

ZASTOSOWANIE SYSTEMU WIZYJNEGO DO DETEKcji I LOKALIZACJI USZKODZEŃPiotr KUROWSKI¹, Piotr KOHUT²¹Katedra Robotyki i Dynamiki Maszyn
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
kurowski@agh.edu.pl²Katedra Robotyki i Dynamiki Maszyn
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
pko@agh.edu.pl**Streszczenie**

W artykule zostały zaprezentowane możliwości wykorzystania systemu wizyjnego, który w połączeniu z narzędziami do przeprowadzenia analizy modalnej pozwala na detekcję i lokalizację uszkodzenia. Główna idea proponowanego rozwiązania polega na zastosowaniu pomiaru drgań przy pomocy systemu wizyjnego, zbudowaniu modelu modalnego oraz wykorzystaniu metod energetycznych opartych o analizę przebiegu postaci drgań do detekcji uszkodzenia. Podstawowy problem, jaki należało rozwiązać w proponowanym systemie było uzyskanie globalnych postaci drgań na podstawie sklepania postaci częściowych. Utworzone w ramach pracy algorytmy zostały zaimplementowane i przetestowane w środowisku programowym MATLAB jako funkcje rozwijanego w KRiDM AGH narzędzia do analizy modalnej VIOMA.

Słowa kluczowe: analiza modalna, analiza i przetwarzanie obrazów, metody energetyczne.

VISION BASED SYSTEM FOR SHM APPLICATION**Summary**

In the paper possibilities of the application of vision techniques connected with modal analysis for damage detection and localization are presented. The main idea of the proposed solution relies on vibration registering by means of a vision system, modal experiment realization and energy method using. The key feature of this new solution is that global mode shapes are obtained by partial mode shapes sticking together. Developed algorithms (for image processing and modal experiment realization) were implemented and tested in programming environment MATLAB in which by means of developed in KRiDM AGH software – VIOMA – modal experiment was carried out.

Keywords: modal analysis, image processing and analysis, energy methods.

1. WPROWADZENIE

Użyteczność metod diagnostycznych opartych na modelu (a w szczególności modelu modalnym) i służących do detekcji i lokalizacji uszkodzeń została wielokrotnie potwierdzona w literaturze [8]. W klasycznym podejściu zastosowanie takich metod jest jednak stosunkowo pracochłonne i czasochłonne. Chodzi tutaj głównie o etap gromadzenia danych pomiarowych. Dla potrzeb diagnozowania pracy urządzenia konieczne jest posiadanie modelu badanego urządzenia w co najmniej dwóch stanach jego pracy – nieuszkodzonym oraz w momencie, w którym możliwa jest detekcja symptomu związanego z pojawiającym się uszkodzeniem. Sytuacja taka wymusza konieczność kilkakrotnego powtarzania eksperymentu pomiarowego. Z drugiej strony wiadomo, iż model modalny dla poprawnego odwzorowania zachowania badanego obiektu wymaga wielu punktów pomiarowych rozłożonych na całej konstrukcji. Proces budowy modelu modalnego przebiega w kilku etapach:

- planowanie eksperymentu,

- zgromadzenie niezbędnych danych,
- wykonanie analiz – zbudowanie modelu modalnego,
- walidacja modelu.

W przypadku zastosowań diagnostycznych proces planowania eksperymentu wykonywany jest jednokrotnie. Polega on na przygotowaniu sieci punktów pomiarowych, w których niezbędne jest zebranie przebiegu drgań, zbudowanie modelu geometrycznego urządzenia, wybranie punktów referencyjnych. Najbardziej czasochłonny etap związany jest ze zgromadzeniem danych pomiarowych i ich archiwizacją. Kolejne etapy, związane z budową modelu modalnego oraz jego walidacją, mogą zostać w dużej mierze zautomatyzowane, dlatego czas potrzebny do ich wykonania jest proporcjonalnie niewielki.

Zamiarem autorów niniejszego opracowania jest pokazanie iż zastosowanie technik wizyjnego pomiaru drgań w miejsce metod klasycznych daje poprawne wyniki związane z detekcją i lokalizacją pojawiającego się na konstrukcji uszkodzenia, a ponadto pozwala na znaczne skrócenie procesu pomiarowego.

2. METODOLOGIA

Prace wstępne związane z wykorzystaniem technik wizyjnych do pomiaru drgań zostały opublikowane m.in. w [13]. W publikacji tej pokazano, iż prezentowana technika daje dobre rezultaty i może zostać zastosowana dla obiektów o niewielkich rozmiarach. Krytycznym parametrem jest w przypadku tego typu pomiarów rozdzielczość przestrzenna zbieranego obrazu. W przypadku dużych obiektów rozdzielczość przestrzenna jest stosunkowo niska, co w krytycznym przypadku uniemożliwia pomiar drgania. W przypadku pomiarów drgań dużych obiektów konieczne jest zwiększenie tego parametru do poziomu pozwalającego na wyznaczenie przebiegu drgań. Ma to na celu umożliwienie rejestracji przemieszczenia danego punktu pomiarowego na kilku poziomach kwantyzacji przetwornika wizyjnego. Zwiększanie rozdzielczości przestrzennej może zostać zrealizowane na kilka sposobów. Pierwszym sposobem jest poprawa jakości stosowanego przetwornika obrazu. Rozwiązanie to najczęściej nie może być zastosowane z uwagi na koszt. Inną możliwością poprawy rozdzielczości jest podział badanego obiektu na fragmenty. Pomiar drgań wykonywany jest następnie kolejno na każdym z wydzielonych fragmentów. Sytuacja taka bardzo przypomina klasyczny pomiar drgań z wykorzystaniem klasycznych czujników stykowych. Ograniczeniem metody wizyjnej w czasie takiej realizacji pomiarów jest konieczność badania ściśle określonego obszaru, który jest "widziany" przez układ wizyjny. Powoduje to, iż niemożliwe jest, tak jak w przypadku pomiaru z czujnikami stykowymi, zastosowanie jednego punktu referencyjnego, w którym pomiar byłby dokonywany w każdej sesji pomiarowej. Jest to poważne ograniczenie. Jego konsekwencją w trakcie budowania modelu modalnego jest brak możliwości otrzymania kompletnego modelu modalnego dla całej konstrukcji w trakcie jednej analizy. Konieczne staje się, więc wykonanie wielu analiz częściowych i następnie dokonanie ich konsolidacji. Najtrudniejszym etapem konsolidacji jest utworzenie wektora modalnego na podstawie jego składowych otrzymanych w kilku analizach. Ten proces klejenia postaci drgań wymaga dodatkowych zabiegów wstępnych. Każde sklejanie ze sobą części postaci drgania muszą posiadać, co najmniej jeden punkt wspólny. Na podstawie znajomości tych punktów możliwa jest do wykonania normalizacja amplitudy postaci drgania oraz dopasowanie początkowych kątów fazowych. Sklejone postacie drgań mogą zostać następnie wykorzystane w procesie detekcji i lokalizacji uszkodzenia. W artykule w tym celu wykorzystana została metoda energetyczna bazująca na badaniu zmian w przebiegu postaci drgań, a w szczególności drugich pochodnych postaci po współrzędnych, czyli zmian energii odkształcenia związanych z daną postacią i danym uszkodzeniem

konstrukcji. Wyróżnić można tutaj podejście czysto eksperymentalne, w którym energię odkształcenia oblicza się na podstawie zmierzonych postaci drgań oraz eksperymentalno-analityczne, w którym konieczna jest znajomość macierzy sztywności układu. Wskaźnik uszkodzenia, zdefiniowany na podstawie energii odkształcenia w metodzie eksperymentalnej, ma postać:

$$\beta_{ik} = \frac{(\bar{U}_{ik} + \bar{U}_k) \cdot U_k}{(U_{ik} + U_k) \cdot \bar{U}_k} \quad (1)$$

gdzie:

U_{ik} – energia odkształcenia w punkcie i dla k-tej postaci drgań własnych dla konstrukcji nieuszkodzonej,

\bar{U}_{ik} – energia odkształcenia w punkcie i dla k-tej postaci drgań własnych dla konstrukcji uszkodzonej,

U_k – całkowita energia odkształcenia k-tej postaci drgań własnych dla konstrukcji nieuszkodzonej,

\bar{U}_k – całkowita energia odkształcenia k-tej postaci drgań własnych dla konstrukcji uszkodzonej,

Energie odkształcenia danej postaci drgania mogą zostać wyznaczone na podstawie zależności opisanych równaniami:

$$\bar{U}_{ik} = \int_a^b [\bar{\psi}_i(x)]^2 dx \quad \bar{U}_k = \int_0^L [\bar{\psi}(x)]^2 dx$$

$$U_{ik} = \int_a^b [\psi_i(x)]^2 dx \quad U_k = \int_0^L [\psi(x)]^2 dx$$

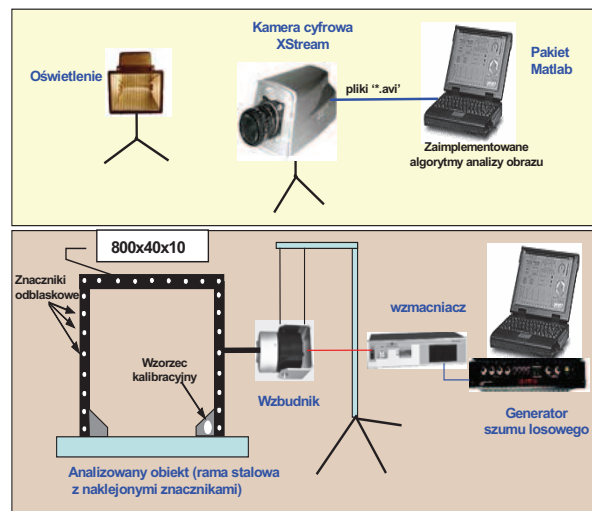
gdzie:

- ψ – wektor modalny dla konstrukcji nieuszkodzonej,
- $\bar{\psi}$ – wektor modalny dla konstrukcji uszkodzonej,
- a i b – granice obszaru, w którym bada się możliwość powstania uszkodzenia,
- L – długość belki,
- x – zmienna całkowania.

Powyższe wzory są spełnione dla konstrukcji belkowych, jednak mogą one być uogólnione na innego rodzaju konstrukcje. W przypadku rozważania więcej niż jednej postaci drgań, wskaźnik uszkodzenia oblicza się jako sumę wskaźników dla rozważanych postaci. W celu uzyskania przebiegu postaci drgań, który można dwukrotnie różniczkować stosuje się aproksymację wielomianową. Takie rozwiązanie prowadzi do bardziej gładkich przebiegów postaci i mniejszych błędów różniczkowania. Konstrukcję uważa się za uszkodzoną, jeśli wskaźnik uszkodzenia różni się znacząco w sensie statystycznym od wartości dla konstrukcji nieuszkodzonej, to jest od wartości 1.

3. EKSPERYMENT

W celu weryfikacji opracowanych algorytmów wykonano testy modalne. Do przeprowadzenia powyższych testów przygotowano stanowisko badawcze zaprezentowane na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat stosowanego układu pomiarowego

Elementy składowe tego stanowiska to:

1) System wizyjny:

- Oświetlenie (halogen 1000W)
- Kamera cyfrowa X-Stream. Pobrane sekwencje obrazów były zapisywane w postaci plików w formacie **.avi*. Kamera cyfrowa X-Stream umożliwia akwizycję danych z częstotliwością ponad 30 000 Hz [www.idtpiv.com].
- Oprogramowanie wykonane w środowisku Matlab

2) Obiekt laboratoryjny

- Górna pozioma część stalowej ramy
- Wzbudnik (sterowany szumem losowym)
- Aparatura sterująca pracą wzbudnika (generator drgań, wzmacniacz sygnału)
- Komputer pomiarowy z oprogramowaniem

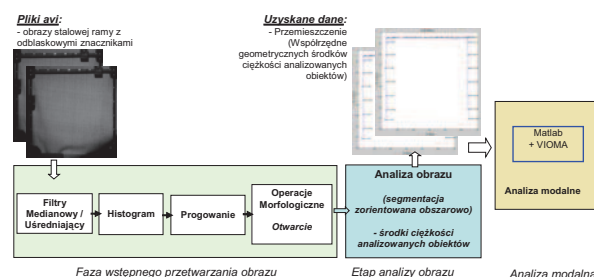
Do zrealizowania przedstawionych powyżej założeń wykonane zostały cztery serie testów. Pierwszy na konstrukcji nieuszkodzonej oraz trzy kolejne dla postępującego uszkodzenia. Uszkodzenie polegało na nacinaniu belki w wybranym punkcie geometrycznym. Głębokość nacięcia dobrana została w taki sposób, aby uzyskać uszkodzenie na poziomach: 12,5% (5 mm), 32,5% (13 mm) oraz 50% (20 mm). Szerokość nacięcia wynosiła 1mm. W trakcie pomiarów drgania badanego obiektu wzbudzane były za pomocą wzbudnika elektrodynamicznego zamocowanego do jednej z podpór rys. 1. Drgania wymuszane były sygnałem szumu losowego.

Przed przystąpieniem do wykonania rejestracji przyjęto następujące założenia:

- badany obiekt podzielony został na cztery nakładające się podobszary,
- dwa sąsiadujące ze sobą podobszary posiadały co najmniej jeden punkt wspólny.

Z punktu widzenia systemu wizyjnego badany obiekt reprezentowany był przez uzyskane z kamery obrazy odblaskowych znaczników naklejonych na konstrukcję. Akwizycji obrazów z częstotliwością 400 Hz oraz rozdzielczością 1260x80 (pikseli) dokonano za pomocą kamery X-Stream. Przy jej pomocy możliwy był również automatyczny zapis pobranych obrazów do pamięci masowej komputera w formacie plików *'avi'*. Pliki te stanowiły dane wejściowe do opracowanych i zaimplementowanych w środowisku programowym Matlab algorytmów i procedur do analizy obrazu (rys. 2). W wyniku ich numerycznej realizacji, dla każdej ramki obrazu obliczano współrzędne geometrycznych środków ciężkości analizowanych obiektów na płaszczyźnie obrazu. Transformacja otrzymanych danych z przestrzeni obrazu (piksele) na jednostki miary SI (milimetry) realizowana była przez opracowany moduł kalibracji.

Ostatecznie wykonane oprogramowanie pozwalało na otrzymanie geometrii analizowanego obiektu oraz na realizację analizy modalnej. Wyniki pomiarów dokonane przy pomocy systemu wizyjnego zostały następnie poddane analizie w przyborniku VIOMA.



Rys. 2. Schemat wykorzystanych przekształceń wchodzących w skład opracowanego algorytmu do analizy obrazu

Dokonano rejestracji danych w ten sposób, że dla każdej sesji związanej z pojedynczym przypadkiem uszkodzenia wykonane zostało 12 rejestracji (cztery podobszary wydzielone na badanym obiekcie, w których rejestracja powtarzana była trzy razy). Dane pomiarowe zebrane za pomocą systemu wizyjnego zostały następnie przekształcone do postaci amplitud przemieszczeń przebiegów drgań. Proces ten polegał na:

- Znormalizowaniu zmierzonych przemieszczeń bezwzględnych,
- Obliczeniu funkcji korelacji do wybranego przebiegu referencyjnego
- Usrednieniu funkcji korelacji względem wszystkich wykonanych sesji pomiarowych (wykonane zostały 3 sesje pomiarowe).

Na podstawie obliczonych funkcje korelacji wyznaczono parametry modalne modeli częściowych. Do wyznaczenia parametrów modalnych wykorzystano operacyjny algorytm BR (ang. Balanced Realization). Analizy w każdym

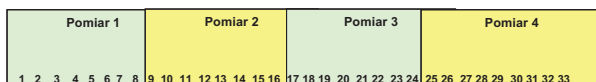
przypadku przeprowadzono w paśmie od 0 – 200Hz.

4. ANALIZA DANYCH POMIAROWYCH

Specyfiką wykonanych pomiarów z wykorzystaniem systemu wizyjnego jest to, iż dostępnych jest kilka eksperymentów częściowych, dla których brakuje wspólnych globalnych punktów referencyjnych. Sytuacja taka powoduje, iż niemożliwa jest przeprowadzenie jednej wspólnej estymacji dającej wyniki globalne. W przypadku tego eksperymentu najbardziej istotne było otrzymanie dobrze odwzorowanych globalnych postaci drgań własnych, ponieważ to one są podstawą dla wyznaczenia wskaźników energetycznych związanych z pojawiającym się uszkodzeniem. Przyjęto następujące założenia:

- Sesje pomiarowe odpowiadające poszczególnym przypadkom uszkodzenia podzielone zostaną na grupy zawierające wspólny punkt (lub punkty).
- Punkty wspólne zostaną potraktowane jako referencyjne w danej analizie.
- Dla każdej grupy zostaną wyestymowane parametry modalne.
- Globalne postacie drgań zostaną „sklejone” z postaci częściowych. Podstawą do sklejenia postaci będą punkty wspólne dostępne na granicach postaci składowych.

W celu zrealizowania przedstawionych założeń dane zebrane za pomocą systemu wizyjnego zostały przekonwertowane do postaci wymaganej przez przybornik VIOMA. Następnie obliczono na podstawie przebiegów czasowych amplitud drgań funkcje korelacji. W związku z przedstawionymi powyżej założeniami konieczne było uzyskanie dwóch niezależnych zestawów funkcji korelacji. Jeden na podstawie pomiarów 1 i 2. Jako referencja wybrany został punkt 9. Drugi zestaw obliczony został na podstawie pomiarów 3 i 4 z wykorzystaniem punktu referencyjnego nr 25. Wykonane zostały analizy modalne dla obydwu zestawów funkcji korelacji. Postacie drgań uzyskane w obydwu analizach zawierały dwa punkty wspólny (nr 17 i 18). Punkty te wykorzystane zostały w dalszej kolejności do połączenia postaci na podstawie postaci częściowych.



Rys. 3. Schemat podziału badanej belki do wykonania pomiarów wizyjnych

Do wykonania estymacji użyto algorytmu BR (ang. Balanced Realisation). Dla każdego przypadku pomiarowego, belki nieuszkodzonej oraz z postępującym uszkodzeniem wykonano po dwie analizy częściowe. Wyniki estymacji przedstawiono w tabelach 1-4. Na rys. 4 pokazano natomiast przykładowe postacie drań przed wykonaniem klejenia.

Tabela 1. Wyniki estymacji parametrów modelu modalnego belki bez uszkodzenia

Bez uszkodzenia			
Część 1		Część 2	
Częst. [Hz]	Tłum. [%]	Częst. [Hz]	Tłum. [%]
11,01	2,42	10,99	2,23
43,96	0,67	43,98	0,73
60,09	1,94	60,02	2,03
122,48	0,54	122,41	0,06
161,50	0,51	161,93	0,68

Zestawione w tabelach wyniki pokazują, iż w badanym zakresie częstotliwości udało się zidentyfikować pięć biegunów i odpowiadającym im postaci drgań. Dodatkowo w analizach związanych z uszkodzeniami 32,5% oraz 50% pojawiło się po jednym dodatkowym biegunie. Zadaniem procesu konsolidacji było dokonanie sprawdzenia czy bieguny te wnoszą dodatkową informację o układzie czy też jest to biegun, który z przyczyn numerycznych znalazł się, dwukrotnie w zestawie wyników.

Tabela 2. Wyniki estymacji parametrów modelu modalnego belki z uszkodzeniem 12,5%

Uszkodzenie 12,5%			
Część 1		Część 2	
Częst. [Hz]	Tłum. [%]	Częst. [Hz]	Tłum. [%]
11,04	2,23	10,98	2,55
44,02	0,70	43,99	0,72
59,86	2,18	59,89	2,23
123,00	0,45	122,95	0,44
162,02	0,47	161,68	0,69

Tabela 3. Wyniki estymacji parametrów modelu modalnego belki z uszkodzeniem 32,5%

Uszkodzenie 32,5%			
Część 1		Część 2	
Częst. [Hz]	Tłum. [%]	Częst. [Hz]	Tłum. [%]
-	-	10,9405	3,2054
11,02	2,4959	10,9953	1,9934
44,0056	0,6311	43,9984	0,7207
59,8728	2,241	59,9576	2,1568
122,6742	0,3322	122,6731	0,7752
161,6822	0,5476	161,2106	0,428

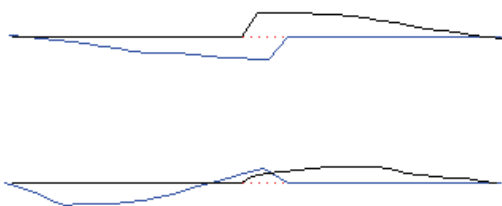
Tabela 4. Wyniki estymacji parametrów modelu modalnego belki z uszkodzeniem 50%

Uszkodzenie 50%			
Część 1		Część 2	
Częst. [Hz]	Tłum. [%]	Częst. [Hz]	Tłum. [%]
10,9875	1,864	10,9286	2,5353
44,0609	0,6917	43,9498	0,7193
59,7634	2,2375	59,7765	2,0612
-	-	122,6687	0,6141
122,8776	0,4271	122,9105	0,6775
160,9004	0,3496	160,7399	0,7892

W przypadku obydwu analiz po konsolidacji okazało się, iż bieguny są nadmiarowe. Bieguny wybrane do procesu sklejanie zostały w odpowiednich tabelach 1 – 4 poukładane wierszowo. Bieguny odrzucone natomiast nie mają par.

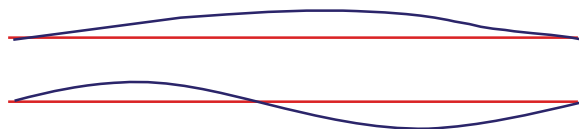
Ważnym spostrzeżeniem związanym z otrzymanymi wynikami analiz jest to, że częstotliwości biegunów oraz współczynniki tłumienia praktycznie nie zmieniają swoich wartości wraz ze wzrostem uszkodzenia zadawanym na badanym obiekcie. Zmiany są na poziomie błędów estymacji i dlatego w przypadku tego obiektu na ich podstawie nie można nic powiedzieć na temat tego, że uszkodzenie w ogóle pojawiło się na badanym obiekcie.

W kolejnym kroku obliczeń przystąpiono do procesu sklejanie postaci drgań. Na rys. 4 przedstawiono po dwie przykładowe postaci drgań otrzymane w wyniku analiz częściowych. Na rysunku tym widać, że fazy początkowe składowych postaci są różne. Dla umożliwienia wizualizacji postaci na jednym wykresie wstępnie dokonano skalowania amplitud. W przypadku ogólnym klejenie musi jednak uwzględnić synchronizację zarówno amplitud jak i faz. Zazwyczaj występuje także konieczność normalizacji postaci przed przystąpieniem do procesu klejenia.



Rys. 4. Przykładowe postaci drgań otrzymane w wyniku estymacji modeli częściowych

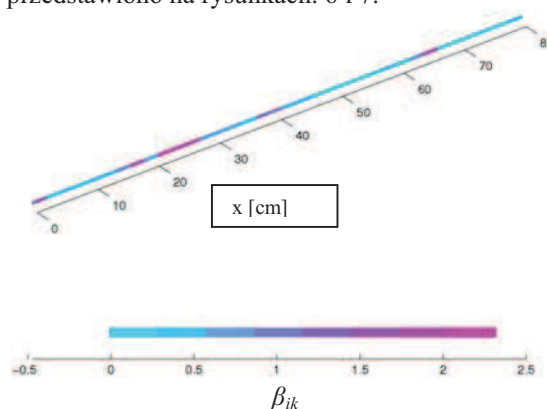
W celu otrzymania postaci globalnych dokonano konsolidacji wyników estymacji a następnie sklejanie składowych postaci drgań (rys. 5.). Jako parametry opisujące bieguny układu przyjęto wartości odpowiadające pierwszej części postaci. Przykładowe wyniki sklejanie postaci przedstawiono w dodatku 1.



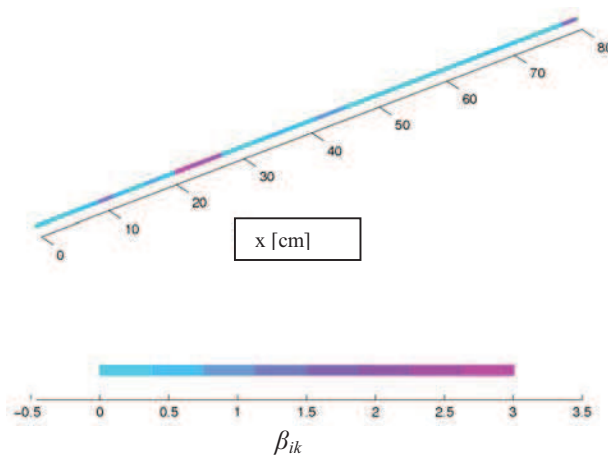
Rys. 5. Przykładowe postaci drgań otrzymane w wyniku sklejanie postaci częściowych

Otrzymane globalne postaci drgań zostały następnie użyte do wyznaczenia wskaźników energetycznych pozwalających na detekcję i lokalizację uszkodzenia. **Przyjmując model geometryczny badanego obiektu jako element belkowy, wskaźniki energetyczne opisane**

równaniem 1 zaimplementowano w środowisku Matlab. Przykładowe wyniki dokonanych obliczeń przedstawiono na rysunkach. 6 i 7.



Rys. 6. Wynik zastosowania metody energetycznej do detekcji i lokalizacji 12,5% uszkodzenia



Rys. 7. Wynik zastosowania metody energetycznej do detekcji i lokalizacji 50% uszkodzenia

Z zaprezentowanych rysunków wynika, iż uszkodzenie wykonane na obiekcie zostało poprawnie zidentyfikowane już dla najmniejszego uszkodzenia badanego obiektu.

5. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Przedstawiony eksperyment pokazuje, iż możliwe jest zastosowanie systemu diagnostycznego opartego na pomiarach drgań metodami wizyjnymi do detekcji i lokalizacji uszkodzenia pojawiającego się na konstrukcji. Problemem, jaki należało rozwiązać była zbyt mała rozdzielczość przestrzenna uzyskiwanego obrazu niepozwalająca na wystarczająco dobre odwzorowanie występujących na badanej konstrukcji drgań.

Rozwiązaniem problemu było zwiększenie rozdzielczości przestrzennej rejestrowanego obrazu kosztem zmniejszenia jego wielkości. Implikowało to konieczność zwiększenia liczby eksperymentów oraz wymusiło potrzebę sklejanie postaci drgań. W kolejnym etapie utworzony został algorytm pozwalający na sklejanie postaci drgań i zastosowanie metody energetycznej do detekcji oraz lokalizacji uszkodzenia na podstawie analizy

globalnych postaci drgań. Z przeprowadzonego doświadczenia wynika, iż przedstawione rozwiązanie pozwoliło na detekcję i lokalizację uszkodzenia, w tym przypadku, większego od 12,5%.

PODZIĘKOWANIE

Praca wspierana przez Komitet Badań Naukowych w ramach grantu nr: 4 T07B 057 26.

LITERATURA

- [1] Freymann R., Honsberg W., Winter F., Steinbichler H., Holographic modal analysis, Laser in Research and Engineering, Springer Verlag Berlin, , 1996, 530-542.
- [2] Heylen W., Lammens S., Sas P. Modal Analysis Theory and Testing. Department of Mechanical Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium, 1995.
- [3] Image Processing Toolbox for use with MATLAB, The MathWorks Inc. ,2002.
- [4] Jahne B., Digital image processing: concepts, algorithms, and scientific application, Springer-Verlag, Berlin, 1995.
- [5] Klette R., Zamperoni P., Handbook of image processing operators, JohnWiley&Sons Ltd., New York, 1996.
- [6] Kohut P., Uhl T., The rapid prototyping of the visual servoing on Matlab/Simulink/dSPACE environment, Proc. of the 7th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje, 28-31 August 2001, 672-677.
- [7] Kurowski P., Identyfikacja modeli modalnych konstrukcji mechanicznych na podstawie pomiarów eksploatacyjnych, Praca doktorska, AGH, Kraków 2001.
- [8] Kurowski P., Uhl T., VIOMA 2.0 – users guide, Dept of Robotics and Machine Dynamics AGH, Krakow 2003.
- [9] Shapiro L., Stockman G., Textbook: Computer vision, Prentice-Hall, 2001.
- [10] Tadeusiewicz R., Vision systems of industrial robots (In Polish), WNT, Warszawa, 1992.
- [11] Uhl T., Computer aided identification of mechanical constructions models (in Polish), WNT, Warszawa, 1997.
- [12] Van Der Auwaer H., Steinbichler H., Vanlanduit S., Haberstok C., Freymann R., Storer D., Linet V., Application of Stroboscopic and Pulsed-Laser ESPI to Modal Analysis Problems, Measurement Science and Technology, Vol. 13 (4), Apr. 2002, 451- 463.
- [13] Kohut P., Kurowski P., Wykorzystanie systemów wizyjnych do przeprowadzenia analizy modalnej konstrukcji , Diagnostics ' 2004 – 3rd International Congress of Technical Diagnostics, s.265-270, 6-9 września, Poznań, 2004.



Dr inż. Piotr KUROWSKI Jest adiunktem w Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn, Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie. Jego zainteresowania naukowe skupiają się na zagadnieniach przetwarzania sygnałów, problemów dynamiki konstrukcji oraz prototypowaniu algorytmów klasycznej i operacyjnej analizy modalnej. Jest autorem kilku publikacji związanej z podanymi tematami. Jest również autorem oprogramowania do analizy modalnej VIOMA prezentowanego w pracy.



Dr inż. Piotr KOHUT Jest adiunktem w Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn, Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie. Zainteresowania naukowe: mechatronika, systemy wizyjne, środki i metody komputerowego przetwarzania obrazów, analiza ruchu oraz techniki stosowane w pomiarach obiektów trójwymiarowych. Jest autorem publikacji i opracowań naukowych dotyczących wspomnianych zagadnień.

DODATEK 1

Przykładowe postacie drgań uzyskane w wyniku klejenia postaci częściowych

Nr post.	Konstrukcja bez uszkodzenia	12,5% uszkodzenia konstrukcji	32,5% uszkodzenia konstrukcji	50% uszkodzenia konstrukcji
2				
3				