



FIELD OF SCIENCE: ENGINEERING AND TECHNOLOGY

SCIENTIFIC DISCIPLINE: AUTOMATION, ELECTRONICS, ELECTRICAL
ENGINEERING AND SPACE TECHNOLOGIES

SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION

Marker-free optical-flow-based automatic fatigue crack
assessment in metallic structures under periodic
excitation

Author: mgr inż. Adam Machynia

Supervisor: Ziemowit Dworakowski, PhD, DSc

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

Kraków, 2026



AGH

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA
I TECHNOLOGIE KOSMICZNE

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Automatyczna ocena pęknięć zmęczeniowych
w strukturach metalowych poddanych okresowemu
wymuszeniu, oparta na przepływie optycznym
i niewymagająca znaczników wizyjnych

Autor: mgr inż. Adam Machynia

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Ziemowit Dworakowski, prof. AGH

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

Kraków, 2026

Streszczenie

Pęknięcia zmęczeniowe w konstrukcjach metalowych, w szczególności w zastosowaniach lotniczych, są jedną z głównych przyczyn poważnych uszkodzeń, zwiększającą ryzyko eksploatacyjne. Ocena stanu konstrukcji inżynierskich opiera się na metodach monitoringu strukturalnego oraz badaniach nieniszczących, których celem jest wykrywanie, lokalizacja i ocena uszkodzeń bez wyłączania badanego obiektu z eksploatacji. W tym kontekście techniki oparte o wizję komputerową stanowią wartościowe podejście, ponieważ są bezkontaktowe, a niektóre z nich można stosować z wykorzystaniem relatywnie niedrogiego, ogólnodostępnego sprzętu pomiarowego. Jednakże praktyczne zastosowania są utrudnione ze względu na, między innymi, znaczną zależność technik wizyjnych od ręcznego doboru ich parametrów oraz zmiennych warunków eksperymentalnych, a także brak możliwości bezpośredniej interpretacji wyników.

W niniejszej pracy przedstawiono metodę automatycznej wizualizacji oraz detekcji położenia wierzchołka pęknięcia zmęczeniowego w strukturach metalicznych, poddanym wymuszeniu periodycznemu. Zaproponowana technika bazuje na analizie ruchu związanego z cyklicznym otwieraniem się i zamykaniem pęknięcia zmęczeniowego. Oparta jest ona na wizji komputerowej, ale nie wymaga zastosowania znaczników wizyjnych. Metoda wykorzystuje przekształcenie przepływu optycznego do dziedziny częstotliwości, co pozwala na przygotowanie wizualizacji wzorców ruchu związanych z cyklicznym otwieraniem się i zamykaniem pęknięcia, co daje możliwość automatycznego określenia położenia wierzchołka pęknięcia. Oryginalnymi aspektami rozprawy są przede wszystkim opracowanie wizualizacji ruchu związanego z pęknięciem oraz automatyczna procedura detekcji położenia wierzchołka pęknięcia. Ponadto zaproponowano metrykę LOI (ang. *Local Orientation Inconsistency*) służącą do oceny spójności kierunku ruchu estymowanego z nagrań wideo. Metryka ta pozwala na maskowanie regionów o niepewnej estymacji ruchu oraz wspomaga wybór obszaru odpowiedniego do dalszej analizy. Sprawdzono również wpływ zastosowania techniki wizyjnego wzmacniania ruchu na nagraniach wideo, wykazując jego użyteczność przy wizualizacji pęknięć zmęczeniowych w niektórych przypadkach relatywnie niskiego poziomu amplitudy wymuszenia.

Działanie zaproponowanych metod zweryfikowano na nagraniach przedstawiających trzy obiekty: kompresor, belkę wspornikową oraz próbkę lotniczą będącą strukturą płytową. Dane eksperymentalne zarejestrowano w zróżnicowanych konfiguracjach pomiarowych, z użyciem różnych kamer, w tym kamery smartfona. Uzyskane wyniki dowodzą poprawnego działania zaproponowanego podejścia dla kolejnych etapów propagacji pęknięcia oraz różnych konfiguracji eksperymentalnych. Porównanie względem ręcznych pomiarów, wskazuje, że średni błąd bezwzględny lokalizacji wierzchołka pęknięcia jest w większości przypadków mniejszy lub bardzo zbliżony do rozdzielczości pomiarowej ręcznego pomiaru. Ponadto porównano działanie metody dla różnych wartości jej parametrów, potwierdzając jej poprawne funkcjonowanie bez konieczności ich precyzyjnego dopasowania. Zaproponowana procedura, przy nieznacznym działaniu operatora systemu oraz zastosowaniu sprzętu amatorskiego, zapewnia interpretowalne wyniki, co w przyszłości może pozwolić na jej integrację z procesami monitoringu strukturalnego i badaniami nieniszczącymi.

Spis treści

Streszczenie	1
1 Wprowadzenie i motywacja badań	3
2 Cel, teza i zakres rozprawy	4
2.1 Cel rozprawy	4
2.2 Teza rozprawy	4
2.3 Zakres i struktura rozprawy	4
3 Autorskie elementy zaproponowanej metody	6
3.1 Metryka LOI	6
3.2 Mapy amplitudowe	6
3.3 Procedura lokalizacji wierzchołka pęknięcia	7
4 Najważniejsze wyniki i walidacja metody	10
4.1 Wizualizacja aktywności pęknięcia zmęczeniowego	10
4.2 Automatyczna lokalizacja wierzchołka pęknięcia	11
4.3 Wyniki dla nagrania ze smartfona	12
5 Podsumowanie i wnioski	14
Publikacje związane z rozprawą	15

1. Wprowadzenie i motywacja badań

Pęknięcia zmęczeniowe stanowią jedną z głównych przyczyn degradacji oraz uszkodzeń metalowych struktur inżynierskich. Problem ten ma szczególne znaczenie w przypadku konstrukcji o wysokich wymaganiach bezpieczeństwa i niezawodności, takich jak elementy lotnicze. Z tego względu istotnym zagadnieniem pozostaje wczesna identyfikacja oraz ocena rozwoju pęknięć zmęczeniowych, umożliwiającą podejmowanie racjonalnych decyzji eksploatacyjnych i serwisowych.

W praktyce inżynierskiej stosowane są różnorodne metody badań nieniszczących, jednak wiele z nich charakteryzuje się ograniczeniami wynikającymi z konieczności kontaktu z badanym obiektem, punkowego charakteru pomiaru, a także ograniczonej możliwości automatyzacji. Jedną z rozwijanych grup technik diagnostycznych są podejścia oparte na wizji komputerowej, w tym metody wykorzystujące uczenie maszynowe i głębokie sieci neuronowe, które wykazują dużą skuteczność w zadaniach detekcji pęknięć. Jednocześnie podejścia te często wymagają obszernych zbiorów danych uczących, są wrażliwe na zmienność warunków akwizycji oraz charakteryzują się ograniczoną interpretowalnością wyników, co utrudnia ich bezpośrednią integrację z praktyką diagnostyczną.

Wizja komputerowa oferuje jednak szerszy potencjał diagnostyczny wykraczający poza analizę statycznych obrazów powierzchni. Sekwencje wideo zawierają informacje o ruchu powierzchni struktury, który w warunkach wymuszenia okresowego może być informatywny diagnostycznie. W szczególności zjawisko cyklicznego otwierania i zamykania się pęknięcia zmęczeniowego prowadzi do charakterystycznych, lokalnych zmian pola przemieszczeń. Analiza ruchu powierzchni stwarza możliwość powiązania obserwowanych sygnałów wizyjnych z fizycznym mechanizmem rozwoju pęknięcia.

Motywacją do podjęcia badań była zatem potrzeba opracowania podejścia diagnostycznego, które z jednej strony wykorzystuje potencjał analizy danych wizyjnych, a z drugiej pozostaje zgodne z wymaganiami praktyki inżynierskiej. W szczególności istotne było poszukiwanie rozwiązań umożliwiających bezkontaktową ocenę pęknięć zmęczeniowych, bez konieczności stosowania znaczników wizyjnych oraz przy minimalnych wymaganiach konfiguracyjnych, przy jednoczesnym zachowaniu interpretowalności wyników i możliwości automatyzacji procesu analizy. Tak zarysowane uwarunkowania i potrzeby badawcze stanowią punkt wyjścia do sformułowania celu rozprawy, przedstawionego w kolejnej części autoreferatu.

2. Cel, teza i zakres rozprawy

Niniejsza sekcja przedstawia cel, tezę oraz zakres i strukturę rozprawy.

2.1. Cel rozprawy

Celem niniejszej rozprawy doktorskiej było opracowanie oraz walidacja metody automatycznej oceny pęknięć zmęczeniowych w strukturach metalowych poddanych okresowemu wymuszeniu, opartej na wizji komputerowej i niewymagającej zastosowania znaczników wizyjnych. Metoda ta została zaprojektowana z myślą o integracji z praktyką badań nieniszczących (ang. *Non-Destructive Testing*, NDT) oraz monitoringu strukturalnego (ang. *Structural Health Monitoring*, SHM).

Realizacja tego celu obejmowała zaprojektowanie łańcucha przetwarzania danych, który umożliwia transformację surowych sekwencji wideo w interpretowalne reprezentacje ruchu powierzchni badanej struktury oraz dalszą automatyczną detekcję wierzchołka pęknięcia. Szczególny nacisk położono na zapewnienie bezkontaktowego charakteru metody oraz ograniczenie konieczności ingerencji operatora. Uwzględniono również etap oceny jakości estymacji ruchu, realizowany z wykorzystaniem metryki LOI (ang. *Local Orientation Inconsistency*), wspierający wybór obszaru analizy w kolejnych etapach przetwarzania.

Dodatkowym celem było przeprowadzenie oceny przydatności zaproponowanej metody przy zastosowaniu różnych konfiguracji pomiarowych i systemów akwizycji obrazu, w tym kamery smartfona jako urządzenia o ograniczonych parametrach rejestracji.

2.2. Teza rozprawy

W rozprawie przyjęto następującą tezę.

Możliwe jest opracowanie bezznacznikowej, opartej na wizji komputerowej metody automatycznej oceny pęknięć zmęczeniowych w strukturach metalowych poddanych okresowemu wymuszeniu, która poprzez analizę przepływu optycznego oraz jego reprezentacji częstotliwościowej umożliwia wizualizację pęknięcia oraz automatyczną lokalizację jego wierzchołka.

Podstawą zaproponowanego podejścia jest wykorzystanie zjawiska cyklicznego otwierania i zamykania się pęknięcia zmęczeniowego pod wpływem wymuszenia okresowego. Zjawisko to prowadzi do lokalnych zmian pola przemieszczeń powierzchni struktury w bezpośrednim otoczeniu pęknięcia względem globalnego ruchu struktury. Analiza w dziedzinie częstotliwości przemieszczeń wyodrębnionych z sekwencji obrazów w postaci gęstego pola przepływu optycznego umożliwia identyfikację obszarów aktywności pęknięcia oraz wskazanie położenia jego wierzchołka.

2.3. Zakres i struktura rozprawy

Rozprawa składa się z dziesięciu rozdziałów.

Rozdział 1 wprowadza w problematykę pracy, pozycjonując ocenę pęknięć zmęczeniowych w metalowych komponentach lotniczych jako istotny aspekt monitoringu strukturalnego i badań nieniszczących, ze szczególnym uwzględnieniem potencjału podejść opartych na danych wizyjnych.

Rozdział 2 zawiera przegląd aktualnego stanu wiedzy w obszarze badań nieniszczących i monitoringu strukturalnego w kontekście detekcji i oceny pęknięć z wykorzystaniem wizji komputerowej. Następnie przedstawia zagadnienia estymacji ruchu, ze szczególnym uwzględnieniem przepływu

optycznego oraz techniki wzmacniania ruchu na nagraniach wideo, co pozwala na identyfikację luki badawczej adresowanej w rozprawie.

Rozdział 3 definiuje cel oraz zakres pracy.

Rozdział 4 opisuje zestawy danych eksperymentalnych wykorzystane w badaniach, w tym różne obiekty oraz systemy akwizycji obrazu, które umożliwiły ocenę metody w zróżnicowanych konfiguracjach pomiarowych.

Rozdział 5 poświęcony jest opracowaniu metryki LOI służącej do oceny jakości estymacji ruchu powierzchni konstrukcji, wykorzystywanej do identyfikacji obszarów o obniżonej wiarygodności danych wizyjnych oraz do wspomaganie dalszej analizy.

Rozdział 6 przedstawia koncepcję i sposób konstrukcji map amplitudowych, które stanowią reprezentację umożliwiającą wizualizację aktywności pęknięcia zmęczeniowego na podstawie analizy ruchu powierzchni struktury w dziedzinie częstotliwości.

Rozdział 7 wprowadza procedurę automatycznej lokalizacji wierzchołka pęknięcia w oparciu o mapy amplitudowe, stanowiącą kluczowy element automatyzacji oceny pęknięć w zaproponowanym łańcuchu przetwarzania.

Rozdział 8 prezentuje walidację kompletnego podejścia na strukturze płytowej będącej próbką lotniczą, obejmującą analizę wpływu konfiguracji pomiarowych, parametrów metody oraz rodzaju systemu akwizycji obrazu, w tym kamery smartfona.

Rozdział 9 zawiera dyskusję uzyskanych wyników oraz omówienie ograniczeń zaproponowanej metody w kontekście potencjalnych zastosowań oraz możliwych kierunków dalszych badań.

Rozdział 10 podsumowuje rozprawę i wskazuje główne wnioski.

3. Autorskie elementy zaproponowanej metody

W niniejszej sekcji przedstawiono kluczowe, autorskie elementy zaproponowanej metody automatycznej oceny pęknięć zmęczeniowych, które wspólnie tworzą spójny łańcuch przetwarzania danych wizyjnych. Poszczególne podrozdziały odpowiadają kolejnym etapom tego łańcucha: od oceny jakości estymacji ruchu powierzchni struktury, poprzez konstrukcję reprezentacji umożliwiającej wizualizację aktywności pęknięcia, aż po automatyczną lokalizację jego wierzchołka.

3.1. Metryka LOI

Istotnym wyzwaniem w analizie ruchu powierzchni struktury na podstawie sekwencji obrazów jest niejednorodna jakość estymacji przepływu optycznego. W praktyce dokładność estymacji ruchu silnie zależy od lokalnych właściwości obrazów wynikających między innymi z obecności lub braku odpowiedniej tekstury, refleksyjności powierzchni oraz warunków oświetleniowych, co prowadzi do występowania obszarów o ograniczonej wiarygodności estymowanego ruchu. Aspekt ten jest istotny w kontekście dalszej analizy, ponieważ błędy estymacji ruchu mogą wpływać na kolejne etapy przetwarzania i zaburzać wyniki.

W celu oceny jakości estymacji ruchu zaproponowano autorską metrykę LOI, opartą na analizie lokalnej spójności orientacji wektorów przepływu optycznego. W obszarach, w których estymacja ruchu jest wiarygodna, orientacje wektorów przepływu w sąsiednich pikselach wykazują niewielką zmienność, co odpowiada spójnemu ruchowi powierzchni obiektu. Natomiast w obszarach obciążonych błędami estymacji kierunki ruchu poszczególnych pikseli ulegają znacznym zaburzeniom. Wartości metryki LOI umożliwiają zatem intuicyjną interpretację jakości estymacji ruchu.

Metryka LOI pełni w zaproponowanej metodzie funkcję wspierającą dalsze etapy analizy. Wykorzystywana jest do identyfikacji i maskowania obszarów o obniżonej wiarygodności estymacji ruchu, a także do wspomaganie wyboru obszarów analizy, w których możliwe jest przeprowadzenie dalszego przetwarzania z zachowaniem odpowiedniej jakości danych. W ten sposób LOI stanowi etap poprzedzający konstrukcję map amplitudowych i ułatwia realizację kolejnych elementów łańcucha przetwarzania.

3.2. Mapy amplitudowe

Podstawą wizualnej identyfikacji pęknięć zmęczeniowych w zaproponowanej metodzie jest wykorzystanie zjawiska cyklicznego otwierania i zamykania się pęknięcia pod wpływem wymuszenia okresowego. Zjawisko to prowadzi do lokalnych zmian pola przemieszczeń powierzchni struktury w bezpośrednim otoczeniu pęknięcia, które różnią się od globalnego ruchu struktury. Informacja ta jest obecna w sekwencjach obrazów, jednak jej bezpośrednia interpretacja w dziedzinie czasu jest utrudniona.

W celu wydobycia i uporządkowania informacji związanej z charakterystyką ruchu wywołwanego poprzez pęknięcie zaproponowano reprezentację danych w postaci map amplitudowych. Ogólny schemat ich konstrukcji przedstawiono na rys. 1. Reprezentacja ta powstaje poprzez analizę czasowych przebiegów estymowanego przepływu optycznego w dziedzinie częstotliwości i pozwala na wyodrębnienie składowych ruchu związanych z częstotliwością wymuszenia. W efekcie możliwe jest uzyskanie przestrzennej mapy, która w sposób interpretowalny przedstawia obszary powierzchni

struktury charakteryzujące się odmiennym ruchem wynikającym z obecności pęknięcia.

Mapy amplitudowe mogą być konstruowane na dwa sposoby. Po pierwsze, mogą być wyznaczone na podstawie modułu przepływu optycznego, a zatem niezależnie od kierunku wektora w danym punkcie obrazu. Po drugie, mogą być wyznaczone na podstawie wybranej składowej kierunkowej przepływu optycznego (np. pionowej lub poziomej), co pozwala uwydatnić charakterystyczne wzorce ruchu związane z obecnością pęknięcia.

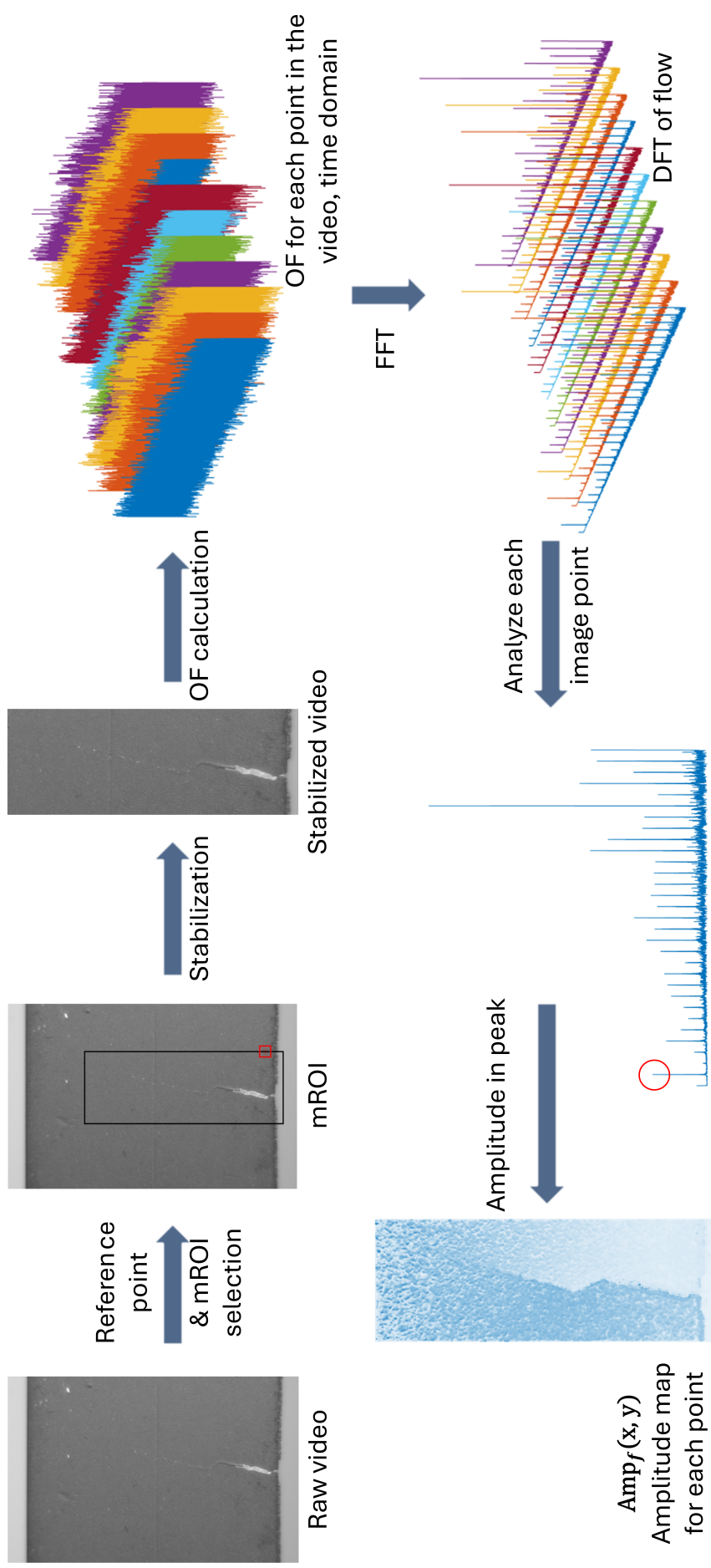
Mapy amplitudowe stanowią kluczowy element zaproponowanego łańcucha przetwarzania. Umożliwiają one wizualizację aktywności pęknięcia zmęczeniowego w sposób odporny na globalny ruch konstrukcji dzięki jego kompensacji na etapie wstępnego przetwarzania danych. Jednocześnie mapy te stanowią podstawę dalszej automatycznej analizy, w szczególności procedury lokalizacji wierzchołka pęknięcia. W ramach rozprawy przeanalizowano również wpływ zastosowania wzmocnienia ruchu (ang. *motion magnification*) w sekwencjach wideo na czytelność map amplitudowych, wskazując zarówno warunki, w których technika ta może poprawiać wizualizację aktywności pęknięcia, jak i jej ograniczenia.

3.3. Procedura lokalizacji wierzchołka pęknięcia

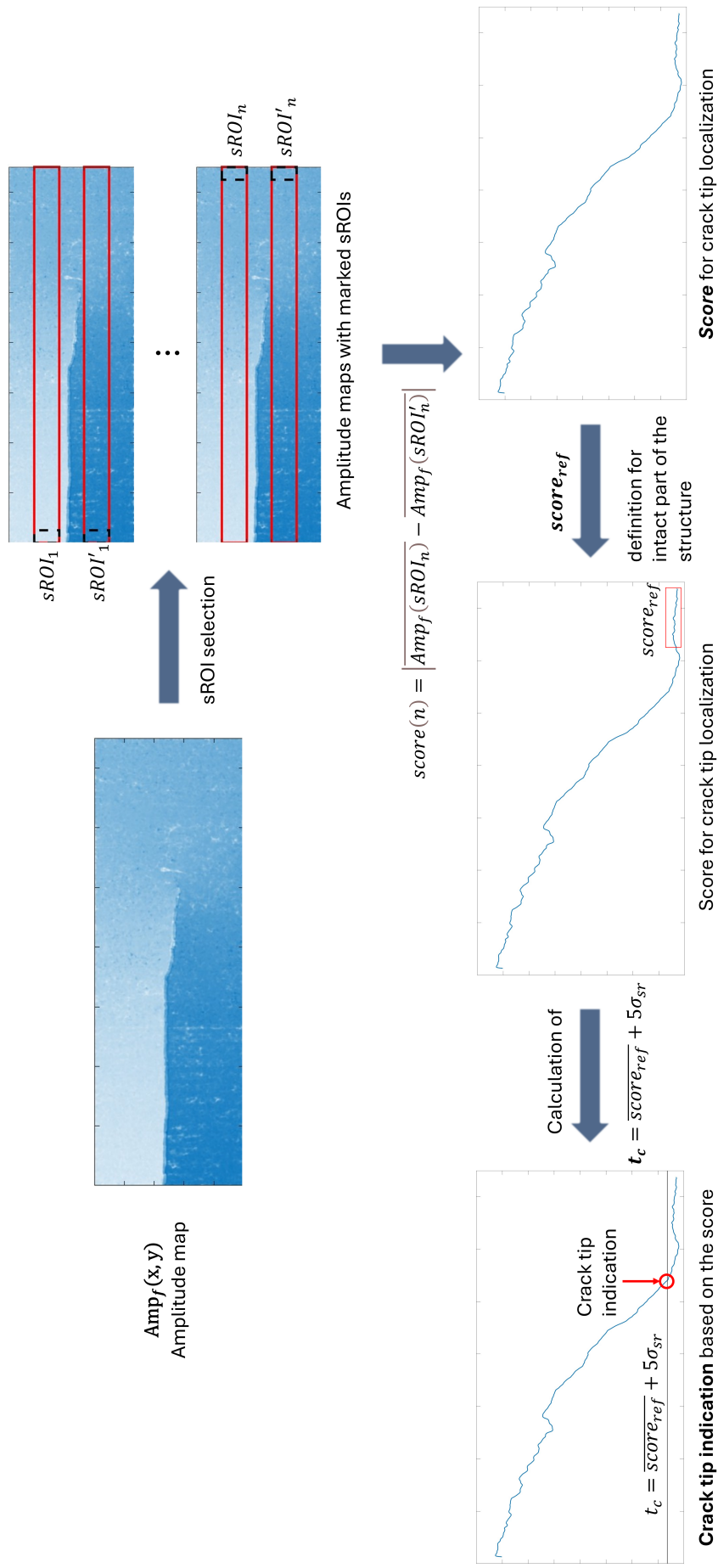
Mapy amplitudowe umożliwiają czytelną wizualizację aktywności pęknięcia zmęczeniowego, jednak ich interpretacja w postaci ręcznej analizy obrazu nie zapewnia pełnej automatyzacji procesu diagnostycznego. W szczególności, w kontekście praktycznych zastosowań, istotne jest jednoznaczne i powtarzalne wyznaczenie położenia wierzchołka pęknięcia bez konieczności subiektywnej oceny operatora.

W tym celu zaproponowano procedurę automatycznej lokalizacji wierzchołka pęknięcia, opartą na analizie przestrzennych zmian wzorca ruchu widocznego na mapach amplitudowych. Procedura, której ogólny schemat przedstawiono na rys. 2, wykorzystuje fakt, że obecność pęknięcia prowadzi do charakterystycznej zmiany rozkładu amplitudy względnego ruchu. Umożliwia to identyfikację obszaru przejścia pomiędzy strefą nieuszkodzoną a strefą aktywności pęknięcia.

Procedura lokalizacji wierzchołka pęknięcia stanowi końcowy etap zaproponowanego łańcucha przetwarzania danych wizyjnych. Umożliwia ona przejście od wizualnej reprezentacji aktywności pęknięcia do jednoznacznej informacji diagnostycznej, domykając proces automatycznej oceny pęknięć zmęczeniowych i realizując kluczowy element celu rozprawy.



Rysunek 1: Schemat konstrukcji map amplitudowych. Proces rozpoczyna się od oryginalnej sekwencji wideo, w której wybierany jest punkt odniesienia oraz obszar analizy (ang. *Measurement Region of Interest*, mROI), dla których przeprowadzana jest stabilizacja obrazu w celu kompensacji ruchu globalnego. Następnie dla każdego piksela sekwencji po stabilizacji wyznaczany jest przepływ optyczny. Otrzymane przebiegi przepływu optycznego w poszczególnych punktach obrazu traktowane są jako szeregi czasowe, które poddawane są transformacji Fouriera. Amplituda składowej odpowiadającej częstotliwości wymuszenia wykończona jest następnie do konstrukcji nowej reprezentacji graficznej w postaci mapy amplitudowej.

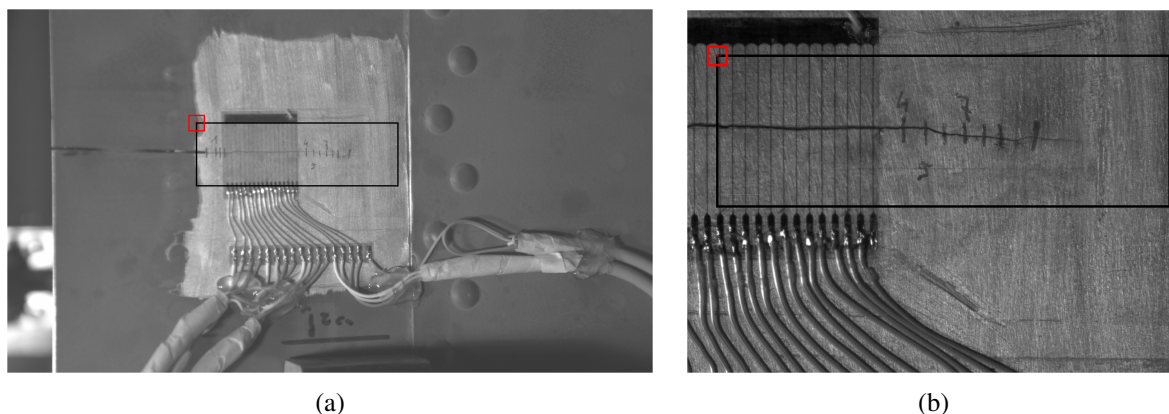


Rysunek 2: Schemat procedury automatycznej lokalizacji wierzchołka pęknięcia z wykorzystaniem map amplitudowych. Wzdłuż krawędzi mapy amplitudowej przemierzane są pary lokalnych obszarów analizy (ang. *Scoring Region of Interest*, sROI), co umożliwia porównanie poziomów amplitudy względnego ruchu. Dla każdej pary obliczana jest wartość miary w postaci bezwzględnej różnicy wartości średnich wewnątrz porównywanych obszarów. Następnie, na podstawie progu wyznaczonego w obszarze referencyjnym wolnym od pęknięcia, realizowana jest automatyczna lokalizacja położenia wierzchołka pęknięcia.

4. Najważniejsze wyniki i walidacja metody

W rozprawie wykorzystano dane pozyskane z trzech niezależnych eksperymentów o zróżnicowanym charakterze. Dwa pierwsze z nich, wykorzystujące kompresor oraz belkę wspornikową, posłużyły do opracowania oraz weryfikacji poszczególnych elementów zaproponowanej metody. Eksperyment z kompresorem został wykorzystany do opracowania metryki LOI, natomiast badania belki wspornikowej stanowiły podstawę do rozwoju metody analizy pęknięć zmęczeniowych opartej na mapach amplitudowych. Trzeci eksperyment, przeprowadzony na strukturze płytowej będącej próbką lotniczą, został wykorzystany jako eksperyment walidacyjny. Z uwagi na syntetyczny charakter autoreferatu, prezentacja wyników została ograniczona do tego eksperymentu, który w sposób najbardziej kompletny ilustruje możliwości i ograniczenia zaproponowanej metody.

Analiza wyników została oparta na sekwencjach wideo rejestrowanych z dwóch niezależnych kamer, przy czym dalsze przetwarzanie danych wizyjnych ograniczono do zdefiniowanego obszaru analizy. Przykładowe klatki nagrań wideo wraz z zaznaczonym obszarem analizy oraz elementami wykorzystywanymi na etapie wstępnego przetwarzania danych przedstawiono na rys. 3.

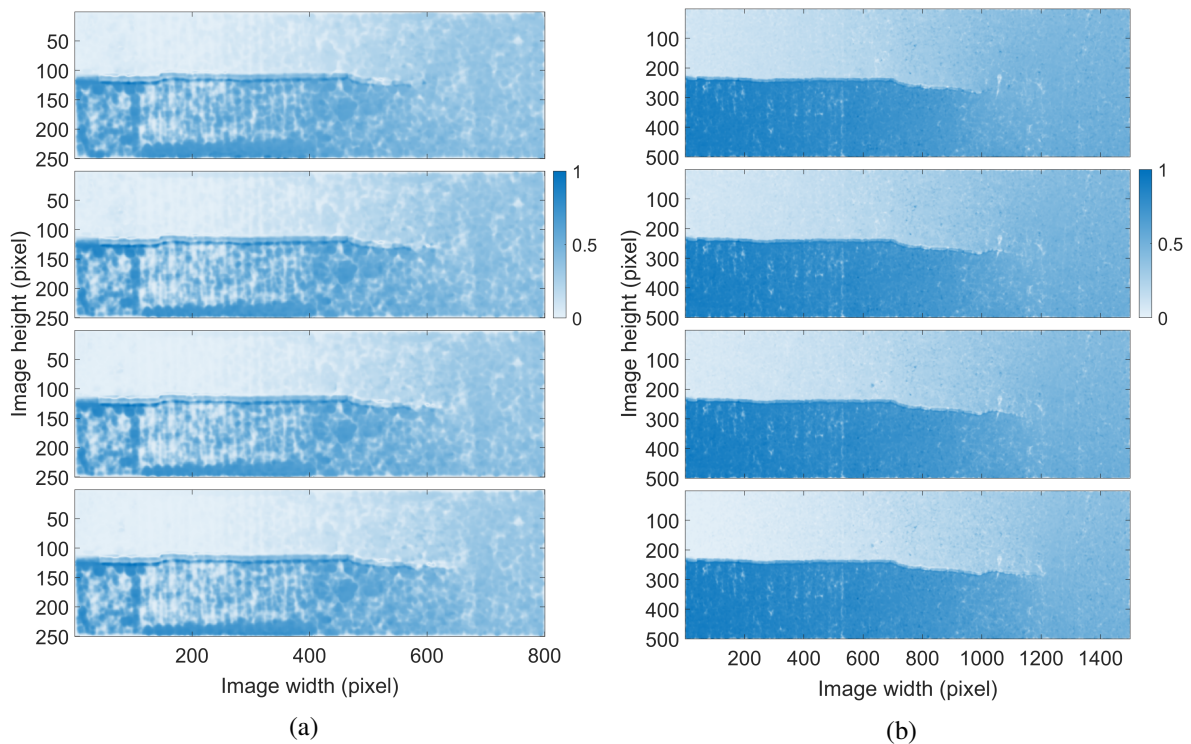


Rysunek 3: Przykładowe klatki nagrań wideo z eksperymentu na strukturze płytowej z zaznaczonym obszarem analizy (mROI) w postaci czarnego prostokąta. Czerwony kwadrat oznacza obszar szablonu wykorzystanego do stabilizacji obrazu, natomiast czerwona gwiazdka wskazuje punkt odniesienia. (a) Widok z pierwszej kamery, (b) widok z drugiej kamery.

4.1. Wizualizacja aktywności pęknięcia zmęczeniowego

Kierunkowe mapy amplitudowe uzyskane dla struktury płytowej przedstawiono na rys. 4. Zaprezentowano wyniki dla czterech kolejnych etapów propagacji pęknięcia, zarejestrowane niezależnie przez dwie kamery. Widoczne na mapach obszary podwyższonej amplitudy odpowiadają strefie aktywności pęknięcia i wyraźnie odróżniają się od pozostałej części powierzchni struktury, dla której obserwowany względny ruch ma charakter bardziej jednorodny (prawa część obrazów).

Istotną cechą uzyskanych map jest ich interpretowalność z punktu widzenia oceny inżynierskiej. Granica pomiędzy obszarem nieuszkodzonym a strefą aktywności pęknięcia jest wyraźnie zaznaczona i zachowuje spójność pomiędzy kolejnymi etapami propagacji oraz pomiędzy oboma widokami kamery. Uzyskane wyniki potwierdzają, że mapy amplitudowe stanowią skuteczną reprezentację do wizualnej identyfikacji pęknięć zmęczeniowych i tworzą solidną podstawę do dalszej, w pełni automatycznej analizy.



Rysunek 4: Kierunkowe mapy amplitudowe składowej pionowej przepływu optycznego uzyskane w eksperymencie na strukturze płytowej dla czterech etapów propagacji pęknięcia, ze skalowaniem wartości do zakresu $[0, 1]$: (a) widok z pierwszej kamery, (b) widok z drugiej kamery.

4.2. Automatyczna lokalizacja wierzchołka pęknięcia

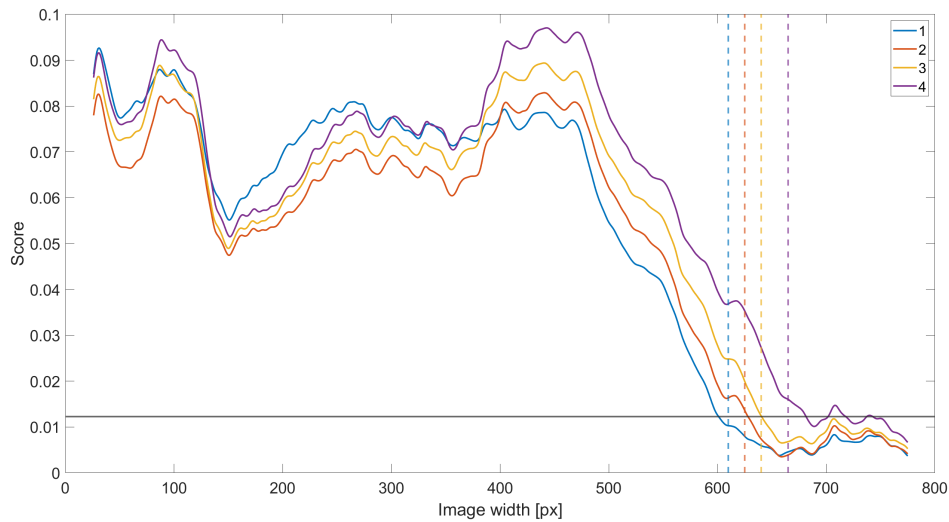
Na podstawie map amplitudowych możliwe było przejście od wizualnej identyfikacji aktywności pęknięcia do lokalizacji jego wierzchołka. W tym celu zastosowano procedurę analizy przestrzennej zmian wzorca ruchu, prowadzącą do wyznaczenia miary ilościowej opisującej różnicę amplitudy względnego ruchu po obu stronach potencjalnej strefy pęknięcia.

Wartości miary wyznaczone dla kolejnych etapów propagacji pęknięcia przedstawiono na rys. 5 dla obu widoków kamery. Charakterystyczny przebieg miary obejmuje obszar o niskich i stabilnych wartościach w strefie nieuszkodzonej oraz wyraźny wzrost odpowiadający obszarowi aktywności pęknięcia. Próg decyzyjny, wyznaczony na podstawie obszaru referencyjnego wolnego od pęknięcia, umożliwia jednoznaczne wskazanie położenia wierzchołka pęknięcia bez konieczności ingerencji operatora.

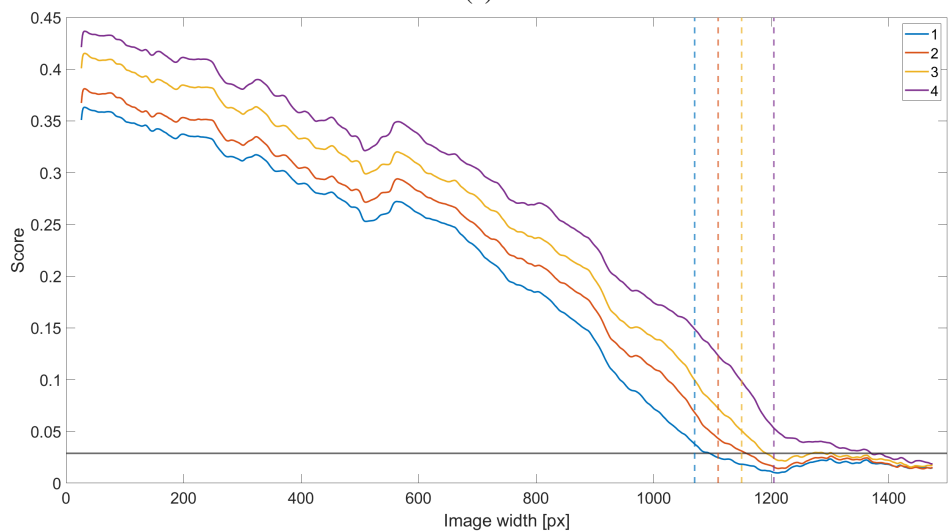
Przedstawione wykresy miary wykazują spójność charakterystycznych cech przebiegu pomiędzy kolejnymi etapami propagacji pęknięcia oraz pomiędzy oboma widokami kamery, co potwierdza stabilność i powtarzalność zaproponowanej procedury lokalizacji.

Dokładność automatycznej lokalizacji wierzchołka pęknięcia oceniono poprzez porównanie wyników metody z ręcznym pomiarem. Średni błąd bezwzględny lokalizacji, dla różnych konfiguracji pomiarowych i etapów propagacji pęknięcia, w większości przypadków utrzymywał się na poziomie poniżej lub około 1 mm, co odpowiada rozdzielczości pomiaru referencyjnego.

Wyniki te stanowią bezpośrednie potwierdzenie możliwości automatycznego wyznaczania położenia wierzchołka pęknięcia na podstawie danych wizyjnych i domykają proces diagnostyczny zaproponowany w rozprawie.



(a)



(b)

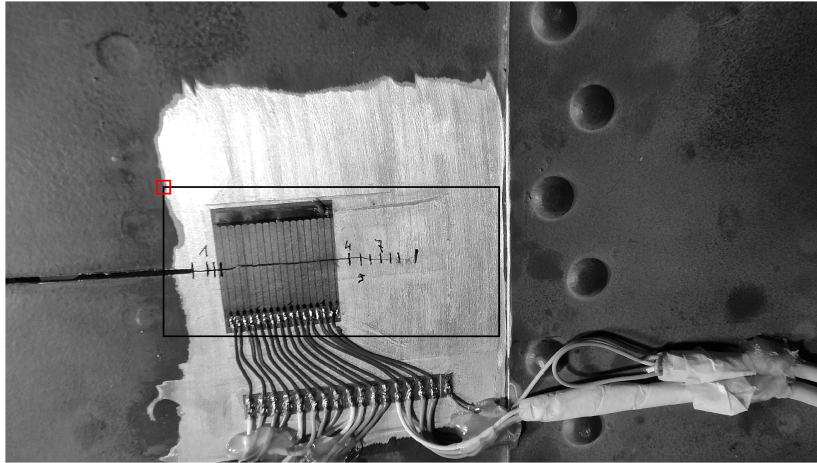
Rysunek 5: Wartości miary wyznaczone dla: (a) pierwszej kamery, (b) drugiej kamery. Linia pozioma oznacza próg decyzyjny wyznaczony na podstawie obszaru referencyjnego wolnego od pęknięcia. Pionowe linie przerywane wskazują przybliżone położenia wierzchołka pęknięcia dla kolejnych etapów jego propagacji.

4.3. Wyniki dla nagrania ze smartfona

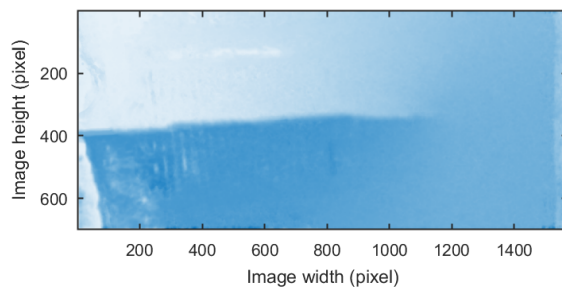
W celu oceny odporności zaproponowanej metody na jakość danych wejściowych przeprowadzono analizę z wykorzystaniem nagrania wideo z kamery smartfona. Pomimo ograniczonych parametrów rejestracji obrazu w porównaniu do kamer profesjonalnych, uzyskane wyniki potwierdzają możliwość skutecznego zastosowania pełnego łańcucha przetwarzania również w takich warunkach.

Przykładowe rezultaty przedstawiono na rys. 6. Kierunkowa mapa amplitudowa wyznaczona na podstawie danych ze smartfona umożliwia identyfikację obszaru aktywności pęknięcia, a przebieg miary lokalizacyjnej zachowuje charakterystyczną strukturę pozwalającą na jednoznaczne i poprawne wskazanie położenia wierzchołka pęknięcia. Wyniki te pozostają spójne z obserwacjami uzyskanymi dla danych z kamer profesjonalnych.

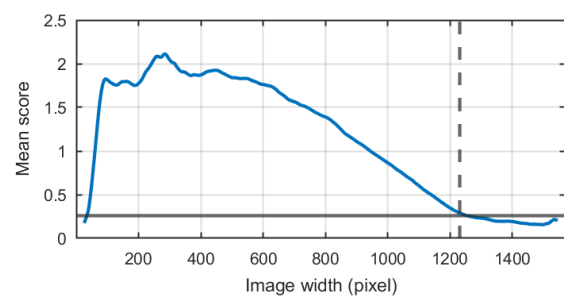
Przeprowadzona analiza wskazuje, że zaproponowana metoda nie jest ograniczona do specja-



(a)



(b)



(c)

Rysunek 6: Wyniki uzyskane z wykorzystaniem nagrania wideo z kamery smartfona, przedstawione dla drugiego etapu propagacji pęknięcia: (a) przykładowa klatka wideo z zaznaczonym obszarem analizy (mROI) w postaci czarnego prostokąta. Czerwony kwadrat oznacza obszar szablonu wykorzystanego do stabilizacji obrazu, natomiast czerwona gwiazdka wskazuje punkt odniesienia. (b) Kierunkowa mapa amplitudowa składowej pionowej przepływu optycznego; (c) wartości miary wyznaczonej wzdłuż analizowanego obszaru, umożliwiające automatyczną lokalizację położenia wierzchołka pęknięcia. Linia pozioma oznacza próg decyzyjny wyznaczony na podstawie obszaru referencyjnego wolnego od pęknięcia, natomiast linia pionowa przerywana wskazuje przybliżone położenie wierzchołka pęknięcia.

listycznych systemów akwizycji obrazu i może być stosowana z wykorzystaniem urządzeń konsumenckich. Zwiększa to potencjał jej zastosowania w kontekście wstępnej oceny stanu technicznego struktur inżynierskich oraz jako uzupełnienie klasycznych procedur diagnostycznych, przy zachowaniu interpretowalności wyników.

5. Podsumowanie i wnioski

Opracowane rozwiązanie stanowi realizację celu rozprawy oraz pozwala na pozytywną weryfikację postawionej tezy. Wykazano, że możliwe jest opracowanie bezznacznikowej, opartej na wizji komputerowej metody automatycznej oceny pęknięć zmęczeniowych w strukturach metalowych poddanych okresowemu wymuszeniu, umożliwiającej zarówno wizualizację aktywności pęknięcia, jak i jednoznaczą lokalizację jego wierzchołka.

Najważniejszym elementem pracy jest zaproponowanie spójnego łańcucha przetwarzania danych wizyjnych, który integruje estymację ruchu powierzchni struktury, analizę w dziedzinie częstotliwości oraz procedurę automatycznej lokalizacji wierzchołka pęknięcia. Kluczową rolę w tym podejściu odgrywają mapy amplitudowe, stanowiące interpretowalną reprezentację zjawiska cyklicznego otwierania i zamykania się pęknięcia. Uzupełnieniem zaproponowanego rozwiązania jest procedura automatycznej analizy różnic we wzorcu względnego ruchu poszczególnych obszarów badanej struktury, pozwalająca na przejście od obserwacji wizualnej do jednoznacznej informacji diagnostycznej poprzez wskazanie położenia wierzchołka pęknięcia. Metryka LOI pełni w tym kontekście rolę elementu wspierającego, umożliwiającego kontrolę jakości estymacji ruchu i ukierunkowującego dalsze przetwarzanie.

Istotnym aspektem zaproponowanej metody jest interpretowalność rezultatów jej działania. Wykorzystanie analizy ruchu powierzchni struktury umożliwia powiązanie obserwowanych rezultatów z fizycznym wpływem pęknięcia. Ograniczenie konieczności ingerencji operatora oraz brak wymogu stosowania znaczników wizyjnych zwiększają potencjał integracji metody z praktyką badań nieniszczących oraz monitoringu strukturalnego.

Przeprowadzona walidacja wykazała, że zaproponowane podejście zachowuje spójność wyników dla różnych konfiguracji pomiarowych i parametrycznych oraz systemów akwizycji obrazu. W szczególności potwierdzono możliwość jego zastosowania również w przypadku danych pozyskanych z kamery smartfona, co wskazuje na odporność metody na ograniczoną jakość danych wejściowych oraz jej potencjał wykorzystania w warunkach eksploatacyjnych.

Jednocześnie należy podkreślić, że skuteczność zaproponowanej metody jest związana z obecnością okresowego wymuszenia prowadzącego do cyklicznej aktywności pęknięcia oraz z możliwością obserwacji ruchu powierzchni struktury. Naturalnymi kierunkami dalszych badań są rozszerzenie analizy na bardziej złożone geometrie badanych obiektów oraz dalsza automatyzacja i integracja z procedurami diagnostycznymi.

Najważniejsze osiągnięcia rozprawy

- Sformułowanie map amplitudowych na podstawie szeregów czasowych gęstego przepływu optycznego w celu wizualizacji zjawiska cyklicznego otwierania i zamykania się pęknięcia.
- Opracowanie procedury automatycznej lokalizacji wierzchołka pęknięcia na podstawie map amplitudowych.
- Zaproponowanie metryki LOI jako interpretowalnego wskaźnika wiarygodności estymacji ruchu, umożliwiającego maskowanie obszarów niepewnych oraz wspomaganie wyboru obszaru analizy.

- Analiza wpływu wzmacniania ruchu w sekwencjach wideo na informatywność map amplitudowych i wizualizację pęknięcia.
- Studium przypadku demonstrujące zaproponowane podejście na strukturze płytowej będącej próbką lotniczą, w tym z wykorzystaniem nagrań z kamery smartfona.

Publikacje związane z rozprawą

Adam Machynia, Ziemowit Dworakowski, Kajetan Dziedzic, Michał Dziendzikowski, Krzysztof Holak, **Vision-based automatic fatigue crack visualization and assessment in metallic structures**, *Measurement*, Volume 257, Part A, 2026,

Jakub Spytek, Adam Machynia, Kajetan Dziedzic, Ziemowit Dworakowski, and Krzysztof Holak. **Novelty detection approach for the monitoring of structural vibrations using vision-based mean frequency maps**. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 185, 2023.