

Tadeusz UHL, Piotr KOHUT, Krzysztof HOLAK

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA ROBOTYKI I MECHATRONIKI, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Zastosowanie metod wizyjnych do monitorowania stanu konstrukcji

Prof. dr hab. inż. Tadeusz UHL

Jest kierownikiem Katedry Robotyki i Mechatroniki Akademii Górniczo - Hutniczej w Krakowie. Zainteresowania naukowe to diagnostyka i monitorowanie stanu konstrukcji, dynamika konstrukcji, analiza modalna, układy aktywnej redukcji drgań, układy sterowania i szeroko pojęta mechatronika. Jest autorem 16 książek oraz ponad 500 publikacji naukowych w czasopiśmie krajowych i zagranicznych dotyczących wspomnianych zagadnień.

e-mail: tuhl@agh.edu.pl



Dr inż. Piotr KOHUT

Jest adiunktem w Katedrze Robotyki i Mechatroniki 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.

e-mail: pko@agh.edu.pl



Mgr inż. Krzysztof HOLAK

Absolwent Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej, Pracę dyplomową z tematyki zastosowania technik wizyjnych do pomiaru struktury i ruchu obiektów obronił w 2007 roku. Obecnie jest doktorantem w Katedrze Robotyki i Mechatroniki. Zajmuje się komputerowym przetwarzaniem obrazu i wizyjnymi systemami pomiarowymi.

e-mail: holak@agh.edu.pl



Streszczenie

W pracy dokonano przeglądu dostępnych na rynku trójwymiarowych wizyjnych systemów pomiarowych. Przedstawiono koncepcję nowego systemu wizyjnego do pomiaru deformacji i struktury obiektów inżynierii lądowej oraz pomiaru przebiegów drgań, oraz wizualizacji operacyjnych postaci drgań. W artykule przedstawiono wstępne wyniki testów metody pomiaru ugięcia konstrukcji z wykorzystaniem współczynnika korelacji obrazów na stanowisku laboratoryjnym oraz na obiektach rzeczywistych.

Słowa kluczowe: współczynnik korelacji obrazów cyfrowych, trójwymiarowe wizyjne techniki pomiarowe, pomiar odkształceń, pomiar drgań.

Application of vision techniques for construction state monitoring

Abstract

Review of 3D vision measurement systems available on the market is presented in the paper. A concept of new vision systems dedicated to measurements of deformation and geometry of civil engineering objects as well as vibrations of structures and visualization of operational shape modes is introduced. The first system described in the paper enables in-plane deflection course to be obtained by means of homography matrix and digital image correlation. As a result the deflection field can be computed from two images of the structure acquired from two different points in space. Epipolar geometry methods were introduced in order to provide 3D deformation's of the structures. The second system enables obtaining amplitudes of vibrations of analyzed scene objects along with their structure based upon data derived from one or two calibrated digital fast cameras. For this purpose techniques based on epipolar geometry are employed. Courses of vibrations computed by the system can be used as data for experimental modal analysis. Mode shapes visualization can be carried out by a high resolution digital camera and developed lock-in techniques. Results of preliminary tests of 2D vision deflection measurement method using digital image correlation coefficient in the laboratory as well as on the real construction are presented.

Keywords: digital image correlation, 3D measurement techniques, deformation measurements, vibration measurements.

1. Wstęp

W chwili obecnej na rynku światowym zauważa się wzrost systemów wizyjnych stosowanych do analizy ruchu oraz trójwymiarowego pomiaru geometrii obiektów. Jednak w zakresie pomiaru odkształceń i niskoczęstotliwościowych drgań konstrukcji ich liczba jest nadal niewielka. W tradycyjnych technikach pomiaru drgań maszyn, urządzeń i konstrukcji wykorzystywane są przetworniki takie jak: akcelerometry czy czujniki tensometryczne. Zastosowanie tego rodzaju sensorów wymaga ich bezpośredniego mocowania do badanych elementów podczas przeprowadzania eksperymentu. W wielu przypadkach nie jest to możliwe ze względu na warunki pracy tych urządzeń. Innym powodem są niskoczęstotliwościowe drgania często spotykane w konstrukcjach inżynierii, w pojazdach, pomostach operatorów maszyn i urządzeń, itp. Ich pomiar ze względu na niskie pasmo częstotliwości jest trudny, a często wręcz niemożliwy za pomocą standardowych akcelerometrów. Stwarza to konieczność do wykorzystania innych narzędzi pomiarowych opartych o bezkontaktowe metody realizacji pomiaru. W takich przypadkach system wizyjny jako narzędzie łatwe w użyciu, dokładne oraz uniwersalne może być dobrą alternatywą dokonywania pomiaru drgań i odkształceń.

2. Przegląd dostępnych na rynku trójwymiarowych wizyjnych systemów pomiarowych

Obecnie istnieje wiele systemów pomiarowych opartych o optyczne techniki pomiarowe. Systemy te znajdują zastosowanie w badaniach materiałowych, wytrzymałościowych (pomiar odkształceń, naprężeń) oraz w pomiarach parametrów kinematycznych obiektów. Inną grupę stanowią optyczne systemy skanowania przestrzennego w wyniku których uzyskuje się trójwymiarową strukturę obiektów. W pracy dokonano przeglądu dostępnych na rynku optycznych systemów pomiarowych, przedstawiono ich najważniejsze cechy oraz podzielono systemy ze względu na technikę jaką wykorzystują. Do najważniejszych firm, istniejących na obecną chwilę na rynku, oferujących pomiarowe systemy wizyjne należą: Correlated Solution, GOM, LIMESS Messtechnik & Software, Dantec Dynamics, Metres [1-7].

Do dynamicznych pomiarach trójwymiarowych stosowane są urządzenia takie jak: PONTOS/TRITOP (GOM), Vic2D/Vic3D (CorrelatedSolution/LIMESS). Dokładności tych systemów wahają się w zakresie od 1/50 do 1/100 piksela, zaś wielkości mierzonych obiektów w zależności od konfiguracji systemu: od kilku mm do 10 m. Częstotliwości akwizycji obrazów wahają od kilku do kilkuset tysięcy ramek/sek w zależności od rozdzielczości użytych kamer oraz pola widzenia. Do pomiarów wzdłuż osi, deformacji i naprężeń struktury stosowane są obecnie systemy ARAMIS/ PONTOS (GOM), Vic2D/Vic3D (CorrelatedSolution/LIMESS), Q-400-II (DantecDynamics). Przykładem tego typu

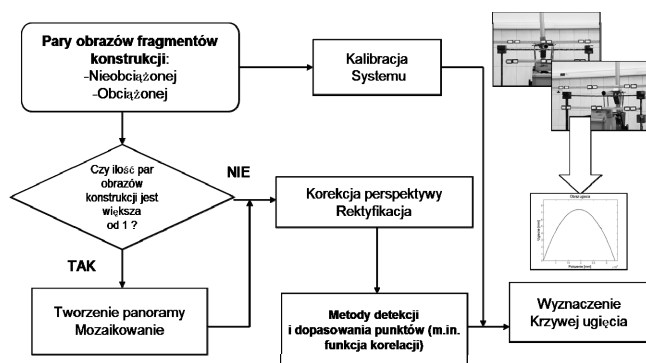
systemów jest ARAMIS (GOM) umożliwiający analizę deformacji i naprężeń skomplikowanych geometrii obiektów pod obciążeniem. System wykorzystuje metodę trójwymiarowej korelacji oraz wysokiej rozdzielczości kamery cyfrowe. Do pomiaru trójwymiarowego kształtu obiektów w zastosowaniach do inżynierii odwrotnej wykorzystywane są systemy takie jak ATOS, TRITOP (GOM), 3D-Cam (CorrelatedSolution/LIMESS). System ATOS opiera się o wizję aktywną, co oznacza że w systemie tym analizowany jest kształt wzorca wyświetlanego na badaną powierzchnię. Skaner działa na zasadzie triangulacji, dwie kamery obserwują przebiegi prążków na mierzonym detalu, co umożliwia wyznaczenie trójwymiarowych współrzędnych. Trójwymiarowe pomiary geometrii z wykorzystaniem trzech kamer realizowane są przez urządzenie: KRYPTON serii K (Metris) oraz OPTIGO (Cognitens) System KRYPTON używa 3 kamery liniowe, dodatkowo posiada możliwość analizy ruchu znaczników umieszczonych na konstrukcji, zaś OPTIGO do pomiaru geometrii wykorzystuje 3 kamery matrycowe. Aktywne techniki interferencyjne używane są do pomiaru deformacji przez systemy ESPI SD-30/SD-10S (GOM); Shearwin NT (Correlated Solution/LIMESS), Q-810 (Dantec Dynamics). Metody pomiarowe oparte są na zjawiskach interferencji, przez co dotyczą niewielkich obiektów [1-7].

3. Sformułowanie metody monitorowania stanu konstrukcji w oparciu o pomiary wizyjne

Istniejące na rynku systemy umożliwiają realizację pomiaru zarówno statycznych jak i dynamicznych wielkości mechanicznych związanych z konstrukcjami technicznymi, jednak nie są one przystosowane do przeprowadzania pomiarów na obiektach o dużych gabarytach takich jak konstrukcje inżynierii budowlanej. Pomiary ugięć takich obiektów jak i dynamicznych przebiegów przemieszczeń realizowane są w istniejących systemach w jednym lub kilku punktach charakterystycznych lub wymagają długotrwałych i kosztownych pomiarów z wykorzystaniem przyrządów geodezyjnych. W pracy przedstawiono koncepcję systemu wizyjnego do pomiaru deformacji i struktury trójwymiarowej obiektów inżynierii lądowej oraz pomiaru przebiegów drgań, estymacji parametrów modalnych i wizualizacji postaci drgań.

3.1. Pomiar ugięcia konstrukcji w jednej płaszczyźnie

Opracowano koncepcję bezkontaktowego systemu pomiarowego wykorzystującego techniki wizyjne oparte na korelacji obrazów, służącego do monitorowania stanu konstrukcji inżynierii lądowej poprzez pomiar ich ugięcia statycznego [8-13]. Idea proponowanej metody została zilustrowana na rysunku 1.



Rys. 1. Algorytm pomiaru ugięć w jednej płaszczyźnie
Fig. 1. 2D deflection measurement algorithm

Przed pomiarem wykonywane jest zdjęcie referencyjne konstrukcji nie poddanej działaniu obciążeń eksploatacyjnych. Obraz

ten jest zapamiętywany w pamięci komputera. Podczas pomiarów diagnostycznych wykonywana jest fotografia konstrukcji odkształconej pod wpływem obciążenia. Położenie aparatu oraz jego orientacja względem badanej konstrukcji podczas badania nie musi być dokładnie taka sama jak przy wykonywaniu fotografii referencyjnej. Obraz konstrukcji odkształconej posiada zniekształcenia perspektywiczne, ponieważ został zarejestrowany z innego punktu przestrzeni niż fotografia referencyjna i nie może zostać z nią bezpośrednio porównany. Korzystając z geometrycznych znaczników, oprogramowanie wyznacza przekształcenie homograficzne usuwające ze zdjęcia konstrukcji obciążonej zniekształcenia perspektywiczne [8, 9]. Przebieg ugięcia konstrukcji otrzymywany jest dzięki wyznaczeniu miary podobieństwa pomiędzy odpowiednimi obszarami na dwóch obrazach z wykorzystaniem metod komputerowej analizy obrazu (np. poprzez funkcję korelacji [8-13]). Podczas pomiaru obraz badanej konstrukcji dzieli się na fragmenty, wzorce jasności będące punktami pomiarowymi. Jako wzorec jasności wykorzystano specjalną teksturę umieszczoną na obiekcie (rys. 2.) Belka może zostać podzielona na gęstą siatkę punktów co pozwala na wierniejsze odwzorowanie krzywej ugięcia. Wektor przemieszczenia dla jednego punktu pomiarowego wyznaczono jako różnicę między odpowiadającymi sobie składowymi położenia: x i y , wyznaczonymi przy pomocy współczynnika korelacji (NCC) dla obrazów konstrukcji przed i po deformacji. Dla wszystkich punktów pomiarowych obliczonych w powyższy sposób otrzymano pole przemieszczeń reprezentujące ugięcie konstrukcji. Przeprowadzenie kalibracji umożliwia wyznaczenie przebiegu ugięcia konstrukcji w jednostkach metrycznych, w rzeczywistej skali. W celu zwiększenia dokładności metody wprowadzono pod-pikselową technikę detekcji cech. W przypadku analizy konstrukcji o bardzo dużych rozmiarach, gdy wymagane są wysokie dokładności pomiaru może zaistnieć konieczność fotografowania obiektu fragmentami. Zakłada się wówczas możliwość połączenia otrzymanych zdjęć w jedną panoramę przedstawiającą całą konstrukcję. Proces mozaikowania przeprowadzany jest np. z wykorzystaniem macierzy homografii.

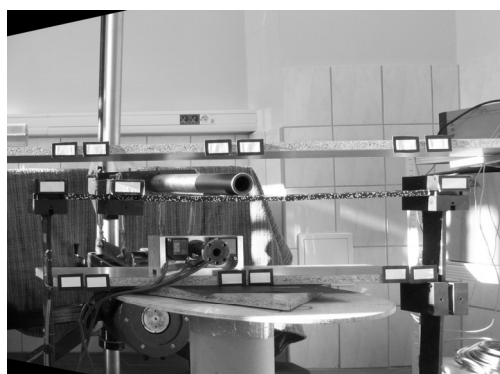
3.1.1. Weryfikacja metody pomiarowej na stanowisku laboratoryjnym

Przeprowadzono wstępną weryfikację proponowanej metody na stanowisku badawczym. Badanym obiektem była rama stalowa obciążona statycznie siłą o kierunku pionowym przyłożoną do jednego punktu jej poziomego fragmentu. Wokół ramy umieszczono znaczniki służące do wyznaczenia macierzy homografii pomiędzy obrazami, w taki sposób, aby nie zmieniały one swego położenia w wyniku odkształcenia się ramy oraz leżały w tej samej płaszczyźnie co badana część konstrukcji. Na analizowanym fragmencie ramy umieszczono wzorec w postaci szumu optycznego. W celu wykonania fotografii ramy nieobciążonej, która w dalszej analizie posłużyła jako obraz odniesienia, ustawiono aparat w taki sposób aby jego oś optyczna była prostopadła do analizowanego fragmentu konstrukcji. Następnie rama została obciążona statycznie skupionym ciężarem. Wykonano serię fotografii konstrukcji zmieniając ustawienie kamery względem niej. Podczas analizy dokonano rektyfikacji fotografii konstrukcji obciążonej. Następnie porównując obraz referencyjny z obrazami analizowanymi przy pomocy współczynnika korelacji, wyznaczono przebieg krzywej ugięcia konstrukcji.

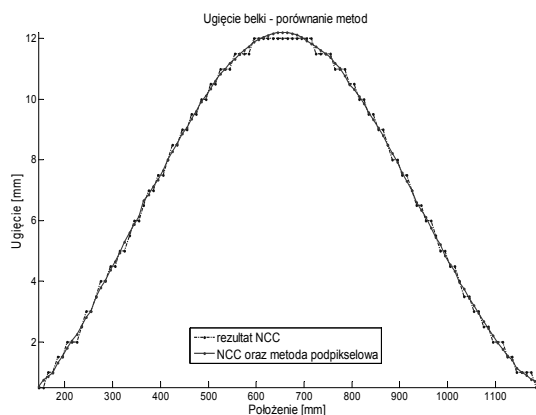
W trakcie badań dokonano weryfikacji dokładności pomiarowej systemu wizyjnego poprzez porównanie z pomiarem laserowym czujnikiem przemieszczenia w wybranym punkcie konstrukcji (punkt maksymalnego ugięcia konstrukcji równego 11.8 mm). Średni różnica pomiędzy pomiarem laserowym czujnikiem przemieszczenia a systemem wizyjnym wyniósł 0.1172 mm (błąd względny 0.99%) bez użycia technik pod-pikselowych oraz 0.0372 mm (błąd względny 0.3%) w przypadku ich zastosowania [10].



Rys. 2. Obraz konstrukcji obciążonej. Obraz oryginalny
Fig. 2. Image of construction under load. Original image



Rys. 3. Obraz konstrukcji obciążonej. Obraz powstały po usunięciu zniekształceń perspektywicznych
Fig. 3. Image of the construction under load. Image obtained after rectification of projective distortions



Rys. 4. Krzywa ugięcia obiektu pokazanego na rys. 2
Fig. 4. Deflection curve of the object shown on Fig. 2

Przeprowadzone doświadczenia [8-13] potwierdziły, że możliwe jest otrzymanie gładkiego przebiegu krzywej ugięcia konstrukcji dzięki wykorzystaniu współczynnika korelacji obrazów oraz technik podpikselowych analizy obrazów (rys. 4).

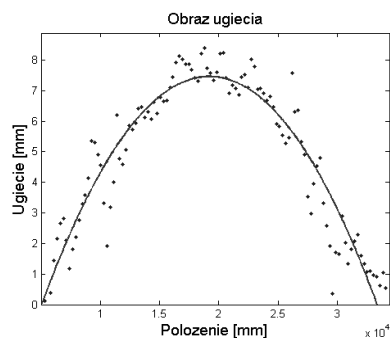
3.1.2. Wstępna weryfikacja metody na obiekcie rzeczywistym

Badanym obiektem rzeczywistym był fragment (1 segment) wiaduktu tramwajowego o długości 30 m [12, 13]. Zdjęcia obiektów wykonano aparatem Canon EOS 450D. Aparat ustawiono w odległości 27 m od konstrukcji. Pomiary były przeprowadzane w wysoce zmiennych warunkach oświetlenia (naturalne światło dzienne). Na badanym fragmencie konstrukcji nie umieszczono

tekstury w postaci losowego rozkładu wzorców jasności. Analizę przebiegu ugięcia przeprowadzono na podstawie obrazów konstrukcji wykonanych z tego samego miejsca przestrzeni.



Rys. 5. Badana konstrukcja rzeczywista
Fig. 5. Tested real construction

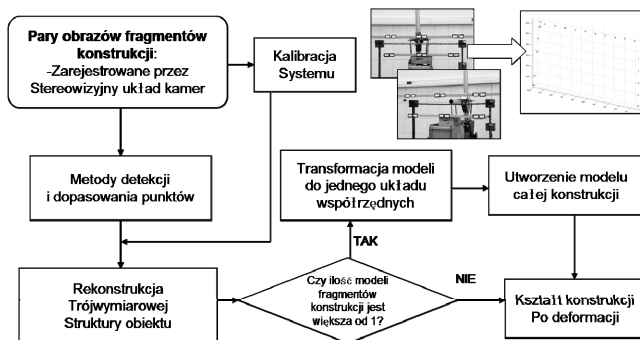


Rys. 6. Krzywa ugięcia obiektu przedstawionego na rys. 5
Fig. 6. Deflection curve of the object shown on Fig. 5

W czasie badań zarejestrowano ugięcie konstrukcji obciążonej ciężarem przejeżdżających pojazdów. Przebiegi ugięcia wyznaczone przy pomocy techniki podpikselowej zostały aproksymowane za pomocą wielomianu stopnia drugiego. Pomiary obiektów rzeczywistych ukazały możliwość stosowania opisanej metody w przypadku dużych zmian warunków oświetlenia (światło naturalne) oraz w przypadku gdy nie jest możliwe zastosowanie sztucznej tekstury o losowym rozkładzie poziomów jasności.

3.2. Pomiar trójwymiarowego odkształcenia konstrukcji (3D)

W kolejnej części artykułu przedstawiono rozwiązanie koncepcyjne systemu pomiarowego, umożliwiającego pomiar trójwymiarowego odkształcenia obiektu pod wpływem działających na niego obciążeń.

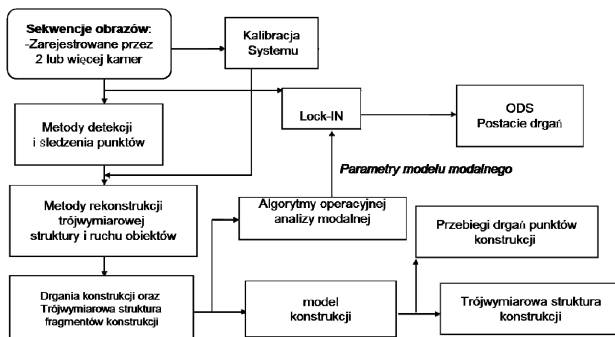


Rys. 7. Algorytm pomiaru odkształcenia trójwymiarowego
Fig. 7. 3D deformation measurement algorithm

Podczas pomiaru rejestrowana jest stereowizyjna para fotografii konstrukcji odkształconej pod wpływem obciążeń. Następnie oprogramowanie przeprowadza detekcję oraz dopasowanie odpowiadających sobie punktów na obu obrazach konstrukcji wykorzystując detektory cech oraz miary dopasowania obrazów (np. współczynnik korelacji). Wyznaczone współrzędne odpowiadających sobie punktów wraz z trójwymiarowymi technikami rekonstrukcji struktury obiektów umożliwiają wyznaczenie struktury analizowanej konstrukcji. Deformację obiektu wyznacza się poprzez porównanie otrzymanej trójwymiarowej geometrii konstrukcji z referencyjnym modelem konstrukcji nieodkształconej. Struktura referencyjna pozyskiwana jest w podobny sposób jak dla obiektu po deformacji.

3.3. Pomiar przebiegów drgań i rekonstrukcja postaci drgań konstrukcji (3D)

W następnym rozdziale artykułu przedstawiono rozwiązanie koncepcyjne systemu pomiarowego, który umożliwia pomiar drgań obiektu pod wpływem działających na niego obciążeń oraz analizę postaci drgań badanej konstrukcji [12, 14-17].



Rys. 8. Algorytm pomiaru trójwymiarowych drgań
Fig. 8. 3D vibration's measurement algorithm

Podczas pomiarów układ dwóch kamer rejestruje sekwencje obrazów zawierającą przebieg drgań konstrukcji. Następnie oprogramowanie dokonuje detekcji punktów charakterystycznych, ich śledzenia na obu sekwencjach filmowych oraz dopasowania korespondujących punktów z dwóch klatek sekwencji zarejestrowanych w tej samej chwili czasowej przez obie kamery. Wyznaczone współrzędne korespondujących punktów zostają wprowadzone do algorytmów rekonstrukcji trójwymiarowej struktury obiektów. Proces rekonstrukcji powtarzany jest dla każdej pary klatek z dwóch sekwencji, dzięki czemu uzyskiwany jest trójwymiarowa struktura konstrukcji w każdej chwili czasowej. W wyniku uzyskuje się dynamiczną deformację obiektu oraz przebiegi drgań każdego z punktów pomiarowych. Wyznaczone przebiegi drgań stanowią dane wejściowe do algorytmu operacyjnej analizy modalnej w celu estymacji parametrów modelu modalnego. Dla zidentyfikowanych częstotliwości dokonywana będzie wizualizacja (na sekwencji video) operacyjnych postaci drgań (ODS) z wykorzystaniem technik detekcji „lock-in” [12].

4. Podsumowanie

W pracy dokonano przeglądu dostępnych na rynku systemów wizyjnych umożliwiających zarówno pomiary statyczne i dynamiczne obiektów. Systemy te nie są systemami dedykowanymi do badania stanu i monitorowania konstrukcji inżynierii lądowej takich jak mosty, wiadukty, kładki, stropy czy inne obiekty budowlane. Obecnie istniejące systemy umożliwiają przeprowadzanie pomiarów takich konstrukcji w jednym lub kilku punktach charakterystycznych lub wymagają stosowania długotrwałych i kosztownych pomiarów z wykorzystaniem przyrządów geodezyjnych. W pracy przedstawiono koncepcję systemu wizyjnego do

pomiaru trójwymiarowej struktury konstrukcji oraz przebiegów drgań, estymacji parametrów modalnych i wizualizacji postaci drgań. Wstępne badania opracowanej metody pomiaru ugięcia konstrukcji w jednej płaszczyźnie potwierdziły możliwość zastosowania jej w warunkach laboratoryjnych a także na rzeczywistym obiekcie.

Praca realizowana w ramach projektu MONIT.

5. Literatura

- [1] Lee, M., Precht, M., Tyson, J., Schmidt, T.: Application of 3D Measurement System with CCD Camera in Microelectronics, Advanced Packaging, November 2003.
- [2] Schmidt, T., Tyson, J., Galanulis, K.: Full-Field Dynamic Displacement and Strain Measurement Using Advanced 3D Image Correlation Photogrammetry, Experimental Techniques, Vol.27, No.3, pp.41-44, May/June 2003.
- [3] Schmidt, T., Tyson, J., Galanulis, K.: Dynamic Strain Measurement Using Advanced 3D Photogrammetry, Proceedings of IMAC XXI, Orlando, FL, Feb. 2003.
- [4] Bergmann D, Ritter R. 3D deformation measurement in small areas based on grating method and photogrammetry. Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference, Optical Inspection and Micromasurements, vol. 2782, 1996, pp.212-223.
- [5] Steinchen, W. & Yang, L.: Digital Shearography, Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry, SPIE Press, 2003.
- [6] Tyson, J.: Dynamic Deformation Analysis with Pulsed ESPI, Society of Experimental Mechanics Conference, June 1999.
- [7] Tyson, John: Portable Interferometry Systems for Rapid NDI, USAF Aircraft Structural Integrity Conference, Dec. 1998.
- [8] Uhl T., Kohut P., Holak K.: Zastosowanie korelacji obrazów do pomiaru zmian stanu konstrukcji. Wybrane zagadnienia analizy modalnej konstrukcji mechanicznych, s.330-331, Kraków, grudzień 2007.
- [9] Kohut P., Holak K., Uhl T.: Application of image correlation for SHM of steel structures, Structural Health Monitoring 2008: proceedings of the fourth European workshop, Cracow, Poland, July 2-4 2008, pp. 1257-1264.
- [10] Uhl T., Kohut P., Holak K.: Diagnostowanie konstrukcji z zastosowaniem korelacji obrazu. Diagnostyka, 3/2007, pp. 15-24.
- [11] Uhl T., Kohut P., Holak K.: Construction deflection examination by means of correlation coefficient, Proceedings of the 13th School of Modal Analysis, Cracow, Poland 2009.
- [12] Uhl T., Kohut P., Szewo M., Holak K.: Static and dynamic optical measurement in SHM of civil structures, Proceeding of the 7th international workshop on Structural Health Monitoring, DESTech publications, Lancaster 2009.
- [13] Uhl T., Kohut P., Holak K.: Image correlation techniques in structures deflection measurement, Proceedings of the international conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures EVACES'09. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2009.
- [14] Kohut P., Kurowski P.: The integration of vision system and modal analysis for SHM applications, Proc. Of the IMAC-XXIV a conference and exposition on structural dynamics, January 30-February 02 St. Louis, 2006, pp. 1-8.
- [15] Holak K, Kohut P., Cieślak J.: Application of three-dimensional vision techniques in mechanical vibrations measurement (in polish), Proceedings of the 8th Workshop of Mechatronics Design, 2008, pp. 63-70.
- [16] Kohut P., Kurowski P.: The integration of vision system and modal analysis for SHM applications. Proc. Of the IMAC-XXIV a conference and exposition on structural dynamics, January 30-February 02 St. Louis, 2006, pp. 1-8.
- [17] Kohut P. Giergiel M.: Optical measurement of amplitude of vibration of machine. Mechanics and Mechanical Engineering ; ISSN 1428-1511. — 2008 vol. 12 no. 2 s. 147-156. — Bibliogr. s. 156.