworów o zmiennej głębokości od 10 mm do otworu przelotowego (Rys. 10.2b),
- otwór stożkowy – otwór o zmiennej średnicy, zwężający się wzdłuż osi Z, na kształt stożka; wzorzec zawiera serię otworów o zmiennym kącie zwężenia w zakresie $10 - 60^\circ$ (Rys. 10.2c),
- otwór schodkowy – otwór składający się z siedmiu segmentów o różnych średnicach w zakresie 10 – 40 mm, tworzących schodkowe przejścia; wzorzec zawiera serię otworów o zmiennej wysokości schodka w zakresie 1 – 5 mm (Rys. 10.2d).



Rys. 10.2. Poglądowy model wzorca otworów o różnej geometrii: a – oznaczenie przekrojów, b – przekrój A-A (otwory walcowe), c – przekrój B-B (otwory stożkowe), d – przekrój C-C (otwory schodkowe)

W celu porównania wyników obrazowania zestawiono bezpośrednio zarejestrowane obrazy trójwymiarowe, profile wysokości odpowiadające przekrojom przez otwory oraz wyznaczono współczynnik charakteryzujący stopień występowania okluzji. Współczynnik W_O zdefiniowano na podstawie liczby brakujących punktów obrazu 3D (równanie 10.1).

$$W_O = \frac{L_N}{L_N + L_P} \cdot 100\% \quad (10.1)$$

gdzie:

W_O – współczynnik poziomu okluzji na obrazie,

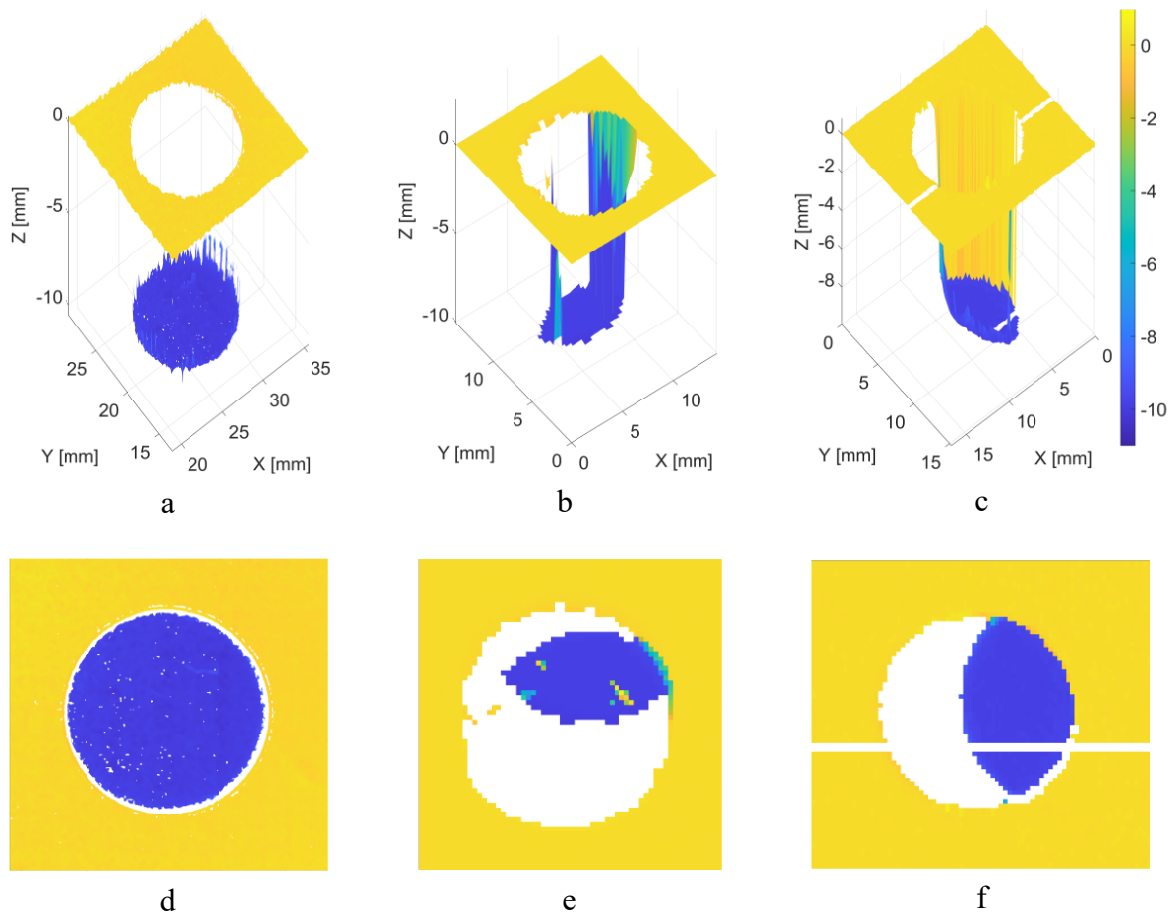
L_P – liczba poprawnych punktów obrazu,

L_N – liczba brakujących punktów obrazu.

Poniżej przedstawiono wyniki dla trzech wybranych otworów:

- otwór walcowy o średnicy równej 10 mm i głębokości równej 10 mm,
- otwór stożkowy o kącie zwężenia 10° i głębokości równej 40 mm,
- otwór schodkowy o wysokości pojedynczego schodka 5mm i całkowitej głębokości równej 35 mm.

Rysunek 10.3 prezentuje wyniki obrazowania dla otworu walcowego o głębokości równiej średnicy otworu. Barwa punktu powiązana została z głębokością zgodnie z podziałką znajdującą się po prawej stronie rysunku 10.3. Zarówno metoda MOS (Rys. 10.3b), jak i MTL (Rys. 10.3c) zarejestrowały obraz o znacznych brakach w regionie otworu. Obraz zarejestrowany metodą SFF posiada niewielkie braki w obrazie 3D, które spowodowane są filtracją obrazu z wykorzystaniem mapy ufności.



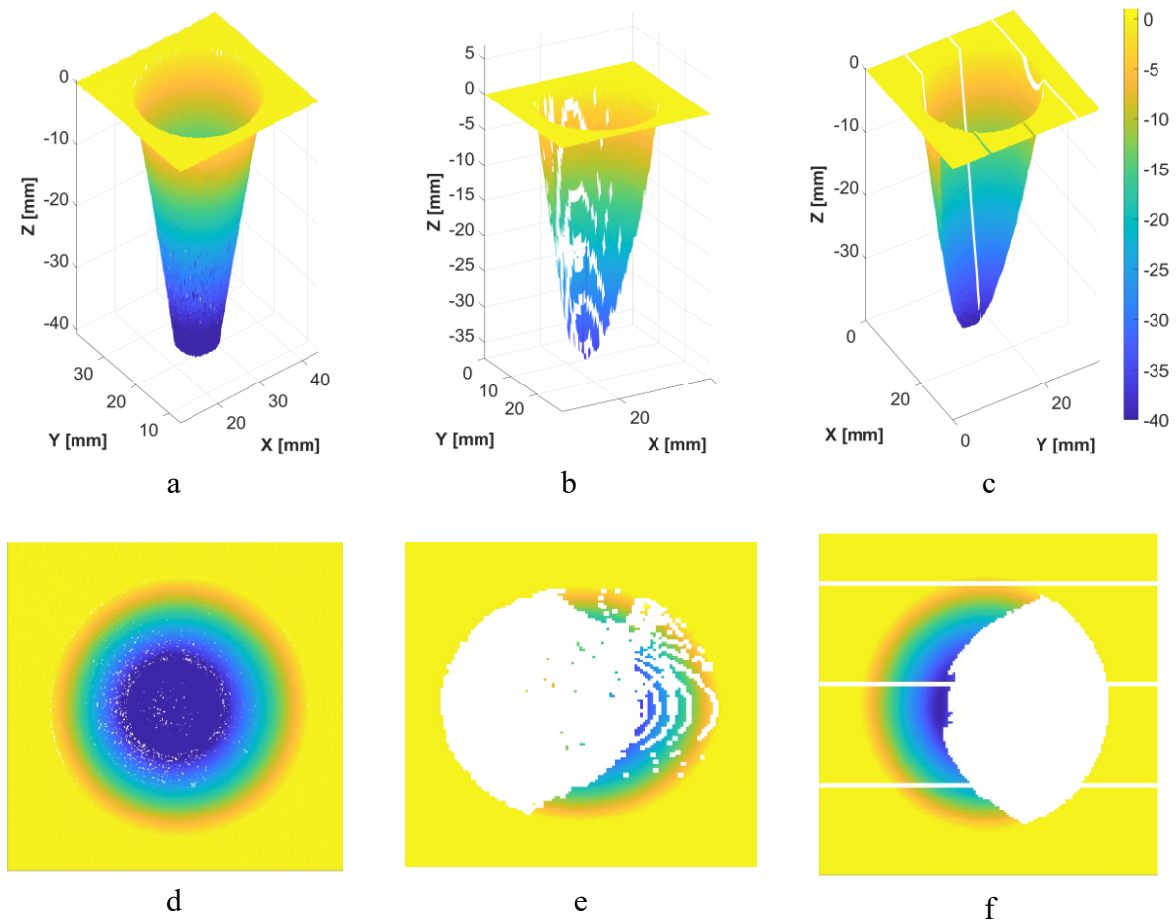
Rys. 10.3. Obrazy 3D otworu walcowego zarejestrowane metodami:

a, d – SFF, b, e – MOS, c, f – MTL. Rysunki d – f prezentują obrazy otworów w widoku z góry

Dla otworów walcowych o większych głębokościach metody MOS oraz MTL zwracały znacząco gorsze wyniki. Obrazy te nie zawierały punktów opisujących wnętrze otworu. Związane jest to z kątem ustawienia elementów torów optycznych wykorzystywanych w skanerach triangulacyjnych i stereowizyjnych.

Zmodyfikowana metoda SFF zwracała poprawne wyniki przy zapewnieniu wystarczającego oświetlenia, przekładającego się na kontrast w stosie obrazów (rozdział 7.5.4).

Rysunek 10.4 prezentuje wyniki obrazowania otworu stożkowego o kącie zwężenia równym 10° . Całkowita głębokość tego otworu to 40 mm przy średnicy na powierzchni wzorca równej 24.1 mm. Tylko obraz wykonany zmodyfikowaną metodą SFF zawiera dno otworu (Rys. 10.4d). Obrazy 3D zarejestrowane metodami MOS oraz MTL zawierają jedynie część powierzchni ścianki otworu (Rys. 10.4b,c). Obraz zarejestrowany metodą MOS zawiera również pojedyncze punkty w obszarze dna otworu, jednak ich wartości głębokości odpowiadają zakresowi ścianki (Rys. 10.4e). Są to zakłócenia spowodowane prawdopodobnie algorytmami filtracji urządzenia.



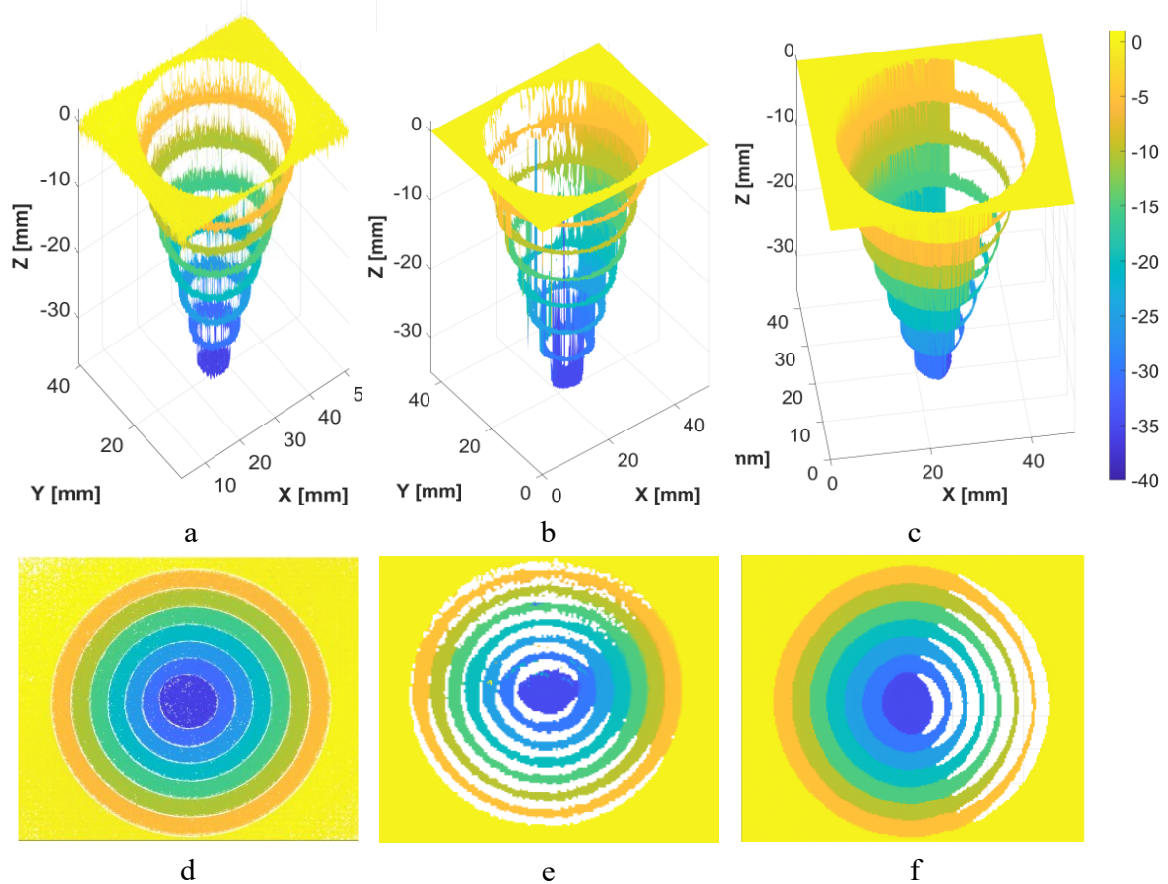
Rys. 10.4. Obrazy 3D otworu stożkowego zarejestrowane metodami:
a, d – SFF, b, e – MOS, c, f – MTL. Rysunki d – f prezentują obrazy otworów w widoku z góry

Dla pozostałych otworów stożkowych o mniejszych wartościach kąta zwężenia metody obrazowania typu MOS oraz MTL zwracają lepsze wyniki. Wszystkie uwzględnione metody obrazowania osiągnęły porównywalne wartości współczynnika poziomu okluzji dla otworu o kącie zwężenia równym 30° i głębokości równej 20 mm.

Rysunek 10.5 prezentuje wyniki obrazowania otworu schodkowego o wysokości schodka równej 5 mm. Całkowita głębokość tego otworu to 35 mm przy największej średnicy mierzonej na powierzchni wzorca równej 40 mm.

Metody MOS oraz MTL rejestrują obrazy z okluzjami i jednocześnie obie metody tylko częściowo rejestrują punkty opisujące dno otworu (Rys. 10.5b, c). Braki w opisie powierzchni widoczne są również w pobliżu krawędzi. Zauważalna jest również zależność pomiędzy ustawieniem obrazowanego otworu względem skanera oraz brakami punktów opisujących powierzchnie występującymi w obrazie 3D (Rys. 10.5e, f).

Metoda SFF umożliwia obrazowanie tego typu otworów z najmniejszą liczbą brakujących punktów na obrazie trójwymiarowym (Rys. 10.5a). Widoczny jest jedynie niewielki ubytek punktów w pobliżu krawędzi. Punkty te zostały odfiltrowane przez zastosowany w obrazowaniu algorytm oceny mapy ufności.



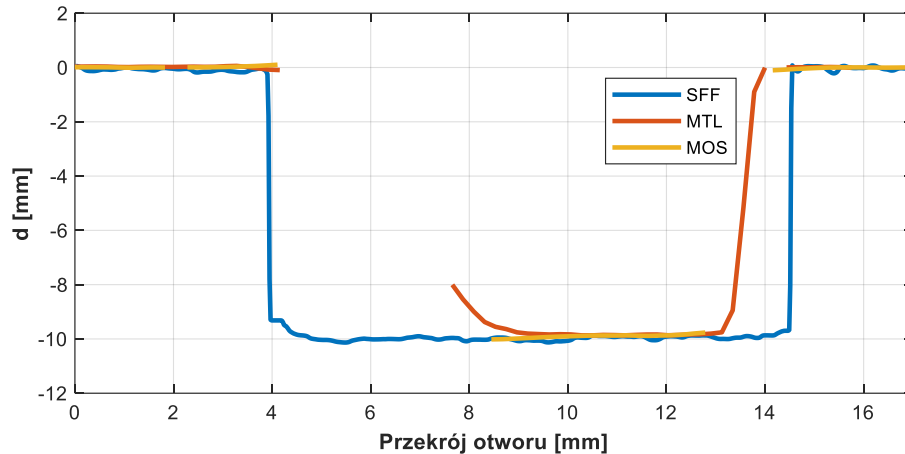
Rys. 10.5. Obrazy 3D otworu schodkowego otrzymane różnymi metodami obrazowania:
a, d – SFF, b, e – MOS, c, f – MTL, Rysunki d – f prezentują obrazy otworów w widoku z góry

Dla pozostałych otworów stożkowych o mniejszych wartościach schodka metody MOS oraz MTL zwracały lepsze wyniki. Wszystkie uwzględnione metody obrazowania osiągnęły porównywalne wartości współczynnika poziomu okluzji dla otworu o wysokości pojedynczego schodka równej 1 mm i głębokości całkowitej równej 7 mm.

Kolejne rysunki zawierają profile wysokości przekrojów otworów. Pozwalają one na porównanie również wartości wysokości punktów, kształtu krawędzi oraz miejsc występowania okluzji. Okluzje na rysunkach reprezentowane są jako nieciągłości wykresów.

Rysunek 10.6 prezentuje przekroje otworu walcowego wyznaczone na podstawie obrazów 3D z rysunku 10.3. Profil wysokości odpowiadający MTL posiada nieciągłość dla

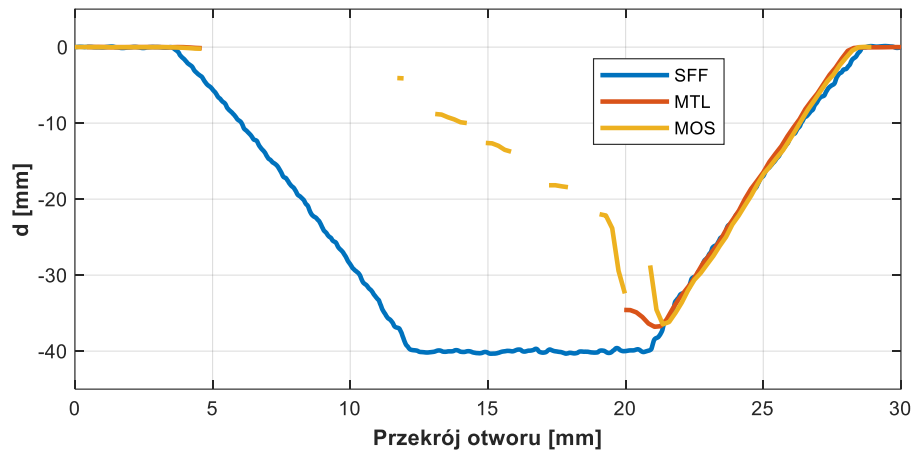
części otworu. Jedna z krawędzi została zarejestrowana, jednak jest przesunięta oraz pochylona, widoczny jest również skok wysokości na środku dna otworu. Błędy te mogą być spowodowane rozproszeniem linii lasera na krawędzi otworu oraz jej zniekształceniem wewnątrz otworu. Profil wysokości dla MOS posiada dwie nieciągłości przy obu krawędziach otworu.



Rys. 10.6. Profile wysokości przekroju otworu walcowego wykonane na podstawie obrazów z rysunku 10.3

Rysunek 10.7 prezentuje przekroje otworu stożkowego wyznaczone na podstawie obrazów 3D z rysunku 10.4. Tylko profil odpowiadający SFF osiąga wartość -40 mm dna otworu. Metoda MTL pozwala na obrazowanie pochyłej ścianki otworu, jednak zwraca błędny odczyt wysokości przed osiągnięciem dna otworu. Pozostała część otworu nie zawiera punktów.

Metoda typu MOS również poprawnie odwzorowuje tylko część pochyłej ścianki otworu. Dno otworu w większości nie zawiera punktów opisujących jego powierzchnię. Dodatkowo obserwowane jest działanie algorytmów filtracyjnych, które powodują powstawanie fałszywych odczytów w obszarze dna otworu.

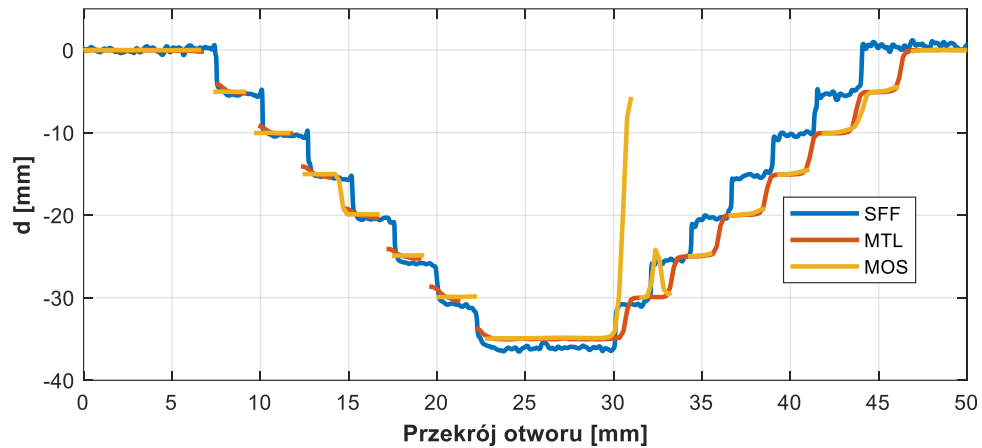


Rys. 10.7. Profile wysokości przekroju otworu stożkowego wykonane na podstawie obrazów z rysunku 10.4

Rysunek 10.8 prezentuje przekroje otworu schodkowego wyznaczone na podstawie obrazów 3D z rysunku 10.5. W przypadku otworu schodkowego każda metoda rejestruje punkty dna. Profil odpowiadający SFF odwzorowuje wszystkie schodki otworu, jednak widoczne są zakłócenia na ich krawędziach.

Odwzorowanie schodków metodą MTL jest zależne od kierunku przemieszczania obiektu podczas skanowania. Dla kierunku odpowiadającego prawej stronie przekroju widoczne są pochylone ścianki otworu oraz zaokrąglone krawędzie schodów. Krawędzie znajdujące się z lewej strony profilu są natomiast nieciągłe, a ich długość jest skrócona w stosunku do strony prawej.

Metoda obrazowania typu MOS zwraca podobne wyniki jak metoda MTL. W przypadku obrazów zarejestrowanych tą metodą obserwowane są dodatkowe zakłócenia widoczne na krawędziach i wskazujące fałszywe skoki wysokości.



Rys. 10.8. Profile wysokości przekroju otworu schodkowego
wykonane na podstawie obrazów z rysunku 10.5

Parametrem pozwalającym na porównanie zaproponowanych metod obrazowania jest współczynnik poziomu okluzji na obrazie W_O . Współczynnik obliczony został na podstawie obrazów z rysunków 10.3, 10.4 oraz 10.5 zawierających otwory oraz część otaczającej je powierzchni.

Tabela 10.1 prezentuje otrzymane wyniki. Najmniejsze wartości otrzymane zostały dla metody SFF. W jej przypadku brakujące punkty obrazu nie są skutkiem przysłonięcia punktów sceny, a efektem usunięcia części punktów sceny przez mapę ufnosci. Wartości dla pozostałych metod są kilkukrotnie większe. Warto jednak zauważyć, że wartość wskaźnika W_O jest zredukowana przez uwzględnienie w obliczeniach również płaskiej powierzchni otaczającej otwory.

Tabela 10.1. Zestawienie wartości poziomu występowania okluzji na obrazach 3D

	<i>SFF</i>	<i>MOS</i>	<i>MTL</i>
<i>Otwór walcowy</i>	2.9%	21.7%	13.3%
<i>Otwór stożkowy</i>	0.3%	23.4%	23.7%
<i>Otwór schodkowy</i>	4.0%	12.3%	9.1%

11 Podsumowanie

Przedmiotem niniejszej pracy była modyfikacja metody obrazowania trójwymiarowego SFF z wykorzystaniem optyki sterowalnej. Celem tej modyfikacji było rozszerzenie zakresu zastosowania oraz dostosowanie metody SFF do wykorzystania w systemach kontrolno-pomiarowych przeznaczonych do pracy w warunkach przemysłowych.

Przyjęte cele zostały zrealizowane w planowanym zakresie. Zaprojektowano, zbudowano oraz uruchomiono stanowisko umożliwiające rejestrację stosu obrazów podczas zmiany położenia płaszczyzny przedmiotowej. Stanowisko umożliwiło zmianę położenia płaszczyzny przedmiotowej z wykorzystaniem optyki sterowalnej w formie soczewki płynnej wykonanej w technologii elastycznej membrany. Wykorzystanie optyki sterowalnej pozwoliło na eliminację układów napędowych przy rejestracji stosu obrazów. Umożliwiło to eliminację zakłóceń w postaci drgań mechanicznych generowanych przez układ napędowy. Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość znacznego skrócenia czasu rejestracji stosu obrazów w porównaniu do klasycznej metody SFF.

Dla znormalizowanego stosu obrazów przeprowadzono badania dotyczące analizy ostrości każdego z pikseli stosu obrazów. Porównano wybraną grupę estymatorów używanych do oceny ostrości, zaproponowano metodę ich oceny oraz wskazano estymatory do zastosowania w modyfikacji metody SFF. W kolejnym etapie badań zaproponowano algorytm selekcji płaszczyzny ostrej dla punktu na podstawie wartości estymatora ostrości. Badania uwzględniały wpływ parametrów estymatora oraz zakłóceń środowiskowych.

W ramach prac badawczych opracowano i przetestowano algorytmy kompensacji wpływu zakłóceń na obraz 3D. Jednym z nich jest korekta negatywnego wpływu zmiany powiększenia obrazu wynikającego ze zmiany mocy skupiającej soczewki. Zaproponowano metodę wyznaczenia charakterystyki zmiany powiększenia oraz metodę wyznaczania rzeczywistego położenia osi optycznej na sensorze. Wyniki wykorzystano w opracowaniu algorytmu filtracji wstępnej stosu obrazów 2D wprowadzonej przed etapem estymacji ostrości, pozwalając na poprawę jakości odwzorowania sceny trójwymiarowej.

Badania uwzględniały również ocenę wpływu aberracji optycznych występujących w torze optycznym. Wyniki wskazały brak konieczności dynamicznej kompensacji dystorsji ze względu na znikome wartości przesunięć w przyjętej konfiguracji sprzętowej.

Opracowane rozwiązanie pozwoliło na znaczące rozszerzenie parametrów obrazowania z wykorzystaniem metody SFF, a co za tym idzie rozszerzenie zakresu zadań kontrolnych, które mogą być zrealizowane z jej wykorzystaniem. Dla zaproponowanej konfiguracji sprzętowej osiągnięto kilkukrotne rozszerzenie FOV w stosunku do przytoczonych zastosowań literaturowych. Konfiguracja zapewnia zwieszenie rozdzielczości przestrzennych oraz rozdzielczości obrazu 3D.

Optyka sterowalna w postaci soczewki płynnej umożliwia integrację z dowolnym obiektywem stałogniskowym i sensorem stosowanymi w systemach wizyjnych, co pozwala na dostosowanie parametrów obrazowania do wymagań aplikacyjnych i oczekiwanych parametrów obrazu 3D.

Czas akwizycji obrazu 3D zależny jest od przyjętych parametrów obrazu 3D, tj. rozdzielczości i zakresu obrazowania. W zaproponowanej konfiguracji sprzętowej wąskim gardłem jest transmisja danych z kamery ograniczająca czas akwizycji do kilkudziesięciu sekund. Dobór sensora o mniejszej rozdzielczości, interfejsu komunikacyjnego o większej prędkości transmisji lub ograniczenie zakresu obrazowania mogą zredukować tą wartość.

Realizacja zagadnień badawczych: doboru metody przemieszczenie płaszczyzny przedmiotowej (ZB_11), estymatora ostrości (ZB_31) oraz algorytmu selekcji płaszczyzny ostrej (ZB_41) pozwala na potwierdzenie tezy I rozprawy doktorskiej:

- I. Zastosowanie optyki sterowalnej oraz autorskich algorytmów rekonstrukcji obrazu w metodzie SFF pozwala na zmianę sposobu rejestracji stosu obrazów 2D oraz pozwala na rekonstrukcję sceny 3D.*

Pozostałe sześć zagadnień badawczych dotyczy parametrów obrazowania oraz wpływu wprowadzonych modyfikacji na jakość odwzorowania sceny przez obraz trójwymiarowy. Wyniki otrzymane w rozdziale 8 oraz wynikający z nich rozmiar przestrzeni roboczej (Rys. 6.6, strona 91) wskazują na znaczne rozszerzenie parametrów obrazowania. Weryfikacja metody na przykładzie obrazowania otworów kształtowych w rozdziale 10.1 pozwala na potwierdzenie tezy II rozprawy doktorskiej:

- II. Wprowadzenie optyki sterowalnej do metody SFF pozwala na rozszerzenie zakresu parametrów obrazowania co umożliwi rozszerzenie zakresu możliwych do realizacji zadań kontrolnych i pomiarowych.*

Wyniki badań prezentowane w pracy potwierdziły możliwość praktycznego zastosowania metody obrazowania SFF w systemach wizyjnych stosowanych do realizacji zadań kontroli jakości wykonania. Opracowana metoda uzyskała poziom gotowości technologicznej pozwalającej na realizację przemysłowych zadań kontrolnych.

Kolejne prace powinny być ukierunkowane na zwiększanie rozdzielczości pomiarowych oraz na rozwoju szybkich algorytmów filtracji obrazu trójwymiarowego co pozwoliłoby na zwiększenie poziomu gotowości technologicznej do realizacji zadań pomiarowych bezpośrednio na liniach produkcyjnych.

Do najważniejszych wniosków użytkowych należy zaliczyć przeprowadzenie analizy jakości działania estymatorów ostrości oraz opracowanie własnego rozwiązania opartego na algorytmie CoG. Opracowano i zweryfikowano algorytmy kompensacji zmian powiększenia wynikający z charakterystyki pracy soczewki płynnej oraz algorytm kalibracji obrazu trójwymiarowego.

Najważniejszym wnioskiem poznawczym wynikającym z przeprowadzonych badań jest identyfikacja zadań, które należy wykonać w procesie budowy toru optycznego wykorzystującego soczewki płynne. Przeprowadzone badania umożliwiły również identyfikację źródeł błędów wpływających na jakość rejestrowanego obrazu trójwymiarowego dla systemów wykorzystujących zmodyfikowaną metodę obrazowania SFF. Doświadczenia zebrane podczas badań można wykorzystać przy budowie torów optycznych projektowanych pod specjalizowane systemy optyczne stosowane w automatyzacji procesów kontrolnych i pomiarowych.

11.1 Kierunki dalszych badań

Problematyka podjęta w niniejszej pracy stanowi punkt wyjścia dla dalszych badań przemysłowych i rozwojowych, zmierzających do udoskonalenia technologii obrazowania SFF. Kwestią otwartą pozostaje zastosowanie innych technologii w zakresie optyki sterowalnej do zmiany położenia płaszczyzny przedmiotowej. W literaturze naukowej omawiane są badania nad nowymi materiałami używanymi w konstrukcji układów optycznych, które mogą znacząco poszerzyć zakres i możliwości obrazowania. Intensywny rozwój obejmuje także obszar projektowania nowych typów sensorów wykorzystywanych w konstrukcji skanerów stosowanych w kamerach pomiarowych.

Interesujące rozszerzenie zagadnienia stanowi wykorzystanie dedykowanych rozwiązań sprzętowych. Implementacja algorytmów rekonstrukcji obrazów 3D na platformach wspartych metodami akceleracji sprzętowej mogłaby stanowić znaczne rozszerzenie parametrów użytkowych metody SFF. Wykorzystanie interfejsów komunikacyjnych większych prędkości oraz zrównoleglenie przetwarzania danych pozwoliłoby na dodatkowe skrócenie czasu akwizycji obrazu trójwymiarowego.

Dalsze badania mogą również dotyczyć możliwości integracji projektora światła strukturalnego. Dodatkowe i specjalizowane pod kątem metody SFF oświetlenie mogłoby prowadzić do zapewnienia warunków oświetleniowych umożliwiających stabilną pracę systemu obrazowania. Światło strukturalne o założonym kodowaniu mogłoby zostać wykorzystane do zwiększenia odporności metody oraz potencjalnie do poprawy rozdzielczości obrazowania. Dodatkowo, wprowadzenie oświetlenia sceny realizowanego przez obiektyw – w osi optycznej kamery zmniejszyłoby dodatkowo obszary okluzji obserwowane w okolicach krawędzi obrazowanych obiektów.

Bibliografia

- [1] CHRIS. MILLER, *CHIP WAR : the fight for the world's most critical technology*. SIMON & SCHUSTER LTD, 2022.
- [2] I. Grigorev *et al.*, "Improving the quality of sorting wood chips by scanning and machine vision technology," *J For Sci (Prague)*, vol. 67, no. 5, pp. 212–218, Oct. 2021, doi: 10.17221/10/2020-JFS.
- [3] A. Sioma, "Quality control system of wooden flanges based on vision measurement system," *Wood Research*, vol. 64, no. 4, pp. 637–646, 2019.
- [4] J. Gawlik, A. Ryniewicz, and A. Sioma, *The strategies and methods of measurement in multifunctional quality inspection*, no. 1860. 2004.
- [5] S. Adamczak, *Metrologia geometryczna powierzchni technologicznych*, Wyd. I. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2023.
- [6] B. Lentz, "Machine vision system for quality control of molded plastic packaging," in *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019*, R. S. Romaniuk and M. Linczuk, Eds., SPIE, Nov. 2019, p. 77. doi: 10.1117/12.2536697.
- [7] K. Parkot and A. Sioma, "Development of an automated quality control system of confectionery using a vision system," in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2018. doi: 10.1117/12.2501660.
- [8] B. Lentz and P. J. Kwiek, "Quality control automation of metallic surface using machine vision," in *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2021*, A. Smolarz, R. S. Romaniuk, and W. Wojcik, Eds., SPIE, Nov. 2021, p. 28. doi: 10.1117/12.2613807.
- [9] B. Lentz, P. Kwiek, and A. Sioma, "Quality control automation of electric cables using machine vision," in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2018. doi: 10.1117/12.2501562.
- [10] A. Hornberg, *Handbook of Machine Vision*. Wiley, 2007. doi: 10.1002/9783527610136.

-
- [11] A. Sioma, “3D imaging methods in quality inspection systems,” in *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019*, R. S. Romaniuk and M. Linczuk, Eds., SPIE, Nov. 2019, p. 91. doi: 10.1117/12.2536742.
- [12] A. Sioma, “Filtering Algorithms for 3D Range Image Analysis,” *Solid State Phenomena*, vol. 199, pp. 235–240, Mar. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.199.235.
- [13] J. Kowal and A. Sioma, “Surface defects detection using a 3D vision system,” in *Proceedings of the 2012 13th International Carpathian Control Conference, ICCCC 2012*, 2012, pp. 382–387. doi: 10.1109/CarpathianCC.2012.6228672.
- [14] M. Bartoszko, “Measurements of the geometrical parameters of the product using 3D imaging,” in *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020*, R. S. Romaniuk and M. Linczuk, Eds., SPIE, Oct. 2020, p. 44. doi: 10.1117/12.2580591.
- [15] A. Sioma, “Assessment of wood surface defects based on 3D image analysis,” *Wood Research*, vol. 60, no. 3, pp. 339–350, 2015.
- [16] D. Griffiths and J. Boehm, “A review on deep learning techniques for 3D sensed data classification,” Jul. 2019, doi: 10.3390/rs11121499.
- [17] K. Szpunar, “Determination of the position and orientation of objects using 3D imaging,” SPIE-Intl Soc Optical Eng, Oct. 2020, p. 43. doi: 10.1117/12.2580589.
- [18] A. Sioma, J. Socha, and A. Klamerus-Iwan, “A new method for characterizing bark microrelief using 3D vision systems,” *Forests*, vol. 9, no. 1, 2018, doi: 10.3390/f9010030.
- [19] D. Martišek and K. Mikulášek, “Mathematical principles of object 3d reconstruction by shape-from-focus methods,” *Mathematics*, vol. 9, no. 18, p. 2253, Sep. 2021, doi: 10.3390/MATH9182253/S1.
- [20] S. Grossberg, L. Kuhlmann, and E. Mingolla, “A neural model of 3D shape-from-texture: Multiple-scale filtering, boundary grouping, and surface filling-in,” *Vision Res*, vol. 47, no. 5, pp. 634–672, Mar. 2007, doi: 10.1016/J.VISRES.2006.10.024.
- [21] J. Aloimonos, “Shape from texture,” *Biol Cybern*, vol. 58, no. 5, pp. 345–360, Apr. 1988, doi: 10.1007/BF00363944/METRICS.

-
- [22] E. Prados and O. Faugeras, "Shape From Shading," in *Handbook of Mathematical Models in Computer Vision*, Springer, 2006, pp. 375–388. Accessed: Dec. 30, 2024. [Online]. Available: <https://inria.hal.science/inria-00377417v1>
- [23] V. S. Ramachandran, "Perception of shape from shading," *Nature* 1988 331:6152, vol. 331, no. 6152, pp. 163–166, Jan. 1988, doi: 10.1038/331163a0.
- [24] C. Stolz, M. Ferraton, and F. Meriaudeau, "Shape from polarization: a method for solving zenithal angle ambiguity," *Opt Lett*, vol. 37, no. 20, p. 4218, Oct. 2012, doi: 10.1364/OL.37.004218.
- [25] E. R. DAVIES, "The Three-Dimensional World," in *Machine Vision*, Elsevier, 2005, pp. 445–485. doi: 10.1016/B978-012206093-9/50019-8.
- [26] J. Kowal and A. Sioma, "Active Vision System for 3D Product Inspection," *Control Engineering*, vol. 56, no. 11, 2009.
- [27] R. C. Jain and A. K. Jain, *Analysis and Interpretation of Range Images*. in Springer Series in Perception Engineering. New York, NY: Springer New York, 1990. doi: 10.1007/978-1-4612-3360-2.
- [28] A. Sioma, "Vision System in Product Quality Control Systems," *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 751, vol. 13, no. 2, p. 751, Jan. 2023, doi: 10.3390/AP13020751.
- [29] M. Cinal, A. Sioma, and B. Lentz, "The Quality Control System of Planks Using Machine Vision," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 16, p. 9187, Aug. 2023, doi: 10.3390/app13169187.
- [30] B. Lentz, "Tree-ring growth measurements automation using machine vision," in *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020*, R. S. Romaniuk and M. Linczuk, Eds., SPIE, Oct. 2020, p. 30. doi: 10.1117/12.2580513.
- [31] A. Nitka, "The use of 3D imaging to determine the orientation and location of the object based on the CAD model," in *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019*, R. S. Romaniuk and M. Linczuk, Eds., SPIE, Nov. 2019, p. 158. doi: 10.1117/12.2536895.
- [32] A. Nitka and A. Sioma, "Design of an automated rice grain sorting system using a vision system," in *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, R. S. Romaniuk and M. Linczuk, Eds., SPIE, Oct. 2018, p. 198. doi: 10.1117/12.2501658.

-
- [33] G. Struzikiewicz and A. Sioma, "Application of infrared and high-speed cameras in diagnostics of CNC milling machines: case study," in *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019*, R. S. Romaniuk and M. Linczuk, Eds., SPIE, Nov. 2019, p. 69. doi: 10.1117/12.2536679.
- [34] A. Sioma and G. Struzikiewicz, "Measurement of wear level of Qubitron II grinding wheels with using 3D vision system," in *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, R. S. Romaniuk and M. Linczuk, Eds., SPIE, Oct. 2018, p. 55. doi: 10.1117/12.2501394.
- [35] L. Thomas, L. Mili, E. Thomas, and C. A. Shaffer, "Defect Detection on Hardwood Logs Using Laser Scanning," *Wood and Fiber Science*, no. 4, pp. 696–716, Oct. 2006.
- [36] P. Meinlschmidt, "Thermographic detection of defects in wood and wood based materials," in *14th international Symposium of nondestructive testing of wood, Germany (May 2nd-4th 2005)*, Eberswalde, 2005, p. 6. [Online]. Available: <https://www.ndt.net/article/v11n01/meinlschmidt/meinlschmidt.pdf>
- [37] G. Hislop, A. D. Hellicar, L. Li, K. Greene, C. Lewis, and R. Meder, "Microwave radar for detection of resin defects in *Pinus elliottii* Engelm var *elliottii*," *Holzforschung*, vol. 63, no. 5, pp. 571–574, Sep. 2009, doi: 10.1515/HF.2009.114.
- [38] M. Pastorino *et al.*, "A microwave tomographic system for wood characterization in the forest products industry," *Wood Mater Sci Eng*, vol. 10, no. 1, pp. 75–85, Jan. 2015, doi: 10.1080/17480272.2014.898696.
- [39] C. Senalik, J. P. Wacker, and B. P. Rodrigues, "Assessing Ability of Ground-Penetrating Radar to Detect Internal Moisture and Fungal Decay in Douglas-Fir Beams," in *Proceedings, 20th international nondestructive testing and evaluation of wood symposium*, Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 2017, pp. 286–300. Accessed: Nov. 11, 2023. [Online]. Available: <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/56941>
- [40] C. Freyburger, F. Longuetaud, F. Mothe, T. Constant, and J.-M. Leban, "Measuring wood density by means of X-ray computer tomography," *Ann For Sci*, vol. 66, no. 8, pp. 804–804, Jan. 2009, doi: 10.1051/forest/2009071.
- [41] J.-P. Andreu and A. Rinnhofer, "Modeling Knot Geometry in Norway Spruce from Industrial CT Images," 2003, pp. 786–791. doi: 10.1007/3-540-45103-X_104.

-
- [42] B. M. Nicolaï *et al.*, “Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review,” *Postharvest Biol Technol*, vol. 46, no. 2, pp. 99–118, Nov. 2007, doi: 10.1016/J.POSTHARVBIO.2007.06.024.
- [43] L. Čurda and O. Kukačková, “NIR spectroscopy: a useful tool for rapid monitoring of processed cheeses manufacture,” *J Food Eng*, vol. 61, no. 4, pp. 557–560, Mar. 2004, doi: 10.1016/S0260-8774(03)00215-2.
- [44] C. Li, L. Li, Y. Wu, M. Lu, Y. Yang, and L. Li, “Apple Variety Identification Using Near-Infrared Spectroscopy,” *Journal of Spectroscopy*, vol. 2018, no. 1, p. 6935197, Jan. 2018, doi: 10.1155/2018/6935197.
- [45] A. Sioma and B. Lentý, “Imaging Fungal Infections on Wood Surfaces Based on a Vision System,” *Drewno. Prace naukowe. Doniesienia. Komunikaty*, vol. 68, 2025, doi: 10.53502/wood-196695.
- [46] I. L. Azevedo, M. G. Morgan, and F. Morgan, “The transition to solid-state lighting,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 3, pp. 481–510, 2009, doi: 10.1109/JPROC.2009.2013058.
- [47] Teledyne Dalsa, “Genie Nano Series TM Camera User’s Manual 1 Gb GigE Vision-Monochrome & Color Area Scan,” 2019. [Online]. Available: www.teledynedalsa.com
- [48] A. Rogalski and Z. Bielecki, *Detekcja sygnałów optycznych*, 1st ed. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2001.
- [49] Sony, “Image Sensors with SenSWIR TM Technology,” Brightening .
- [50] Q. Cheng, T. Bui, M. Almasri, and S. Paradis, “Design of Dual-Band Uncooled Infrared Microbolometer,” *IEEE Sens J*, vol. 11, no. 1, pp. 167–175, 2011, doi: 10.1109/JSEN.2010.2056364.
- [51] C. H. Tan *et al.*, “Single-photon detection for long-range imaging and sensing,” *Optica, Vol. 10, Issue 9, pp. 1124-1141*, vol. 10, no. 9, pp. 1124–1141, Sep. 2023, doi: 10.1364/OPTICA.488853.
- [52] C. Bruschini, H. Homulle, I. M. Antolovic, S. Burri, and E. Charbon, “Single-photon avalanche diode imagers in biophotonics: review and outlook,” *Light: Science & Applications 2019 8:1*, vol. 8, no. 1, pp. 1–28, Sep. 2019, doi: 10.1038/s41377-019-0191-5.

-
- [53] R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands, *Feynmana wykłady z fizyki*, vol. 1.2. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2001.
- [54] D. Halliday, R. Resnick, and J. Walker, *Podstawy fizyki*, 2nd ed., vol. 4. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2020.
- [55] Sony Semiconductor Solutions Corporation, “Polarization Image Sensor,” 2021, *Sony Semiconductor Solutions Corporation*.
- [56] Sony Semiconductor Solutions Corporation, “SWIR Image Sensor,” 2024.
- [57] Teledyne e2v, “Emerald 67M - Sensor characteristics,” Apr. 01, 2021, *Teledyne e2v*. Accessed: Apr. 14, 2024. [Online]. Available: https://imaging.teledyne-e2v.com/content/uploads/2020/04/2021-04-01_e2v_Emerald_67M-Flyer_web.pdf
- [58] Sony Semiconductor Solutions Corporation, “IMX432LLJ,” 2018, *Sony Semiconductor Solutions Corporation*. Accessed: Apr. 14, 2024. [Online]. Available: https://www.phaselvision.com/userfiles/product_files/imx432llj_lqj_flyer.pdf
- [59] Y. Yao *et al.*, “BlendedMVS: A Large-scale Dataset for Generalized Multi-view Stereo Networks,” Nov. 2019.
- [60] Y. Che *et al.*, “Building height of Europe in 3D-GloBFP”, doi: 10.5281/ZENODO.11391077.
- [61] A. Eldesokey, M. Felsberg, and F. S. Khan, “Confidence Propagation through CNNs for Guided Sparse Depth Regression,” Nov. 2018, doi: 10.1109/TPAMI.2019.2929170.
- [62] J. Ren, L. Pan, and Z. Liu, “Benchmarking and Analyzing Point Cloud Classification under Corruptions,” Feb. 2022.
- [63] M. A. Uy, Q.-H. Pham, B.-S. Hua, D. T. Nguyen, and S.-K. Yeung, “Revisiting Point Cloud Classification: A New Benchmark Dataset and Classification Model on Real-World Data,” Aug. 2019.
- [64] J. Yang, R. Shi, and B. Ni, “MedMNIST Classification Decathlon: A Lightweight AutoML Benchmark for Medical Image Analysis,” in *2021 IEEE 18th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI)*, IEEE, Apr. 2021, pp. 191–195. doi: 10.1109/ISBI48211.2021.9434062.
- [65] E. Tretschk, A. Tewari, M. Zollhöfer, V. Golyanik, and C. Theobalt, “DEMEA: Deep Mesh Autoencoders for Non-Rigidly Deforming Objects,” May 2019.

-
- [66] A. Ranjan, T. Bolkart, S. Sanyal, and M. J. Black, “Generating 3D faces using Convolutional Mesh Autoencoders,” Jul. 2018.
- [67] J. Kowal, A. Sioma, and B. Lentz, “Automatyzacja procesu kontroli wyrobów z wykorzystaniem systemów wizyjnych,” in *Projektowanie i eksploatacja maszyn roboczych*, Cz. 2, T. Łagoda, M. Kurek, and A. Kurek, Eds., Opole: Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2020, pp. 113–136.
- [68] J. Adamczyk and A. Sioma, “Automatization of workspace control based on ToF technology,” in *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, R. S. Romaniuk and M. Linczuk, Eds., SPIE, Oct. 2018, p. 226. doi: 10.1117/12.2501716.
- [69] S. Kawahito, “Time-of-Flight Techniques,” *Handbook of 3D Machine Vision: Optical Metrology and Imaging*, pp. 253–273, Jan. 2016, doi: 10.1201/B13856-14.
- [70] SICK AG, “Karta danych produktu,” 2023.
- [71] Teledyne e2v, “Hydra3D+ THE TIME-OF-FLIGHT SOLUTION TAILORED FOR HIGH-END 3D VISION APPLICATIONS,” 2024.
- [72] Samsung Semiconductor Global, “ISOCELL Vizion 33D | ToF Sensor.” Accessed: Oct. 02, 2024. [Online]. Available: <https://semiconductor.samsung.com/image-sensor/tof-sensor/isocell-vizion-33d/>
- [73] K. Hatakeyama *et al.*, “A Hybrid ToF Image Sensor for Long-Range 3D Depth Measurement Under High Ambient Light Conditions,” *IEEE J Solid-State Circuits*, vol. 58, no. 4, pp. 983–992, Apr. 2023, doi: 10.1109/JSSC.2023.3238031.
- [74] Główny Urząd Geodezji i Kartografii, “Geoportal.gov.pl – Geoportal Infrastruktury Informacji Przestrzennej.” Accessed: Apr. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.geoportal.gov.pl/>
- [75] A. Sioma, “Laser illumination in triangulation vision systems,” in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2021. doi: 10.1117/12.2613804.
- [76] A. Sioma, “Geometry and resolution in triangulation vision systems,” in *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020*, R. S. Romaniuk and M. Linczuk, Eds., SPIE, Oct. 2020, p. 33. doi: 10.1117/12.2580525.

-
- [77] P. Siekański *et al.*, “On-Line Laser Triangulation Scanner for Wood Logs Surface Geometry Measurement,” *Sensors*, vol. 19, no. 5, p. 1074, Mar. 2019, doi: 10.3390/s19051074.
- [78] G. Olszyna, A. Sioma, and A. Tytko, “Laser measurement system for the diagnostics of mine hoist components,” *Archives of Mining Sciences*, vol. 59, no. 2, pp. 337–346, 2014, doi: 10.2478/amsc-2014-0024.
- [79] G. Reynolds, M. Hammond, and L. A. Binns, “Camera correlation focus: an image-based focusing technique,” in *Metrology, Inspection, and Process Control for Micro-lithography XIX*, R. M. Silver, Ed., May 2005, p. 1033. doi: 10.1117/12.599693.
- [80] A. Sioma, *Systemy wizyjne 3D w automatyzacji kontroli jakości wytwarzania*. in Biblioteka Problemów Budowy i Eksploatacji Maszyn: Studia i Rozprawy. Kraków: Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji - PIB, 2016. [Online]. Available: <https://books.google.pl/books?id=LxRaAQAACAAJ>
- [81] L. Hou *et al.*, “An Improved Shape from Focus Method for Measurement of Three-Dimensional Features of Fuel Nozzles,” *Sensors 2023, Vol. 23, Page 265*, vol. 23, no. 1, p. 265, Dec. 2022, doi: 10.3390/S23010265.
- [82] B. Billiot, F. Cointault, L. Journaux, J. C. Simon, and P. Gouton, “3D Image Acquisition System Based on Shape from Focus Technique,” *Sensors 2013, Vol. 13, Pages 5040–5053*, vol. 13, no. 4, pp. 5040–5053, Apr. 2013, doi: 10.3390/S130405040.
- [83] Y. Wang, X. Zhang, J. Chen, and L. Zhang, “Surface Roughness Measurement from Shape-from-focus,” *2024 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2024*, pp. 918–923, 2024, doi: 10.1109/ICMA61710.2024.10632912.
- [84] Z. Zhang, F. Liu, Z. Zhou, Y. He, and H. Fang, “Roughness measurement of leaf surface based on shape from focus,” *Plant Methods*, vol. 17, no. 1, pp. 1–11, Dec. 2021, doi: 10.1186/S13007-021-00773-Y/FIGURES/10.
- [85] J. Tang, Z. Qiu, and T. Li, “A novel measurement method and application for grinding wheel surface topography based on shape from focus,” *Measurement*, vol. 133, pp. 495–507, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2018.10.006.
- [86] S. Onogi, T. Kawase, T. Sugino, and Y. Nakajima, “Investigation of Shape-from-Focus Precision by Texture Frequency Analysis,” *Electronics 2021, Vol. 10, Page 1870*, vol. 10, no. 16, p. 1870, Aug. 2021, doi: 10.3390/ELECTRONICS10161870.

-
- [87] S. Wang, J. Chen, H. Shi, and M. Li, "Wafer Surface Reconstruction Based on Shape From Focus," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 25684–25699, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3365506.
- [88] Z. He, P. Zhou, J. Zhu, and J. Zhang, "Improved shape-from-focus reconstruction for high dynamic range freedom surface," *Opt Lasers Eng*, vol. 170, p. 107784, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.OPTLASENG.2023.107784.
- [89] Y. Nakajima, N. Tanigaki, T. Sugino, T. Kawase, and S. Onogi, "A Small and High-Speed Driving Mechanism for 3D Shape Measurement in Monocular Endoscopy," *Sensors 2021, Vol. 21, Page 4887*, vol. 21, no. 14, p. 4887, Jul. 2021, doi: 10.3390/S21144887.
- [90] M. B. Ahmad and T. S. Choi, "Application of three dimensional shape from image focus in LCD/TFT displays manufacturing," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 53, no. 1, pp. 1–4, Feb. 2007, doi: 10.1109/TCE.2007.339492.
- [91] A. Wu, R. Lu, and M. Li, "A novel focus measure algorithm for three-dimensional microscopic vision measurement based on focus stacking," *Sens Actuators A Phys*, vol. 376, p. 115657, Oct. 2024, doi: 10.1016/J.SNA.2024.115657.
- [92] Z. Qiu and J. Tang, "Three-dimensional information measurement and reconstruction for micro-hole array based on the modified shape from focus," *Opt Lasers Eng*, vol. 178, p. 108246, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.OPTLASENG.2024.108246.
- [93] I. Cacciari, P. Nieri, and S. Siano, "3D digital microscopy for characterizing punch-works on medieval panel paintings," *Journal on Computing and Cultural Heritage*, vol. 7, no. 4, Feb. 2015, doi: 10.1145/2594443;SUBPAGE:STRING:ABSTRACT;JOURNAL:JOURNAL:JOCC H;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:JOCCH;WEBSITE:WEBSITE:DL-SITE;TAXONOMY:TAXONOMY:ACM-PUBTYPE;PAGEGROUP:STRING:PUBLICATION.
- [94] J. Gladines, S. Sels, I. De Boi, and S. Vanlanduit, "A phase correlation based peak detection method for accurate shape from focus measurements," *Measurement*, vol. 213, p. 112726, May 2023, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2023.112726.
- [95] J. Gladines, S. Sels, J. Blom, and S. Vanlanduit, "A Fast Shape-from-Focus-Based Surface Topography Measurement Method," *Sensors 2021, Vol. 21, Page 2574*, vol. 21, no. 8, p. 2574, Apr. 2021, doi: 10.3390/S21082574.

-
- [96] J. Gladines, S. Sels, M. Hillen, and S. Vanlanduit, “A Continuous Motion Shape-from-Focus Method for Geometry Measurement during 3D Printing,” *Sensors* 2022, Vol. 22, Page 9805, vol. 22, no. 24, p. 9805, Dec. 2022, doi: 10.3390/S22249805.
- [97] J. Waśniowska, “Designing industrial illuminators for vision measurement systems,” in *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020*, 2020, p. 1158119. doi: 10.1117/12.2580593.
- [98] A. Sioma and B. Lentz, “Focus Estimation Methods for Use in Industrial SFF Imaging Systems,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 4, p. 1374, Feb. 2024, doi: 10.3390/app14041374.
- [99] F. C. A. Groen, I. T. Young, and G. Ligthart, “A comparison of different focus functions for use in autofocus algorithms,” *Cytometry*, vol. 6, no. 2, pp. 81–91, Mar. 1985, doi: 10.1002/cyto.990060202.
- [100] X. Xu *et al.*, “A comparison of contrast measurements in passive autofocus systems for low contrast images,” *Multimed Tools Appl*, vol. 69, no. 1, pp. 139–156, Mar. 2014, doi: 10.1007/s11042-012-1194-x.
- [101] S. Liu, Y. Lu, J. Wang, S. Hu, J. Zhao, and Z. Zhu, “A new focus evaluation operator based on max–min filter and its application in high quality multi-focus image fusion,” *Multidimens Syst Signal Process*, vol. 31, no. 2, pp. 569–590, Apr. 2020, doi: 10.1007/s11045-019-00675-2.
- [102] R. Bryll, “Machine vision approach for improving accuracy of focus-based depth measurements,” in *Image Processing: Machine Vision Applications*, K. S. Niel and D. Fofi, Eds., Feb. 2008, p. 681309. doi: 10.1117/12.766715.
- [103] Y. Matsubara, K. Shirai, Y. Ito, and K. Tanaka, “Pixel-wise parallel calculation for depth from focus with adaptive focus measure,” *Multidimens Syst Signal Process*, 2021, doi: 10.1007/s11045-021-00794-9.
- [104] S. S. Bayya, J. A. Wojcik, J. S. Sanghera, and I. D. Aggarwal, “VIS-IR transmitting BGG glass and glass-ceramics,” <https://doi.org/10.1117/12.405282>, vol. 4102, pp. 169–174, Oct. 2000, doi: 10.1117/12.405282.
- [105] C. M. Smith and L. A. Moore, “Fused silica as an optical material [Invited],” *Optical Materials Express*, Vol. 12, Issue 8, pp. 3043–3059, vol. 12, no. 8, pp. 3043–3059, Aug. 2022, doi: 10.1364/OME.463349.

-
- [106] G. K. Warden, M. Juel, B. A. Gaweł, and M. Di Sabatino, “Recent developments on manufacturing and characterization of fused quartz crucibles for monocrystalline silicon for photovoltaic applications,” *Open Ceramics*, vol. 13, p. 100321, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.OCERAM.2022.100321.
- [107] R. Kingslake and R. Barry Johnson, “The Work of the Lens Designer,” *Lens Design Fundamentals*, pp. 1–23, Jan. 2010, doi: 10.1016/B978-0-12-374301-5.00005-X.
- [108] H. Ren and S. Wu, *Introduction to Adaptive Lenses*. Wiley, 2012. doi: 10.1002/9781118270080.
- [109] J. Gong and J. Luo, “Rapid and Precise Zoom Lens Design Based on Voice Coil Motors with Tunnel Magnetoresistance Sensors,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 16, p. 6990, Aug. 2024, doi: 10.3390/APP14166990/S1.
- [110] N. Masuda, S. Izuhara, and T. Mashimo, “Miniature camera module with a hollow linear ultrasonic motor-based focus feature,” *Sens Actuators A Phys*, vol. 354, p. 114248, May 2023, doi: 10.1016/J.SNA.2023.114248.
- [111] A. S. Gaunekar, G. P. Widdowson, N. Srikanth, and W. Guangneng, “Design and development of a high precision lens focusing mechanism using flexure bearings,” *Precis Eng*, vol. 29, no. 1, pp. 81–85, Jan. 2005, doi: 10.1016/J.PRECISIONENG.2004.05.005.
- [112] C. Hu, H. Yang, and H. Niu, “The design of aerial camera focusing mechanism,” <https://doi.org/10.1117/12.2199676>, vol. 9677, pp. 321–327, Oct. 2015, doi: 10.1117/12.2199676.
- [113] F. Shen, L. Hodgson, and K. Hahn, “Digital Autofocus Methods for Automated Microscopy,” *Methods Enzymol*, vol. 414, pp. 620–632, Jan. 2006, doi: 10.1016/S0076-6879(06)14032-X.
- [114] D. Zhou, Z. Yao, J. Xu, and X. Li, “A novel high resolution, fast response speed, and long-stroke hybrid flexible focusing mechanism of advanced optical imaging system driven by an ultrasonic motor,” *Precis Eng*, vol. 96, pp. 65–79, Oct. 2025, doi: 10.1016/J.PRECISIONENG.2025.06.002.
- [115] B. M. Wright, “Improvements in or relating to variable focus lenses,” GB1209234A, Mar. 11, 1968

-
- [116] C.-S. Liu and P. D. Lin, “Miniaturized auto-focusing VCM actuator with zero holding current,” *Opt Express*, vol. 17, no. 12, p. 9754, Jun. 2009, doi: 10.1364/OE.17.009754.
- [117] C.-S. Liu and P. D. Lin, “A miniaturized low-power VCM actuator for auto-focusing applications,” *Opt Express*, vol. 16, no. 4, p. 2533, 2008, doi: 10.1364/OE.16.002533.
- [118] L. Li, D. Wang, C. Liu, and Q.-H. Wang, “Zoom microscope objective using electro-wetting lenses,” *Opt Express*, vol. 24, no. 3, p. 2931, Feb. 2016, doi: 10.1364/oe.24.002931.
- [119] G. S. Jung and Y. H. Won, “Simple and fast field curvature measurement by depth from defocus using electrowetting liquid lens,” *Appl Opt*, vol. 59, no. 18, p. 5527, Jun. 2020, doi: 10.1364/ao.394565.
- [120] A. S. Cruz-Félix, A. Santiago-Alvarado, J. Márquez-García, and J. González-García, “PDMS samples characterization with variations of synthesis parameters for tunable optics applications,” *Heliyon*, vol. 5, no. 12, p. e03064, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.HELİYON.2019.E03064.
- [121] B. Wu, S.-T. Wu, D. Fox, H. Ren, and P. A. Anderson, “Tunable-focus liquid lens controlled using a servo motor,” *Optics Express, Vol. 14, Issue 18, pp. 8031-8036*, vol. 14, no. 18, pp. 8031–8036, Sep. 2006, doi: 10.1364/OE.14.008031.
- [122] A. Pouydebasque *et al.*, “Varifocal liquid lenses with integrated actuator, high focusing power and low operating voltage fabricated on 200 mm wafers,” *Sens Actuators A Phys*, vol. 172, no. 1, pp. 280–286, Dec. 2011, doi: 10.1016/J.SNA.2011.05.005.
- [123] N. Hasan, H. Kim, and C. H. Mastrangelo, “Large aperture tunable-focus liquid lens using shape memory alloy spring,” *Opt Express*, vol. 24, no. 12, p. 13334, Jun. 2016, doi: 10.1364/OE.24.013334.
- [124] S. Pertuz, D. Puig, and M. A. Garcia, “Reliability measure for shape-from-focus,” *Image Vis Comput*, vol. 31, no. 10, pp. 725–734, 2013, doi: 10.1016/j.imavis.2013.07.005.
- [125] S. Pertuz, D. Puig, and M. A. Garcia, “Analysis of focus measure operators for shape-from-focus,” *Pattern Recognit*, vol. 46, no. 5, pp. 1415–1432, 2013, doi: 10.1016/j.patcog.2012.11.011.
- [126] B. Fu, R. He, Y. Yuan, W. Jia, S. Yang, and F. Liu, “Shape from focus using gradient of focus measure curve,” *Opt Lasers Eng*, vol. 160, p. 107320, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.optlaseng.2022.107320.

-
- [127] J. R. Alonso, A. Fernández, G. A. Ayubi, and J. A. Ferrari, “All-in-focus image reconstruction under severe defocus,” *Opt Lett*, vol. 40, no. 8, p. 1671, Apr. 2015, doi: 10.1364/ol.40.001671.
- [128] M. T. Mahmood, S.-O. Shim, and T.-S. Choi, “Shape from focus using principal component analysis in discrete wavelet transform,” <https://doi.org/10.1117/1.3130232>, vol. 48, no. 5, p. 057203, May 2009, doi: 10.1117/1.3130232.
- [129] A. S. Malik and T. S. Choi, “A novel algorithm for estimation of depth map using image focus for 3D shape recovery in the presence of noise,” *Pattern Recognit*, vol. 41, no. 7, pp. 2200–2225, Jul. 2008, doi: 10.1016/J.PATCOG.2007.12.014.
- [130] A. S. Malik and T. S. Choi, “Consideration of illumination effects and optimization of window size for accurate calculation of depth map for 3D shape recovery,” *Pattern Recognit*, vol. 40, no. 1, pp. 154–170, Jan. 2007, doi: 10.1016/J.PATCOG.2006.05.032.
- [131] F. Yang, X. Huang, and Z. Zhou, “Deep Depth from Focus with Differential Focus Volume,” *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 2022-June, pp. 12632–12641, 2022, doi: 10.1109/CVPR52688.2022.01231.
- [132] H. J. Kim, M. T. Mahmood, and T. S. Choi, “An Efficient Neural Network for Shape from Focus with Weight Passing Method,” *Applied Sciences 2018, Vol. 8, Page 1648*, vol. 8, no. 9, p. 1648, Sep. 2018, doi: 10.3390/APP8091648.
- [133] U. Ali and M. T. Mahmood, “Robust Focus Volume Regularization in Shape from Focus,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 30, pp. 7215–7227, 2021, doi: 10.1109/TIP.2021.3100268.
- [134] K. Ashfaq and M. T. Mahmood, “Directional Ring Difference Filter for Robust Shape-from-Focus,” *Mathematics 2023, Vol. 11, Page 3056*, vol. 11, no. 14, p. 3056, Jul. 2023, doi: 10.3390/MATH11143056.
- [135] A. Thelen, S. Frey, S. Hirsch, and P. Hering, “Improvements in Shape-From-Focus for Holographic Reconstructions With Regard to Focus Operators, Neighborhood-Size, and Height Value Interpolation,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 18, no. 1, pp. 151–157, Jan. 2009, doi: 10.1109/TIP.2008.2007049.

- [136] X. Xu, Y. Wang, J. Tang, X. Zhang, and X. Liu, “Robust Automatic Focus Algorithm for Low Contrast Images Using a New Contrast Measure,” *Sensors*, vol. 11, no. 9, pp. 8281–8294, Aug. 2011, doi: 10.3390/s110908281.
- [137] Yu Sun, S. Duthaler, and B. J. Nelson, “Autofocusing algorithm selection in computer microscopy,” in *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2005, pp. 70–76. doi: 10.1109/IROS.2005.1545017.
- [138] L. Shih, “Autofocus survey: a comparison of algorithms,” in *Digital Photography III*, R. A. Martin, J. M. DiCarlo, and N. Sampat, Eds., Feb. 2007, p. 65020B. doi: 10.1117/12.705386.
- [139] S. K. Nayar and Y. Nakagawa, “Shape from focus,” *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, vol. 16, no. 8, pp. 824–831, 1994, doi: 10.1109/34.308479.
- [140] A. Rusiecki, *Algorytmy uczenia sieci neuronowych odporne na błędy w danych*, Praca doktorska. Wrocław: Politechnika Wrocławska, 2007.
- [141] A. Hornberg, *Handbook of Machine and Computer Vision*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017. doi: 10.1002/9783527413409.
- [142] A. Bućwińska, “Calibration of vision systems,” in *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019*, R. S. Romaniuk and M. Linczuk, Eds., SPIE, Nov. 2019, p. 176. doi: 10.1117/12.2536952.

Załącznik I - Model matematyczny estymatorów

Pochodna – kontrast

Filtry wykorzystujące pochodną wykorzystywane są w analizie obrazu głównie do wykrywania krawędzi. Konsekwencją analizy obrazu cyfrowego jest stosowanie pochodnej dyskretnej.

Pochodna w jednym kierunku (1D) ma zastosowanie w analizie obrazu dla obliczeń wykonywanych na profilach. Profil jest to wektor danych wygenerowany z obrazu poprzez wybranie wartości pikseli na obrazie 2D wzdłuż zadanego odcinka. Możliwa jest zarówno ekstrakcja krawędzi ortogonalnie do układu współrzędnych obrazu lub wzdłuż odcinka o dowolnej orientacji.

Pierwsza pochodna w punkcie (x_i) jest najprostszym wskaźnikiem występowania krawędzi wzdłuż segmentu. Przekłada się to na czas potrzebny na przetworzenie całego obrazu, szczególnie dla obliczeń profili równoległych do układu współrzędnych.

Wadą tego rozwiązania jest brak symetryczności względem punktu x_i , przez co obliczona wartość odpowiada współrzędnej $x_{\frac{i}{2}}$.

$$f'_i = (f_{i-1} - f_i) \quad (\text{I.1})$$

Rozwiązaniem tego problemu jest dobranie do obliczenia pochodnej w punkcie x_i punktów sąsiadujących. Poniższy wzór odpowiada dopasowaniu w punktach $[x_{i-1} \ x_i \ x_{i+1}]$ funkcji kwadratowej, a następnie obliczenia jej pochodnej w punkcie x_i .

$$f'_i = \frac{1}{2} (f_{i+1} - f_{i-1}) \quad (\text{I.2})$$

Powyższe równanie to filtr liniowy, możliwe jest przez to przekształcenie do postaci splotu obrazu źródłowego (lub jego zawężonej części) z macierzą o współczynnikach wynikających wzoru powyżej.

$$f'_i = f * \frac{1}{2} [1 \ 0 \ -1] \quad (\text{I.3})$$

Implementacje zastosowania tej metody w wizji maszynowej bazują na stosowaniu zmiennych 8-bitowych bez znaku. Powoduje to problem z ujemnymi wartościami f' . W

zależności od wymogów aplikacji, jeśli kierunek krawędzi nie jest ważny, a jedynie jej amplituda, stosowana jest wartość bezwzględna z obliczonej wartości. Jeśli natomiast orientacja jest znacząca następuje przycięcie wartości ujemnych do 0, a następnie operacja wykonywana jest ponownie dla transponowanego jądra przekształcenia.

Filtry 2D

Opisane w poprzednim rozdziale filtry umożliwiają wykrycie krawędzi, jednak tylko w kierunku założonego odcinka. Powoduje to jednak brak danych dla krawędzi o innej orientacji. W tej sytuacji krawędź może mieć różny gradient w zależności od kąta między krawędzią, a przyjętym do wygenerowania profilu odcinkiem. Dodatkową wadą filtrów 1D jest czułość na pomiarowe szумы wysokoczęstotliwościowe, które mogą zostać uznane jako krawędzie.

Filtry 2D stosowane w wizji maszynowej w większości działają na podstawie splotu obrazu źródłowego z jądrem przekształcenia. Jądro przyjmuje najczęściej postać macierzy kwadratowej. Rozmiar macierzy jest zależny od zastosowanego przekształcenia. Główną różnicą przedstawionych poniżej przekształceń jest dobór wartości współczynników jądra przekształcenia.

Krzyż Roberts’a

Filtr posiada współczynniki 1 oraz -1 na diagonalu macierzy kwadratowej 2×2 . Krzyż Roberts’a ma cztery wersje. Podstawowa pokazana została poniżej, pozostałe otrzymuje się poprzez obrót macierzy o 90 stopni. Wersje różnią się czułością w zależności od orientacji krawędzi na obrazie.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (\text{I.4})$$

Jako jedyny z przytoczonych filtrów, krzyż Roberts’a posiada rozmiar jądra 2×2 . Rozmiar jądra pozwala na wykrycie tylko lokalnych zaburzeń intensywności, mieszczących się w jej granicach. Główną zaletą algorytmu jest relatywnie krótszy czas wykonania wynikający z mniejszego jądra przekształcenia. Dla obrazów, gdzie krawędź elementu ma szerokość kilku pikseli zachodzi możliwość błędów pozycjonowania krawędzi.

W kontekście oceny ostrości obrazu filtr posiada wady pierwszej pochodnej w punkcie, obliczonej na dwóch sąsiednich punktach tj. brak symetryczności oraz czułość na wysokoczęstotliwościowe szumy pomiarowe.

Filtry 3x3

Stosując wzór I.3 możliwe jest zwiększenie odporności filtru na szumy wysokoczęstotliwościowe stosując uśrednienie wartości pochodnej prostopadle do kierunku liczonej pochodnej. Zaproponowany filtr o współczynnikach jądra przekształcenia 1 oraz -1 oraz wymiarze macierzy 3×3 to filtr Prewitt'a. Implementuje on uśrednianie z wagą dla każdej pochodnej równej 1. Możliwe jest 8 wersji rozmieszczenia współczynników dla filtru Prewitt'a. Dwie podstawowe zaprezentowano poniżej, pozostałe otrzymuje się poprzez obrót macierzy o 90 stopni. Wersje różnią się czułością w zależności od orientacji krawędzi na obrazie.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (I.5)$$

Podobne rozwiązania różnią się wagami podczas operacji uśredniania pochodnej.

Filtr Sobela implementuje zwieszenie wagi dla linii środkowej do wartości 2. Jest to aproksymacja uśredniania filtrem Gaussowskim. Inne propozycje to np.:

- **filtr Frei** – linia środkowa posiada wagę równą $\sqrt{2}$,
- **filtr Ando** – linia środkowa posiada wagę równą 2,435, liczba wynika z prób minimalizacji wpływu artefaktów na obrazie na wynik przekształcenia.

Wadą filtrów o niecałkowitych współczynnikach jest konieczność obliczeń zmienneoprzecinkowych, co redukuje główną zaletę filtrów o niewielkich rozmiarach jądra – szybkość obliczeń.

Filtr Scharr'a proponuje uśrednienie przy współczynnikach wagowych kolejno 3, 10 oraz 3. Dobrane wagi mają na celu optymalizację izotropowości filtru. Wybranie wag o dużych współczynnikach powoduje możliwość nasycenia wartości wynikowej, szczególnie dla 8-bitowych obliczeń. Rozwiązaniem byłoby zastosowanie zmiennych 16-bitowych, jednak to spowoduje zwiększenie zapotrzebowania na pamięć i moc obliczeniową dla kolejnych operacji. Część środowisk wizyjnych nie dopuszcza również analizy obrazów 16 – bitowych. Jednym z rozwiązań tego problemu może być normalizacja wartości wynikowej.

Metody estymacji wartości ostrości na podstawie wyników kilku operacji

Pojedynczy splot jądra o założonej orientacji zwraca tylko krawędzie prostopadłe do kierunku liczenia pochodnej. Ograniczając się do pojedynczego splotu powstaje ryzyko nie wykrycia krawędzi równoległych. W rozważanym w pracy studium przypadku może to oznaczać wykrycie mniejszego kontrastu i niepoprawne przyporządkowanie obszaru ostrego.

Konieczne jest wykonanie splotu dla co najmniej dwóch prostopadłych kierunków. Pozostawia to problem agregacji kilku wyników do pojedynczej wartości estymatora. Poniżej przedstawiono rozwiązania zaproponowane w literaturze:

- suma wartości bezwzględnych,
- średnia arytmetyczna wartości bezwzględnych,
- maksimum z wartości bezwzględnych,
- średnia geometryczna.

Obliczenia poszczególnych składowych gradientu w więcej niż jednym kierunku umożliwia ustalenie kierunku otrzymanej krawędzi. Orientacja wykrytych krawędzi ma znaczenie w zadaniach pomiarowych, jednak dla zadania oceny ostrości nie jest to parametr konieczny.

Bezpośrednia ocena ostrości na podstawie powyżej opisanych przekształceń jest możliwa dla obrazów dobrej jakości. Uśrednianie wykorzystane w filtrach 3x3 umożliwia analizę obrazów zawierających szum, jednak dla bardziej wymagających obrazów jest to rozwiązanie niewystarczające.

Estymacja ostrości w punkcie na obrazie może wymagać uwzględnienia większego otoczenia niż rozmiar jądra przytoczonych wyżej filtrów. Rozwiązuje się to poprzez estymację ostrości w danym punkcie poprzez splot wybranej funkcji z zawężoną częścią obrazu:

$$F'(x, y) = \sum^{ROI} |F_{ROI} * G| \quad (I.6)$$

,gdzie:

$F'(x, y)$ – obliczana wartość piksela na obrazie wynikowym,

F – obraz źródłowy,

G – jądro przekształcenia, np. filtr Sobel'a.

Splot zwraca macierz wyników, które następnie należy przetworzyć do pojedynczej wartości. We wzorze wyżej zastosowano sumowanie wartości bezwzględnej, jednak stosowane są również inne metody:

- średnia arytmetyczna wartości bezwzględnych,
- maksimum z wartości bezwzględnych,
- suma kwadratów – energia,
- wariancja.

Powyższy opis odpowiada działaniu algorytmowi **Tenengrad**.

Operator Laplace’a

Operator również bazuje na obliczeniu pochodnej. W przeciwieństwie do wcześniej omówionych, które bazowały na pierwszej pochodnej w punkcie wykorzystuje on drugą pochodną. W przypadku dwuwymiarowym przyjmuje on liniową postać:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (\text{I.7})$$

Stosowane dyskretne aproksymacje dla wymiarów macierzy 3×3 przedstawiono na poniżej:

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (\text{I.8})$$

Zaletą tego operatora jest zmniejszenie wpływu orientacji występujących krawędzi na amplitudę otrzymanego obrazu wyjściowego. Relatywne zwiększenie wartości centralnej jądra przekształcenia powoduje jednak zwiększenie czułości na szumy wysokoczęstotliwościowe na obrazie.

Operator zwraca macierz elementów, na których należy wykonać dodatkową operację w celu otrzymania pojedynczej wartości wskaźnika w punkcie (x, y) . Do najpopularniejszych przekształceń wykorzystujących operator należą Energia Laplasjanu oraz Wariancja Laplasjanu.

Zmodyfikowany Laplasjan

Modyfikacja zaproponowana w literaturze zakłada podzielenie operacji liczenia laplasjanu dla poszczególnych kierunków za pomocą jądra przekształcenia o wymiarze 3×1 oraz jego transponowanego odpowiednika.

$$G = [-1 \quad 2 \quad -1] \quad (\text{I.9})$$

Wartość ostrości w punkcie liczona jest jako wartość średnia sumy wartości bezwzględnych z poszczególnych splotów:

$$F'(x, y) = \overline{|F_{ROI} * G| + |F_{ROI} * G^T|}. \quad (I.10)$$

Operator LoG (Laplacian of Gauss)

Rozwiązaniem czułości na szumy klasycznego operatora Laplace'a jest wcześniejsza filtracja obrazu filtrem gaussa. Korzystając z przemienności operacji splotu możliwe jest wcześniejsze obliczenie pojedynczej macierzy LoG, która uwzględnia zarówno rozmycie jak otrzymania informacji o krawędziach. Umożliwia wykonanie tylko jednej operacji splotu w czasie analizy obrazu. Wzór niżej odpowiada ciągłej reprezentacji operatora LoG dla punktu centralnego dobranego w punkcie (0,0).

$$G(x, y, \sigma) = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left(1 - \frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (I.11)$$

Rozmiar dyskretnej macierzy LoG zależy głównie od rozmiaru jądra zastosowanego filtru gaussowskiego. Zmienna σ decyduje o poziomie rozmycia obrazu, im większa wartość tym większe rozmycie.

Przekształcenia bazujące na podejściu statystycznym

Wariancja intensywności

Operator zwraca wariancję wartości intensywności w ROI jako wskaźnik ostrości w punkcie.

$$F'(x, y) = \sum_{i,k}^{ROI} (F(i, k) - \mu_{ROI})^2 \quad (I.12)$$

Kluczowym parametrem jest rozmiar zastosowanego jądra ROI.

Znormalizowana wariancja intensywności

Różnice w wariancji wynikające ze zmiany średniej intensywności między obrazami mogą zostać skompensowane poprzez podzielenie przez wartość średnią intensywności w ROI.

$$F'(x, y) = \frac{\sum_{i,k}^{ROI} (F(i,k) - \mu_{ROI})^2}{\mu_{ROI}} \quad (I.13)$$

Entropia

Wraz z rozmyciem obrazu tracone są informacje w nim zawarte. Zaproponowano zastosowanie entropii intensywności w celu oceny ostrości obrazu. Entropia definiowana

jest na podstawie histogramu wartości pikseli na obrazie zawężonym przez ROI według zależności:

$$F'(x, y) = - \sum_i^{256} P_i * \log_2(P_i) \quad (I.14)$$

,gdzie

P – liczba wystąpień danej wartości w histogramie intensywności pikseli w zakresie ROI

Wskaźniki bezpośrednio bazujące na intensywności

Omawiane estymatory pozwalają ocenić ostrość obrazu bezkontekstowo – bezpośrednio na podstawie wartości intensywności pikseli w ROI. Nie jest wymagane wykonywanie operacji splotu. Przekłada się to na krótszy czas obliczeń.

Suma intensywności

Algorytm pozwala ocenić ostrość obrazu na podstawie wartości w ROI. Wartość wskaźnika obliczana jest jako suma wartości wszystkich pikseli w ROI, których wartość przekracza założony próg. Dodatkowe progowanie pozwala na zredukowanie wpływu tła na wartość współczynnika.

$$F'(x, y) = \sum_{i,k}^{ROI} F(i, k) * S(i, k) \quad (I.15)$$

,gdzie

$S(i, k)$ – parametr przyjmujący wartość 0 dla $S(i, k) \leq T$ oraz wartość 1 dla $S(i, k) > T$

T – wartość minimalna, poniżej której wartości pikseli nie są sumowane

Liczba pikseli powyżej progu

Algorytm pozwala na ocenę ostrości na podstawie liczby pikseli powyżej założonego progu wartości intensywności pikseli w zakresie ROI.

$$F'(x, y) = \sum_{i,k}^{ROI} S(i, k) \quad (I.16)$$

Energia intensywności

Jest to modyfikacja algorytmu sumującego intensywność. Modyfikacja polega na sumowaniu kwadratu intensywności. Umożliwia to zwiększenie znaczenia pikseli bliżej maksymalnej wartości w stosunku do mniejszych intensywności:

$$F'(x, y) = \sum_{i,k}^{ROI} (F(i, k))^2 * S(i, k) \quad (I.17)$$