

WYKORZYSTANIE SYSTEMÓW WIZYJNYCH DO PRZEPROWADZENIA ANALIZY MODALNEJ KONSTRUKCJI

Piotr KOHUT, Piotr KUROWSKI

Akademia Górniczo Hutnicza, Katedra Robotyki i Dynamiki Maszyn, Al. Mickiewicza 30,
30-059 Kraków, email:pko@agh.edu.pl; kurowski@agh.edu.pl

Streszczenie

W artykule zaprezentowano sposób zastosowania systemu wizyjnego do przeprowadzenia eksperymentu modalnego. Proponowane rozwiązanie polega na rejestracji drgań za pomocą systemu do akwizycji i analizy obrazów. W związku z tym, w oparciu o klasyczne metody przetwarzania obrazu, opracowano algorytm oraz procedury do analizy obrazów. Dokonano następnie implementacji i testowania tychże algorytmów w środowisku programowym Matlab, w którym, za pomocą uzyskanych danych wizyjnych oraz wykonanego w KRiDM AGH oprogramowania – VIOMA – przeprowadzono analizę modalną. Dane wizyjne konieczne do uzyskania powyższych celów otrzymano z kamery cyfrowej X-Stream w postaci plików 'avi'. W pracy przedstawiono również porównanie wyników uzyskanych za dla różnych rozdzielczości przestrzennych oraz przeprowadzono dyskusję otrzymanych rezultatów.

Słowa kluczowe: analiza modalna; przetwarzanie i analiza obrazów; pomiary drgań

VISION SYSTEMS UTILIZATION TO MODAL ANALYSIS CONSTRUCTION REALIZATION

Summary:

In the paper possibilities of application of vision techniques for modal experiment are presented. The main idea of proposed solution relies on vibration registering by means of a vision system for image acquisition and analysis. For this purpose procedures and algorithms for image acquisition, pre-processing and image analysis were developed basis of classical image processing methods. Developed algorithms were implemented and tested in programming environment MATLAB in which by means of developed in KRiDM AGH software – VIOMA – modal experiment was carried out. Necessary vision data were received from high-speed digital camera "X-Stream Vision" in the form of "avi" files which were input data of algorithm for modal analysis procedure. Comparison of obtained results from the developed vision system for different spatial resolutions were performed and discussed.

Keywords: modal analysis; image pre-processing and analysis, vibrations measurements

1. WSTĘP

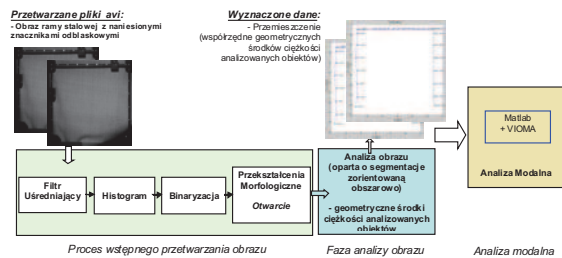
Wykorzystanie systemów wizyjnych w analizie modalnej oraz pomiarach wielkości charakteryzujących własności dynamiczne konstrukcji stało się przedmiotem zwiększonego zainteresowania wywołanego przede wszystkim potrzebami praktyki. Zastosowanie bezkontaktowych metod rejestracji sygnałów zgodne jest ze współczesnymi tendencjami projektowania, badania i testowania konstrukcji. Metody takie w znaczny sposób pozwalają na uproszczenie procedury pomiarowej redukując czas potrzebny na przygotowanie eksperymentu oraz pozwalają na automatyzację niektórych czynności związanych z analizą. W artykule podjęto próbę zastosowania analizy modalnej do diagnozowania uszkodzenia badanego obiektu w oparciu o przebiegi czasowe drgań uzyskane z opracowanego systemu wizyjnego. Zwrócono uwagę na problemy pojawiające się w trakcie realizacji eksperymentu

oraz dokonano próby wskazania sposobów ich rozwiązania.

2. METODOLOGIA.

W obszarze zastosowania systemów wizyjnych do trójwymiarowego pomiaru geometrii obiektów dominują generalnie dwie kategorie systemów: aktywne oraz pasywne [7], [8].

W kategorii systemów pasywnych opracowano, w oparciu o klasyczne techniki przetwarzania obrazu, metodykę, algorytmy i procedury do automatycznego odwzorowania geometrii i lokalizacji punktów pomiarowych oraz do pomiaru drgań określonych punktów konstrukcji.



Rys. 1 Metodyka automatycznego odwzorowania geometrii oraz realizacji testu modalnego

Opracowana metodyka i algorytmy w postaci oprogramowania współpracującego z wykonanym narzędziem komputerowego wspomaganie eksperymentu modalnego – VIOMA [12] osadzonym w środowisku Matlab (rys. 1) pozwoliła na skrócenie czasu realizacji jednego z najbardziej pracochłonnych i czasochłonnych etapów testu modalnego. Czyli początkową fazę testu modalnego związaną z przygotowaniem eksperymentu i wprowadzaniem do systemu geometrii, położenia i orientacji czujników pomiarowych.

Do pomiaru drgań analizowanego obiektu oraz określenia jego geometrii opracowano algorytmy klasycznych technik przetwarzania obrazu [1],[2],[3],[4],[5] w wyniku, których otrzymano geometryczne środki ciężkości obrazów znaczników w wybranych punktach konstrukcji. W celu obliczenia geometrycznych środków ciężkości analizowanych obrazów obiektów w oparciu o przyborek Image Processing Toolbox [6] opracowano i zaimplementowano procedury do wstępnego przetwarzania i analizy obrazów w środowisku programowym MATLAB [13] (rys.2) Uzyskane wartości współrzędnych geometrycznych środków ciężkości w jednostkach pikseli wyrażone zostały w milimetrach za pomocą opracowanego modułu kalibracji. W tym celu naklejono na analizowanym obiekcie wzorec kalibracyjny (rys.1.) w postaci okręgu o znanej średnicy.

3. EKSPERYMENT

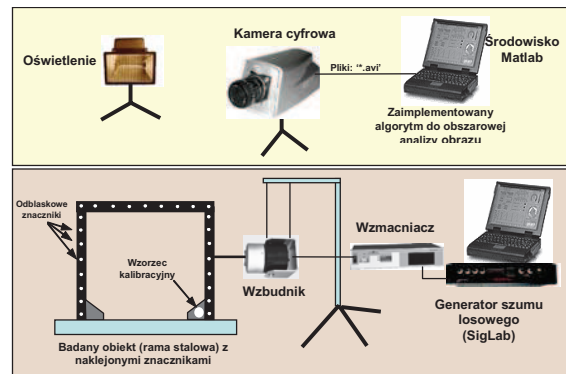
3.1 Stanowisko badawcze

Do przeprowadzenia testów modalnych z wykorzystaniem systemu wizyjnego przygotowano stanowisko badawcze zaprezentowane na rys. 2. Elementy składowe stanowiska badawczego z systemem wizyjnym do realizacji testu modalnego:

1) System wizyjny:

- ✓ Oświetlenie (halogen 1000W)
- ✓ Kamera cyfrowa X-Stream. Sekwencje obrazów pobierane były przy pomocy kamery cyfrowej X-Stream i 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



Rys. 2 Schemat stanowiska badawczego

2) Obiekt laboratoryjny

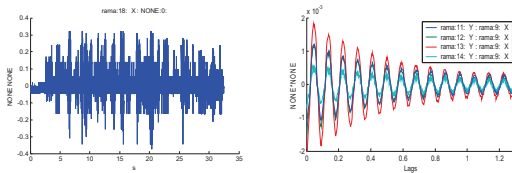
- ✓ Górna pozioma belka ramy stalowej z naklejonymi znacznikami odbłaskowymi stanowiącymi przedmiot analizy obrazów. Jako rezultat analizy obrazu, dla każdej ramki, obliczono współrzędne geometrycznych środków ciężkości obrazów naklejonnych znaczników wyrażonych po procesie kalibracji w milimetrach.
- ✓ W kolejnych eksperymentach częściowych badana belka była „uszkodzana” przez nacięcie poprzeczne w wybranym punkcie.
- ✓ Wzbudzenie szumem losowym

Analizowane obiekty reprezentowane były przez uzyskane z kamery obrazy odbłaskowych znaczników naklejonnych na badaną ramę stalową. 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. 1). W wyniku ich numerycznej realizacji, dla każdej ramki obrazu obliczono 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.

3.2 Pomiar belki "uszkodzanej" poprzez nacięcie

W celu dokonania detekcji uszkodzenia pojawiającego się w obiekcie przeprowadzona została seria testów pomiarowych. Pierwszy pomiar wykonano na obiekcie nieuszkodzonym a następnie kolejne trzy pomiary przy uszkodzaniu obiektu (12,5%, 35%, 50% uszkodzenia – nacięcie poprzeczne poziomej belki ramy stalowej). Obiekt wzbudzany był za pomocą układu przedstawionego na rys.2. Pomiar wykonywano za pomocą systemu

wizyjnego. Zarejestrowane obrazy przetwarzano następnie zgodnie ze schematem przedstawionym na rys.1. Jako wynik obróbki otrzymano przebiegi przemieszczeń badanych punktów konstrukcji w czasie. Przykładowe przebiegi zilustrowano na rys. 3a). Z zaprezentowanego rysunku widać, że rozdzielczość zarejestrowanego przebiegu drgań nie jest zbyt dobra.

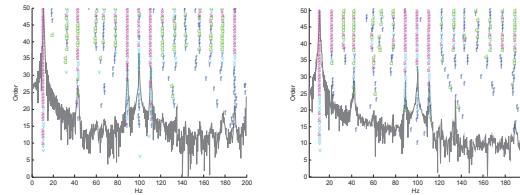


a) b)
 Rys 3. Przykładowy przebieg czasowy przemieszczeń drgań (a) oraz przykładowy przebieg obliczonej funkcji korelacji (b)

W przypadku punktów (np. znajdujących się w pobliżu końców badanego obiektu), w których spodziewano się uzyskać niewielką amplitudę drgań, na przebiegu odwzorowanych zostało jedynie kilka poziomów sygnału. Wyznaczone przebiegi czasowe użyte zostały następnie do obliczenia funkcji korelacji. W obliczeniach założono dwa punkty referencyjne wybrane w punktach i kierunkach, w których występowały największe drgania. Przebiegi przykładowych obliczonych funkcji korelacji przedstawiono na rys.3b)

W celu wygładzenia funkcji korelacji zastosowano uśrednianie z kilku wykonanych serii pomiarowych. Funkcje korelacji zostały następnie wykorzystane do przeprowadzenia analizy modalnej. Ponieważ nie był wykonywany pomiar siły wymuszającej jedynym rozwiązaniem było

przeprowadzenie operacyjnej analizy modalnej. Wykorzystano tutaj algorytm BR (ang. Balanced Realisation). Analizę przeprowadzono w pełnym paśmie pomiarowym tzn. od 0 – 200 Hz. Dla potrzeb wyznaczania diagramu stabilizacyjnego estymowano modele od 2 do 50 rzędu. Na rys.4. przedstawiono diagramy stabilizacyjne dla wszystkich przebadanych przypadków. Widać, iż pomimo słabej jakości przebiegów czasowych poddawanych analizie stabilizacja biegunów na diagramach jest zadziwiająco dobra.



Rys 4. Przykładowe diagramy stabilizacyjne uzyskane w trakcie wykonywania analiz dla kolejnych stopni uszkodzenia belki

Wyniki analiz dla wszystkich przypadków przedstawione zostały w tabeli 1.

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że różnice częstotliwości biegunów odpowiadających kolejnym stadiom uszkodzenia obiektu są niewielkie i niejednokrotnie znajdują się w granicach błędu estymacji. Z uszkodzeniem wykonywanym na konkretnym badanym obiekcie wiąże się przede wszystkim zmniejszenie sztywności układu. Częstotliwości drgań własnych uszkodzanego obiektu powinny, więc, w miarę propagacji uszkodzenia maleć.

Tabela 1. Wyniki estymacji modelu modalnego dla p. referencyjnego: rama:9:X

Lp.	Bez uszkodzenia		Uszk. 1		Uszk. 2		Uszk. 3	
	Częstotł.	Ws. Tłum	Częstotł.	Ws. Tłum	Częstotł.	Ws. Tłum	Częstotł.	Ws. Tłum
1	10,98	3,01	11,02	2,92	10,94	2,92	10,92	3,27
2	21,91	3,29	22,07	6,98	21,90	3,93	21,95	3,42
3	32,90	4,08			32,91	3,38	33,06	4,31
4	43,33	2,00	42,95	1,47	42,60	1,75	42,47	1,71
5	60,28	3,28	59,95	2,75	59,00	4,80	60,23	3,43
6	77,75	2,59	77,99	1,56	78,06	1,11	78,31	1,48
7	88,84	0,52	89,04	0,57	89,15	0,57	89,10	0,55
8	100,04	0,07	100,02	0,1	100,02	0,06	100,00	0,06
9	111,13	0,62	111,02	0,38	111,07	0,48	110,95	0,42
10	121,78	1,25	122,07	0,84	121,74	0,66	121,83	0,76
11			133,46	1,18	133,84	1,22	133,27	1,26
12	143,93	1,10	142,99	0,84	143,05	1,45	142,85	1,00
13	177,81	0,63	177,77	0,82	178,16	0,75	177,80	0,77
14	189,51	0,63	189,28	0,59	189,24	0,45	189,06	0,59

Tendencja taka jest rzeczywiście obserwowana dla biegunów nr.:1,4,5,9,13,14 jednakże w przypadku

postaci nr.:6,7 nie potwierdza się. Jest to prawdopodobnie związane z udziałem danej postaci

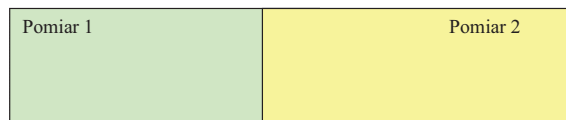
w całkowitej wartości drgań obiektu. Bieguny mające większy wpływ na całościowe drgania analizach będące przez to lepiej odwzorowane w danych pomiarowych spełniają podaną zależność. W wszystkich analizach pojawia się biegun o częstotliwości 100 Hz i stosunkowo niskim współczynniku tłumienia nieprzekraczającym 0.1 %. W klasycznym pomiarze z wykorzystaniem np. czujników akcelerometrycznych w częstotliwości tej najprawdopodobniej można by się dopatrywać niepożądanego wpływu zakłóceń sieci energetycznej. W przypadku pomiaru wizyjnego jedynym wytłumaczeniem występowania tej częstotliwości jest niekorzystny wpływ oświetlenia na dokonany pomiar.

W kolejnym etapie doświadczenia zaplanowane zostało wykorzystanie energetycznych wskaźników do detekcji i lokalizacji uszkodzenia pojawiającego się w monitorowanym obiekcie. Proponowana metoda bazuje na znajomości przebiegu postaci drgań dla obiektu wzorcowego (nieuszkodzonego) oraz postaci obiektu podejrzanego o uszkodzenie. Niestety w tym przypadku okazało się, iż wyznaczone postaci drgań nie są wystarczająco dobrze odwzorowane. Przebiegi najlepiej odwzorowanych postaci przedstawiono na rys.8.

Problem odwzorowania postaci bezpośrednio związany jest z rozdzielczością przestrzenną wykonywanego pomiaru. W przeprowadzonych eksperymentach rozdzielczość wynosiła 0.6748 [mm/piksel]. Pojawiło się, więc pytanie, jaką wartość powinna mieć rozdzielczość przestrzenna, aby poprawnie odwzorować postaci drgań oraz w jaki sposób technicznie umożliwić zmniejszenie wartości tego parametru. Z pośród kilku możliwości wybrana została metoda polegająca na realizacji kilku pomiarów dla wybranych obszarów badanego obiektu i następnym połączeniu w trakcie analiz badanych obszarów.

3.3 Pomiar ze zwiększaniem rozdzielczości

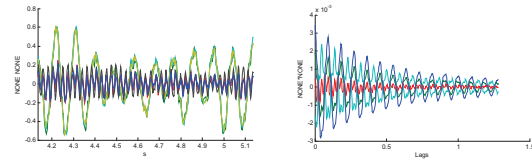
Wykonano kolejne dwie serie eksperymentów pomiarowych. W pierwszej badany obiekt podzielony został na dwie części zgodnie z rysunkiem 5.



Rys 5. Schemat podziału badanego obiektu na 2 części

Wyznaczenie przebiegów czasowych amplitud przemieszczeń oraz wyznaczenie funkcji korelacji wykonane zostało zgodnie ze schematem podanym w punkcie 2. Na rys 6 zilustrowano przykładowe przebiegi czasowe. W tym przypadku funkcje

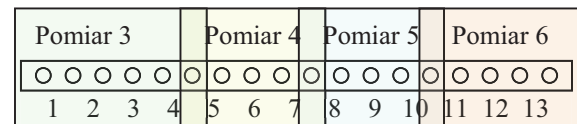
korelacji wyznaczono za pomocą referencyjnych przebiegów czasowych wybranych w punktach 9 lub 10. Punkty te były wspólne dla obydwu pomiarów. Przykładowe przebiegi funkcji korelacji przedstawione są na rys 6. Wykonanie operacyjnej analizy modalnej na tak przygotowanym zestawie funkcji korelacji doprowadziło do uzyskania postaci drgań własnych przedstawionych na rys 8.



Rys 6. Przykładowy przebieg czasowy przemieszczeń drgań oraz przykładowy przebieg obliczonej funkcji korelacji

Dalsze zwiększenie rozdzielczości pomiaru możliwe było poprzez dokonanie kolejnego podziału badanego obiektu.

Schemat tego podziału przedstawiony jest na rys. 7.



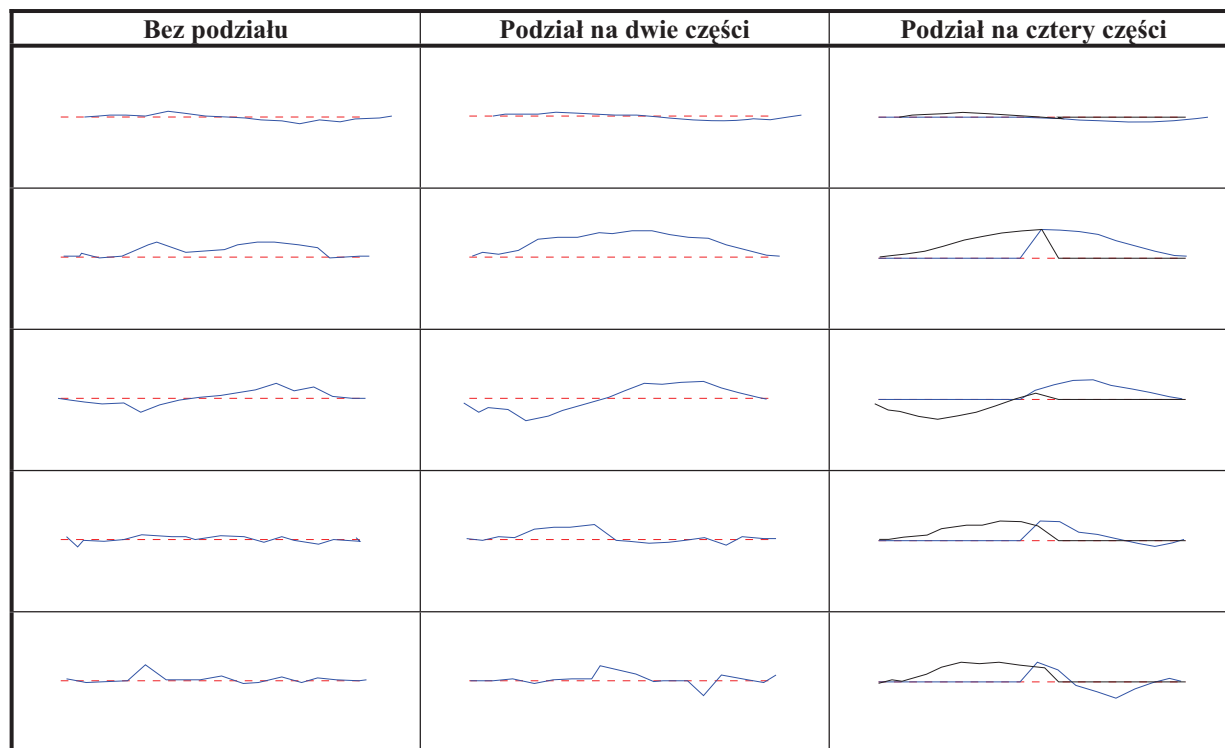
Rys 7. Schemat podziału badanego obiektu na 4 części

Wykonano podział na cztery części, przy czym każdy z pomiarów posiadał, co najmniej jeden punkt wspólny z kolejnym. W standardowym pomiarze, w którym wykorzystywane są klasyczne czujniki drgań, zazwyczaj jeden z czujników pełni rolę odniesienia. Jego pozycja jest niezmienna w czasie całego eksperymentu. W trakcie pomiaru wizyjnego założenie jednego punktu pomiarowego jako referencyjnego nie może zostać spełnione. Sytuacja taka powoduje, iż postaci drgań uzyskiwane są na podstawie kilku analiz częściowych. Istnieje, więc konieczność „sklejania” postaci globalnej dla całego badanego obiektu na podstawie kilku postaci składowych. Istotny jest tutaj fakt, iż postaci składowe mogą różnić się między sobą zarówno amplitudą jak i fazą dla danego bieguna.

Zaproponowane rozwiązanie polega na wyznaczeniu na podstawie przebiegów czasowych amplitud drgań funkcji korelacji. W związku z tym wyznaczono dwa niezależne zestawy funkcji korelacji. Jeden na podstawie pomiarów 3 i 4. Jako referencja wybrany został punkt 6. Drugi zestaw obliczony został na podstawie pomiarów 5 i 6 z wykorzystaniem punktu referencyjnego nr 14. Wykonane zostały analizy modalne dla obydwu zestawów funkcji korelacji. Postacie drgań uzyskane w obydwu analizach zawierały jeden

punkt wspólny (nr 10). Punkt ten wykorzystany został następnie do połączenia postaci na podstawie postaci częściowych. Uzyskane postaci drgań przedstawiono na rys 8 i porównano z przypadkami

analizowanymi powyżej. Odpowiadają one kolejno (rzędami) częstotliwościom ok: 11.0, 43.9, 60.2 122.1 oraz 144.2 Hz



Rys 8. Porównanie kształtów wybranych postaci drgań uzyskanych dla pomiarów wykonywanych z różnymi rozdzielczościami przestrzennymi

4. WNIOSKI

Stosując pomiar wizyjny w analizie modalnej:

- ✓ Następuje skrócenie czasu realizacji eksperymentu modalnego poprzez jednoczesny pomiar we wszystkich niezbędnych punktach
- ✓ Następuje skrócenie czasu przygotowania eksperymentu poprzez automatyzację odwzorowania geometrii badanego obiektu
- ✓ Można otrzymać pełną macierz modalną, ponieważ wszystkie pomiary wykonywane są jednocześnie
- ✓ Zwiększenie rozdzielczości przestrzennej umożliwia poprawę odwzorowania postaci drgań własnych
- ✓ Podział badanego obiektu na mniejsze części zwiększa rozdzielczość przestrzenną jednocześnie jednak zwiększa złożoność pomiarów i analiz.

LITERATURA

[1].JAHNE B., *Digital image processing: concepts, algorithms, and scientific application*, Springer-Verlag, Berlin, 1995

[2].KLETTE R., ZAMPERONI P., *Handbook of image processing operators*, JohnWiley&Sons Ltd., New York, 1996

[3].SHAPIRO L, STOCKMAN., *Textbook: Computer vision*, Stockman, Prentice-Hall, 2001

[4].TADEUSIEWICZ R., *Systemy wizyjne robotów przemysłowych*, WNT, Warszawa, 1992

[5].UHL T., KOHUT P., *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, pp. 672-677 Międzyzdroje, 28-31 August 2001

[6].*Image Processing Toolbox for use with MATLAB*, The MathWorks Inc., 2002

[7].FREYMAN R., HONSBURG W., WINTER F., STEINBICHLER H., *Holographic modal analysis, Laser in Research and Engineering*, Springer Verlag Berlin, pp. 530-542, 1996.

[8].VAN DER AUWERAER H., STEINBICHLER H., VANLANDUIT S., HABERSTOK C., FREYMAN 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, pp. 451- 463

- [9]. UHL T., *Komputerowe wspomaganie identyfikacji modeli konstrukcji mechanicznych*, WNT, Warszawa, 1997
- [10]. KUROWSKI P., *Identyfikacja modeli modalnych konstrukcji mechanicznych na podstawie pomiarów eksploatacyjnych*, Praca doktorska, Kraków 2001
- [11]. HEYLEN W., LAMMENS S., AND SAS P. *Modal Analysis Theory and Testing*. Department of Mechanical Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium, 1995.
- [12]. KUROWSKI P., UHL T., *VIOMA 2.0 – users guide*, Katedra Robotyki i Dynamiki Maszyn AGH, Kraków 2003
- [13]. KOHUT P. KUROWSKI P., *Pomiary wizyjne w analizie modalnej*, VIII Szkoła Analizy Modalnej, Kraków, 1-2 grudnia 2003



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 prototypowa-

niu 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 po-

miarach obiektów trójwymiarowych. Jest autorem publikacji i opracowań naukowych dotyczących wspomnianych zagadnień.