

## DIAGNOZOWANIE KONSTRUKCJI Z ZASTOSOWANIEM KORELACJI OBRAZU

Tadeusz UHL, Piotr KOHUT, Krzysztof HOLAK

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Robotyki i Mechatroniki  
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, email: [tuhl@agh.edu.pl](mailto:tuhl@agh.edu.pl); [pko@agh.edu.pl](mailto:pko@agh.edu.pl); [krholak@gmail.com](mailto:krholak@gmail.com)

### Streszczenie

W artykule zaprezentowano zastosowanie bezkontaktowych metod optycznych do analizy kształtu ugięcia konstrukcji. W tym celu za pomocą macierzy homografii oraz współczynnika korelacji wyznaczono przemieszczenia reprezentujące deformacje konstrukcji w oparciu o obrazy konstrukcji przed i po deformacji uzyskane z dowolnie umiejscowionej kamery. Zastosowanie technik podpikselowych umożliwiło zwiększenie dokładności pomiarowej otrzymanego pola przemieszczeń analizowanego obiektu. Opracowaną metodykę oraz procedury zaimplementowano oraz przetestowano w środowisku programowym MATLAB.

Słowa kluczowe: techniki przetwarzania obrazów, korelacja obrazów, pomiary przemieszczeń.

### CONSTRUCTION DIAGNOSTING USING DIGITAL IMAGE CORRELATION

#### Summary

In the paper the application of non-contact optical methods for a construction deformation analysis was presented. Homography matrix and correlation coefficient were employed by the means of two construction images: state before and after deformation in order to obtain displacements field. It represents a shape deformation of the analyzed construction. Introduced subpixel techniques allowed measurement accuracy increasing for calculated displacement field. Developed methods and procedures were implemented and tested in programming environment – MATLAB.

Keywords: digital image processing techniques, digital image correlation, displacement measurements.

## 1. WSTĘP

W diagnozowaniu stanu konstrukcji (mosty, kładki, wiadukty, hale, kominy, maszyny) monitorowaniu podlegają nie tylko procesy dynamiczne (drżania) ale również stany statyczne (deformacje – zmiana kształtu, ugięcia). Do utrzymania integralności konstrukcji wymagana jest nie tylko realizacja pomiarów ale również ciągłe monitorowanie zmienności parametrów. Pomiary przemieszczeń stanowią tutaj istotny czynnik oceny własności statycznych i dynamicznych konstrukcji, takich jak: ugięcie, deformacja kształtu, wytrzymałość, pęknięcia, eksperymentalna analiza naprężeń, częstotliwości własne, postacie drgań, odpowiedzi dynamiczne. W tym zakresie analiza kształtu ugięcia konstrukcji [1-5] staje się metodą bardziej znaczącą i dokładniejszą od metod opartych o analizę częstotliwości drgań własnych, współczynników tłumienia i postaci drgań [6-11]. Stosowane są różne metody pomiarowe, które ogólnie dzielą się na dotykowe i bezkontaktowe. Do optycznych metod bezdotykowych należą techniki wizyjne [12-15]. Ich podstawowymi zaletami w stosunku do poprzednich są: duża gęstość pomiarowa oraz dokładność, niski koszt, łatwość użycia i uniwersalność [12-15]. W mechanice

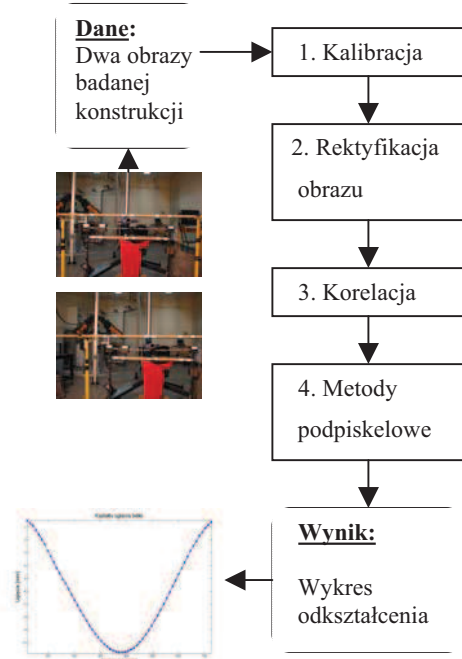
eksperymentalnej bezkontaktowe techniki pomiarowe wykorzystujące korelację obrazu do pomiaru przemieszczeń i naprężeń zostały wprowadzone w ostatniej dekadzie [16-18]. Podstawą tych metod jest uzyskanie miary dopasowania między dwoma naturalnymi lub sztucznymi płaskimi wzorcami obrazu, pozyskanymi w stanie przed i po deformacji konstrukcji. W ich wyniku otrzymuje się pole przemieszczeń analizowanego obiektu.

W artykule przedstawiono zastosowanie korelacji obrazu do pomiaru deformacji konstrukcji, zaprezentowano opracowaną metodykę oraz procedury, wykorzystany aparat matematyczny oraz wykonane oprogramowanie. W proponowanym podejściu w celu wyznaczenia pola przemieszczeń wymagana jest akwizycja jednego obrazu wzorcowego dla konstrukcji nieodkształconej oraz kolejnych obrazów konstrukcji odkształconej uzyskanych z kamery umiejscowionej w dowolnym miejscu. W celu usunięcia efektu perspektywy oraz otrzymania obrazu analizowanej konstrukcji w tej samej skali co obraz wzorcowy zaproponowano zastosowanie metod homografii, która wymaga detekcji tych samych punktów kontrolnych w obu obrazach. W celu zwiększenia dokładności pomiarowej opracowano metody podpikselowe

oparte o dopasowanie danych przy pomocy funkcji kwadratowej.

## 2. METODOLOGIA POMIARÓW

W skład opracowanej metodyki pomiaru deformacji konstrukcji wchodzi cztery moduły (rys. 1): kalibracja systemu, dopasowanie obrazów w oparciu o detekcję narożników i macierz homografii celem usunięcia perspektywy, wyznaczenie pola przemieszczeń za pomocą współczynnika korelacji oraz zwiększenie dokładności pomiarowej poprzez wykorzystanie technik podpikselowych.



Rys. 1. Metodologia realizacji badań

### 2.1. Kalibracja systemu

Kalibracji systemu dokonano za pomocą opracowanej analizy obrazu z segmentacją zorientowaną regionowo opisaną w pracach [12, 13]. W tym celu na badaną konstrukcję naklejono wzorzec kalibracyjny w postaci okręgu o znanej średnicy,  $D_{mm}$ . Z pobranego obrazu obiektu, w oparciu o opracowany algorytm obliczono średnicę obrazu wzorca kalibracyjnego z zależności (1).

$$D_{pix} = \sqrt{\frac{4 * Pole\_Powierzchni\_Wzorca}{\pi}} [piksel] \quad (1)$$

Mając znaną wartość średnicy,  $D_{mm}$ , wyrażoną w mm obliczono współczynnik skali  $W_{mm\_pix}$  informujący o liczbie pikseli przypadających na 1 mm analizowanego obiektu z zależności:

$$W_{mm\_pix} = D_{mm}/D_{pix} \quad (2)$$

W efekcie uzyskany wektor pola przemieszczeń wyrażony został w jednostkach SI, mm, poprzez przemnożenie składowych przez współczynnik skali.

Współczynnik skali w opracowanej metodzie wyznaczany jest z dokładnością pod-pikselową.

### 2.2. Usunięcie zniekształceń perspektywicznych z obrazu

Przekształcenie homograficzne, opisujące perspektywiczną transformację punktów leżących na jednej płaszczyźnie, znajduje szerokie zastosowanie w metodach komputerowego przetwarzania obrazów. Wykorzystywane jest między innymi do otrzymywania syntetycznych widoków na podstawie jednego rzeczywistego [25], tworzenia panoram z sekwencji obrazów (mosaicing) [25, 28], rekonstrukcji fotografii obiektów architektonicznych [29] oraz wstępnego przetwarzania obrazu dla aplikacji służących do automatycznej analizy dokumentów [30].

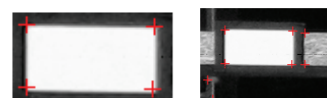
W prezentowanej pracy zastosowano przekształcenie homograficzne do usuwania zniekształceń perspektywicznych z fotografii badanego obiektu. Założono, że zdjęcie konstrukcji nieobciążonej, będące obrazem odniesienia, zostało zarejestrowane bez zniekształceń perspektywicznych. Fotografie obciążonej konstrukcji wykonano z kilku różnych punktów przestrzeni, przez co posiadały one widoczne, niepożądane zniekształcenia perspektywiczne.

Wyznaczone współrzędne odpowiadających sobie znaczników na obrazie odniesienia oraz obrazie konstrukcji obciążonej posłużyły do znalezienia macierzy  $H$  opisującej przekształcenie perspektywiczne współpłaszczyznowych punktów na obrazie odniesienia w punkty na obrazie analizowanym. Zastosowanie odwrotnego przekształcenia  $H^{-1}$  dla każdego z punktów obrazu analizowanego pozwoliło na usunięcie z niego zniekształceń perspektywicznych.

#### 2.2.1. Wybór odpowiadających sobie punktów na dwóch obrazach – detektor Harris'a

Założono, że odpowiadające sobie punkty w dwóch obrazach są narożnikami współpłaszczyznowych znaczników na sztywnym elemencie badanej konstrukcji (rys. 2). Do detekcji tych punktów zastosowano detektor narożników Harris'a [26, 27].

$$C(x) = \det(G(x)) + k * \text{trace}^2(G(x)) \quad (3)$$



Rys. 2. Cztery pary odpowiadających sobie punktów wykryte na obrazie odniesienia oraz na jednym z analizowanych obrazów o znacznych zniekształceniach perspektywicznych

### 2.2.2. Wyznaczenie macierzy homografii $H$

Po znalezieniu co najmniej czterech par korespondujących punktów została wyznaczona macierz przekształcenia homograficznego  $H$ .

Przez  $x_r = x_r\{x, y, I\}$  oznaczono współrzędne jednorodne współpłaszczyznowych punktów na obrazie odniesienia a przez  $x_r^{i'} = x_r^i\{x', y', I\}$  współrzędne odpowiadających im punktów na  $i$ -tym analizowanym obrazie. Przekształcenie opisujące transformację współpłaszczyznowych punktów z obrazu odniesienia w odpowiadające im punkty na  $i$ -tym obrazie, zniekształconym perspektywnie, jest opisane przez równanie (4).

$$x_r^{i'} = H_i x_r \quad (4)$$

Lub we współrzędnych niejednorodnych za pomocą zależności (5).

$$\begin{aligned} x' &= \frac{h_{11}x + h_{12}y + h_{13}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}}, \\ y' &= \frac{h_{21}x + h_{22}y + h_{23}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie:  $h_{ij}$  są elementami macierzy homografii o postaci (6):

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

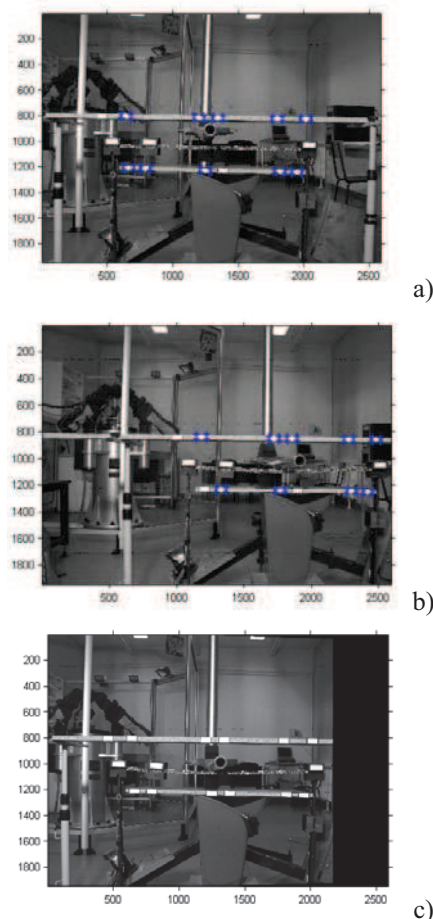
Macierz  $H$  może zostać jednoznacznie wyznaczona gdy znane są położenia co najmniej 4 odpowiadających sobie punktów współpłaszczyznowych.

### 2.2.3. Rektyfikacja obrazów (usunięcie zniekształceń perspektywnych)

Odwrotne przekształcenie homograficzne  $H^{-1}$  użyte na punktach współpłaszczyznowych  $x_r^{i'}$  powoduje ich transformację w punkty o współrzędnych o takich wartościach, jak współrzędne ich odpowiedników na obrazie odniesienia. Jeżeli wszystkie punkty obrazu  $x'$  zostaną transformowane zgodnie z zależnością (7) zniekształcenia perspektywnie wybranej płaszczyzny z tego obrazu zostaną usunięte.

$$x = H^{-1} x' \quad (7)$$

Wyniki opisaney procedury dla przykładowego obrazu pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Przykład usunięcia perspektywy z analizowanego obrazu: a) obraz odniesienia, b) obraz ze zniekształceniami perspektywnymi, c) obraz w którym usunięto zniekształcenia perspektywiczne. W przypadku a i b zaznaczono odpowiadające sobie punkty

### 2.3. Korelacja obrazu

Korelacja obrazu umożliwia porównanie dwóch obrazów pobranych w różnych stanach analizowanej konstrukcji: jeden przed deformacją, drugi po deformacji. Stanowi ona miarę dopasowania ponieważ w jej wyniku otrzymuje się wielkość stopnia podobieństwa między określonym obszarem obrazu a szukanym wzorcem.

Do wyznaczenia pola przemieszczeń wykorzystano znormalizowaną korelację wzajemną (ang. *Normalized Cross-Correlation*) opisaną wzorem [22, 23, 24]:

$$ZCC(u, v) = \frac{\sum_{x,y} (f_n(x, y) - \bar{f}_n)(f_d(x-u, y-v) - \bar{f}_d)}{\sqrt{\sum_{x,y} (f_n(x, y) - \bar{f}_n)^2 \sum_{x,y} (f_d(x-u, y-v) - \bar{f}_d)^2}} \quad (8)$$

gdzie:

$f_n(x, y)$  – wartość intensywności obszaru obrazu wzorca dla piksela o współrzędnych  $(x, y)$ -obraz przed deformacją,  $\bar{f}_n$  wartość średnia funkcji intensywności dla analizowanego obszaru;

$f_d(x-u, y-v)$  – wartość intensywności obszaru obrazu wzorca dla piksela o współrzędnych  $(x-u, y-v)$ - obraz po deformacji;

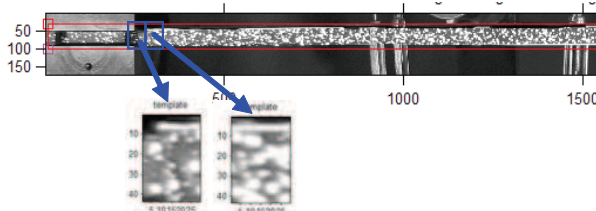
$\bar{f}_d$  - wartość średnia funkcji intensywności dla analizowanego obszaru po deformacji;

$(u, v)$  – składowe przemieszczenia między dwoma obrazami;

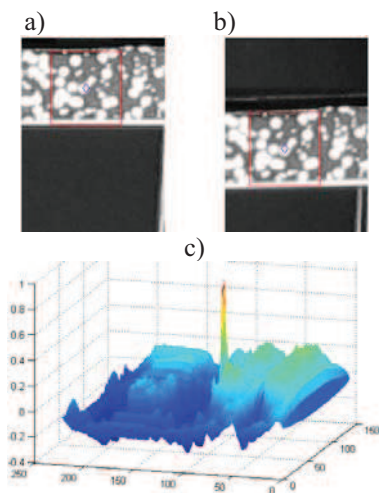
$(x, y)$  – współrzędne położenia piksela w obrazie wzorcowym.

Znormalizowany współczynnik korelacji przyjmuje wartości z zakresu  $[-1, 1]$ . Gdy poziomy jasności obszaru tekstury obrazu wzorcowego pokrywają się z wartościami poziomów jasności tekstury obrazu belki zdeformowanej wówczas współczynnik wynosi 1. Gdy tekstury nie pokrywają się współczynnik wynosi 0. Wartość -1 oznacza korelację odwrotną.

W celu obliczenia korelacji na badaną konstrukcję naklejono taśmę o losowo rozmieszczonych wzorcach jasności (rys. 4).



Rys. 4. Fragment belki z naklejoną taśmą o losowym rozkładzie poziomów jasności oraz przykład jej podziału na obszary obrazu reprezentujące wzorce odniesienia w funkcji korelacji



Rys. 5. Odpowiadające sobie obszary dla konstrukcji: a) nieodkształconej; b) odkształconej oraz c) otrzymany znormalizowany współczynnik korelacji (Wynik funkcji korelacji ZCC dla belki odkształconej. Przykładowa wartość wyznaczonego przemieszczenia dla analizowanego obszaru:

$$D_{xy} = [0.02, -9.88] [mm]$$

Następnie wyznaczono znormalizowany współczynnik korelacji (8) dla wybranych rozmiarów wzorców odniesienia (np. 48×44) dla

obszarów konstrukcji niezdeformowanej i odkształconej pod wpływem obciążenia (rys. 5).

Wektor przemieszczenia dla jednego punktu pomiarowego wyznaczono jako różnicę między odpowiadającymi sobie składowymi przemieszczenia:  $x$  i  $y$ , obliczonymi ze znormalizowanego współczynnika korelacji dla obrazów konstrukcji przed i po deformacji. Dla wszystkich punktów pomiarowych obliczonych w powyższy sposób otrzymano pole przemieszczeń reprezentujące deformację belki (rys. 7.b).

#### 2.4. Technika podpikselowa

W przypadku wyznaczenia maksimum funkcji korelacji, której wynikiem są całkowitoliczbowe położenia piksela na siatce obrazu, metoda podpikselowa umożliwia na interpolację jej wyniku do zmiennoprzecinkowej wartości co w efekcie powoduje wzrost dokładności pomiarowej w zakresie 0.01-0.1 części piksela.

Opracowany algorytm pobiera całkowitoliczbową maksymalną wartość położenia piksela otrzymaną ze współczynnika korelacji ZCC i dokonuje dopasowania danych do jej otoczenia. Pod uwagę brane jest cztero-elementowe sąsiedztwo. Dopasowanie realizowane było funkcją kwadratową poprzez wyznaczenie współczynników paraboli oraz jej wartości maksymalnej [19-21]:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (9)$$

$$x = -b/2a \quad (10)$$

Współczynniki paraboli (9) obliczono dla punktów (biorąc pod uwagę wiersze i kolumny obrazu): dla wierszy  $(f(x-1, y), f(x, y), f(x+1, y))$ ; dla kolumn  $(f(x, y-1), f(x, y), f(x, y+1))$ , zaś położenie dla którego parabola osiąga maksimum wyznaczono z pierwszej pochodnej (9) i uzyskano zależność (10).

### 3. STANOWISKO BADAWCZE - EKSPERYMENT

Badanym obiektem była rama stalowa obciążona statycznie siłą o kierunku pionowym skupioną w jednym punkcie jej poziomego fragmentu (rys. 6.). Wokół ramy umieszczono znaczniki (punkty kontrolna) 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 tekstury o losowym rozkładzie wzorców jasności. Do rejestracji obrazów konstrukcji użyto aparatu fotograficznego PowerShot S2IS o rozdzielczości 2592 × 1944 (5 Mpix). Wykorzystano oświetlenie sceny o łącznej mocy 500 W.

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 za każdym razem ustawienie kamery względem niej:

- Zmieniając kąt obrotu kamery bez zmiany położenia.
- Zmieniając położenie kamery względem ramy bez zmiany jej orientacji.
- Zmieniając zarówno położenie jak i orientację kamery względem ramy.
- Umieszczając znaczniki służące do wyznaczenia homografii na płaszczyznach skośnych względem płaszczyzny ramy.

Jednym z głównych celów eksperymentu było określenie stopnia wpływu algorytmu usuwania perspektywy z obrazu zniekształconego na dokładność wyznaczania ugięcia metodą korelacji. Zbadano wpływ zmiany położenia i orientacji aparatu względem konstrukcji a także nie współpłaszczyznowości badanej konstrukcji i punktów wzorcowych na dokładność algorytmu rektyfikacji obrazu. Analizę przeprowadzono dla metod wyznaczenia ugięcia z zastosowaniem metod podpikselowych i bez ich udziału.



Rys. 6. Schemat stanowiska pomiarowego

Wykonano 14 fotografii obciążonej konstrukcji za każdym razem zmieniając położenie aparatu względem niej. Punkty z których wykonano fotografie badanego obiektu przedstawiono w tabeli 1. Zdjęcie wykonane w pierwszym położeniu przy zadanej orientacji aparatu przyjęto za obraz odniesienia.

Wartość średnia z pierwiastka błędu średniokwadratowego (RMSE) dla pomiarów wizyjnych z wykorzystaniem technik podpikselowych i bez ich zastosowania wyniosła 0,3005 mm.

W następnej kolejności dokonano badania wpływu algorytmu usuwania perspektywy z obrazu na dokładność wyznaczania ugięcia konstrukcji przy pomocy funkcji korelacji.

W pierwszym kroku analizy wyznaczono ugięcie badanej ramy w 23 punktach pomiarowych korzystając z obrazu konstrukcji nieobciążonej oraz pierwszego zdjęcia ramy (wykonanego z tego samego położenia co obraz wzorcowy). Otrzymany

przebieg ugięcia w dalszej analizie posłużył jako przebieg odniesienia względem którego liczono błąd wyznaczenia ugięcia ramy wynikający z rektyfikacji obrazu. Analizę przeprowadzono dla metody „pikselowej” i podpikselowej.

Tabela 1. Zestawienie położenia aparatu podczas przeprowadzania pomiarów.  $T_z$  - odległość aparatu od położenia początkowego;  $T_x$  - przemieszczenie aparatu od położenia początkowego, równoległe względem ramy

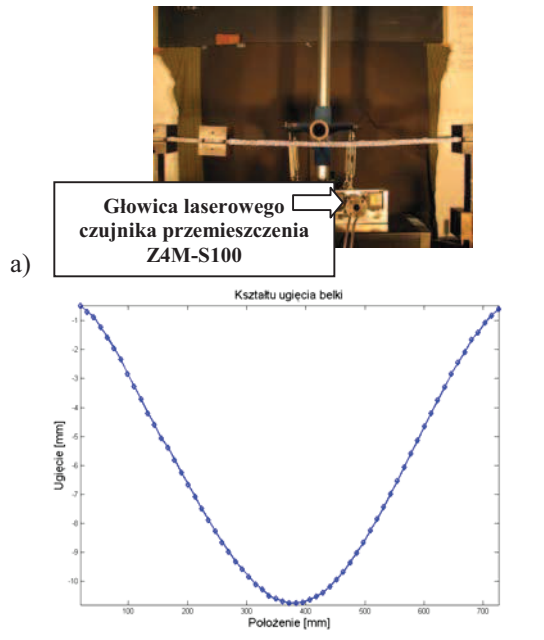
Nr fotografii	Położenie Aparatu	Orientacja aparatu
1	0	0
2	0	Obrót -7 deg w prawo
3	0	Obrót -2.5 deg w prawo
4	0	Obrót 7 deg w lewo
5	0	Obrót 2.5 deg w lewo
6	$T_z = -7$ cm	0
7	$T_z = -7$ cm, $T_x = 14$ cm	0
8	$T_z = -18$ cm	0
9	$T_z = -40$ cm	0
10	$T_z = -40$ cm	Obrót -10 deg w prawo
11	$T_z = -40$ cm	Obrót -5 deg w prawo
12	$T_z = -40$ cm	Obrót +5 deg w lewo
13	$T_z = +26$ cm	0
14	$T_z = -10$ cm	Obrót 10 deg w prawo

#### 4. WYNIKI

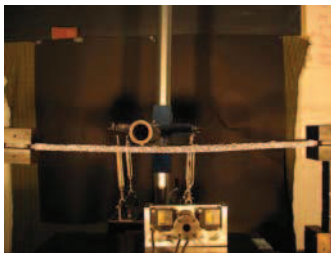
Przed przystąpieniem do badań dokonano weryfikacji stopnia dokładności pomiarowej proponowanego systemu wizyjnego poprzez porównanie z pomiarem laserowym w wybranym punkcie konstrukcji (rys. 7). Dla serii pomiarów przy różnych wartościach obciążenia belki oraz odległości aparatu średni błąd między pomiarem laserowym czujnikiem przemieszczenia (OMRON Z4M-S100 o rozdzielczości 0.008mm), a systemem wizyjnym wyniósł 0.1172mm oraz 0.0372mm w przypadku zastosowania technik podpikselowych.

W celu uwydatnienia zalet technik podpikselowych na rys. 8 przedstawiono wyniki pomiarów z zastosowaniem metody podpikselowej oraz bez jej wykorzystania do pomiaru deformacji belki dla małej wartości obciążenia. Jako rezultat zastosowania dopasowania danych funkcją kwadratową otrzymano dużo gładszą oraz dokładniejszą krzywą reprezentującą deformację belki. Uzyskany błąd RMSE między pomiarem z zastosowaniem techniki podpikselowej oraz bez jej użycia wyniósł: 0,2768 mm.

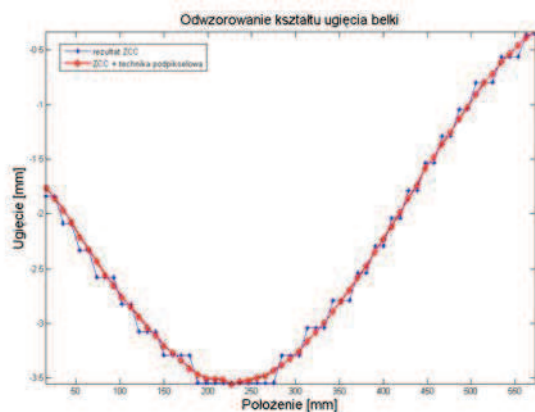
Wartość bezwzględna różnicy pomiędzy ugięciem wyznaczonym z obrazu pierwszego, a ugięciem otrzymanym z wszystkich pozostałych obrazów we wszystkich punktach pomiarowych bez zastosowania techniki podpikselowej przedstawiono na rys. 9, natomiast z jej wykorzystaniem na rys. 10.



b) Rys. 7. Weryfikacja pomiaru wizyjnego poprzez porównanie z pomiarem laserowym: a) badana rama z głowicą laserową Z4M-S100, b) wyznaczone za pomocą ZCC pole przemieszczeń reprezentujące deformację stalowej ramy



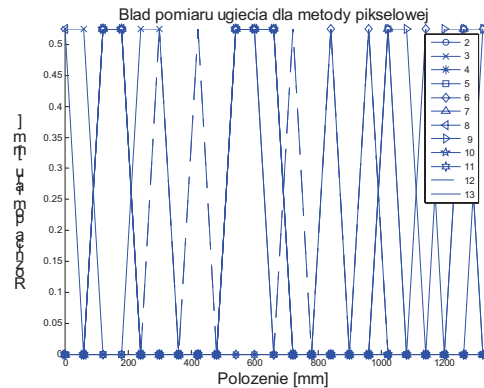
a) fragment stalowej ramy



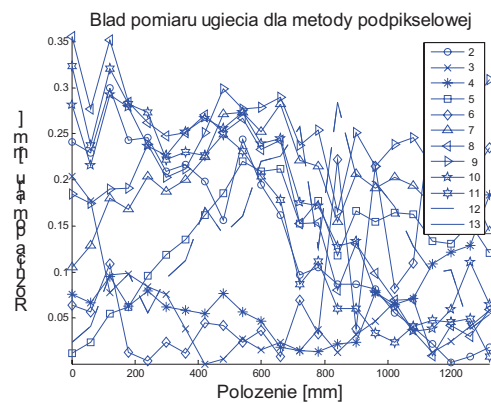
b) odwzorowanie kształtu ugięcia belki

Rys. 8. Wpływ wykorzystania metod podpikselowych na dokładność pomiaru oraz jakość odwzorowania kształtu krzywej ugięcia analizowanego fragmentu belki

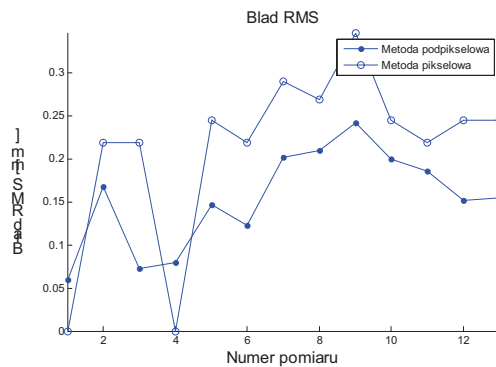
Na rys. 11 przedstawiono wartość błędu RMSE dla każdego z 13 pomiarów dla obu metod wyznaczania ugięcia.



Rys. 9. Wykres bezwzględnej różnicy pomiędzy pomiarem ugięcia z obrazu wzorcowego a pomiarami z 13 obrazów rektyfikowanych, dla każdego z punktów pomiarowych. Pomiar bez użycia metod podpikselowych



Rys. 10. Wykres bezwzględnej różnicy pomiędzy pomiarem ugięcia z obrazu wzorcowego a pomiarami ugięcia z 13 obrazów rektyfikowanych, dla każdego z punktów pomiarowych. Metoda podpikselowa



Rys. 11. Wartości błędu RMSE pomiędzy wzorcowym pomiarem ugięcia a każdym z 13 pomiarów z obrazów rektyfikowanych. (Porównanie wartości RMSE dla metody pikselowej i podpikselowej)

Średni błąd RMSE pomiędzy pomiarem wzorcowym a pomiarami z obrazów rektyfikowanych dla wszystkich 13 pomiarów wynosił odpowiednio: 0,2125 [mm] dla pomiaru bez zastosowania technik podpikselowych oraz 0,1535 [mm] z ich użyciem.

Obliczono również błąd RMSE dla pomiaru przemieszczenia w miejscu maksymalnego ugięcia. W przypadku metody pikselowej wynosił on 0,3974mm ,natomiast dla metody podpikselowej przyjął on wartość 0,1508mm.

W kolejnym etapie eksperymentu dokonano analizy wpływu braku współpłaszczyznowości wzorców służących do rektyfikacji obrazu i powierzchni badanej konstrukcji na dokładność wyznaczenia ugięcia z obrazu o usuniętej perspektywie. Porównano trzy stopnie braku współpłaszczyznowości: 1) *brak*, 2) *niewielka niewspółpłaszczyznowość dla połowy punktów kontrolnych* oraz 3) *duża niewspółpłaszczyznowość wszystkich punktów kontrolnych*. Wartość ugięcia wzorcowego w osiach  $x$  i  $y$  stalowej belki oraz różnice pomiędzy nimi, a ugięciami wyznaczonymi z obrazów rektyfikowanych przedstawiono w tabelach 2 – 5.

Tabela 2. Zestawienie błędów pomiarowych pomiędzy ugięciem wyznaczonym z obrazu wzorcowego a ugięciem otrzymanym z obrazów rektyfikowanych z wykorzystaniem niewspółpłaszczyznowych znaczników. Ugięcie w osi  $Y$  bez zastosowania techniki podpikselowej

Nr punktu/pomiaru	1	1_2	1_3
1	0	-0.5257	-2.6285
2	-1.0514	0	-2.1028
3	-2.6285	-0.5257	-2.6285
4	-4.2056	-0.5257	-2.1028
5	-5.257	0	-1.5771
6	-6.8341	0	-1.5771
7	-8.4112	0	-1.5771
8	-9.4626	0	-1.0514
9	-10.514	0	-1.0514
10	-11.5654	0	-1.0514
11	-12.0911	0	-0.5257
12	-12.0911	0	0
13	-11.5654	0	0
14	-11.0397	0	0.5257
15	-9.9883	0.5257	0.5257
16	-8.9369	0	0.5257
17	-7.3598	0.5257	1.0514
18	-6.3084	0	1.0514
19	-4.7313	0.5257	1.5771
20	-3.1542	0.5257	1.5771
21	-2.1028	0.5257	2.1028
22	-1.0514	0.5257	2.1028
23	0	0.5257	2.6285

Z powyższych tabel wynika, że brak współpłaszczyznowości znaczników i badanej konstrukcji wpływa w sposób znaczący na dokładność wyznaczenia ugięcia z obrazu rektyfikowanego. Negatywny wpływ braku współpłaszczyznowości w szczególnie sposób przejawia się podczas wyznaczania przemieszczenie w osi  $x$  belki. Ze względu na charakter obciążenia,

przemieszczenie to powinno być równe zeru lub bliskie zera. W badaniach otrzymano jednak znaczne przemieszczenia, dochodzące nawet do 3,6 mm.

Tabela 3. Zestawienie błędów pomiarowych pomiędzy ugięciem wyznaczonym z obrazu wzorcowego a ugięciem otrzymanym z obrazów rektyfikowanych z wykorzystaniem niewspółpłaszczyznowych znaczników. Ugięcie w osi  $X$  bez zastosowania techniki podpikselowej

Nr punktu/pomiaru	1	1_2	1_3
1	-0.5257	-3.6799	-3.1542
2	-0.5257	-3.1542	-3.1542
3	-0.5257	-2.6285	-3.1542
4	0	-1.5771	-2.6285
5	0	-1.0514	-2.6285
6	0	-0.5257	-2.1028
7	0	0	-2.1028
8	0	0.5257	-1.5771
9	0	1.0514	-1.5771
10	0	1.0514	-1.0514
11	0	1.5771	-0.5257
12	0	1.5771	-0.5257
13	0	2.1028	0
14	0	2.1028	0
15	0	2.1028	0.5257
16	0	2.6285	1.0514
17	0	2.6285	1.0514
18	0	2.6285	1.5771
19	0	2.6285	2.1028
20	0.5257	3.1542	3.1542
21	0	2.6285	3.1542
22	0.5257	2.6285	3.6799
23	0.5257	2.6285	4.2056

Tabela 4. Zestawienie błędów pomiarowych pomiędzy ugięciem wyznaczonym z obrazu wzorcowego a ugięciem otrzymanym z obrazów rektyfikowanych z wykorzystaniem niewspółpłaszczyznowych znaczników. Ugięcie w osi  $Y$  z wykorzystaniem metody podpikselowej

Nr punktu/pomiaru	1	1_2	1_3
1	-0.0704	-0.3456	-2.6164
2	-1.1544	-0.2844	-2.3908
3	-2.4774	-0.3223	-2.2741
4	-4.0992	-0.1595	-1.8723
5	-5.4361	-0.1973	-1.7418
6	-7.0374	-0.1757	-1.5236
7	-8.4014	-0.1346	-1.3349
8	-9.6461	-0.1057	-1.0753
9	-10.5784	-0.1779	-1.045
10	-11.4572	-0.0812	-0.6881
11	-11.8991	0.0661	-0.3666
12	-12.0224	0.0455	-0.1636
13	-11.6024	0.1627	0.1633
14	-11.0731	0.102	0.3292
15	-10.0707	0.2264	0.5578
16	-8.9549	0.1887	0.7519
17	-7.4783	0.2815	1.0576
18	-6.2026	0.2725	1.2182
19	-4.708	0.372	1.5084
20	-3.1996	0.3987	1.6773
21	-2.0327	0.4997	1.9879
22	-0.8674	0.5346	2.2677
23	-0.0318	0.659	2.5069

Tabela 5. Zestawienie błędów pomiarowych pomiędzy ugięciem wyznaczonym z obrazu wzorcowego a ugięciem otrzymanym z obrazów rektyfikowanych z wykorzystaniem niewspółpłaszczyznowych znaczników. Ugięcie w osi  $X$  z użyciem metody podpikselowej

Nr punktu/pomiaru	1	1_2	1_3
1	-0.4583	-3.6894	-3.2764
2	-0.4325	-3.0457	-3.1483
3	-0.3671	-2.4677	-3.0871
4	-0.2002	-1.5974	-2.6849
5	-0.2069	-1.273	-2.6856
6	-0.1227	-0.525	-2.2141
7	-0.0367	0.0237	-1.976
8	0.0664	0.5825	-1.5742
9	0.0866	1.0422	-1.2476
10	0.0361	1.2974	-1.1094
11	0.0753	1.6559	-0.6971
12	0.0752	1.8772	-0.4521
13	0.1405	2.1031	-0.0797
14	0.1248	2.2761	0.2763
15	0.1384	2.3396	0.6317
16	0.0895	2.6073	1.0899
17	0.1474	2.6236	1.452
18	0.1935	2.7162	1.888
19	0.2172	2.8095	2.3237
20	0.2818	2.7058	2.6828
21	0.2534	2.6502	3.2028
22	0.3331	2.5837	3.7134
23	0.305	2.5157	4.0733

Zaobserwowane błędy wynikają z metody rektyfikacji obrazu. Jest ona realizowana poprzez macierz homografii, która jest przekształceniem pomiędzy płaszczyznami. Kiedy pojawia się znaczny brak współpłaszczyznowości, macierz  $H$  zostaje błędnie wyznaczona, co prowadzi do niepoprawnego usunięcia perspektywy i wprowadzenia znacznych błędów pomiarowych.

## 5. WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań wynika, że kluczowe znaczenie na poprawność wyznaczenia ugięcia konstrukcji metodą korelacji jest zastosowana tekstura oraz wielkość wzorca odniesienia. Dla losowego rozkładu wzorców jasności istnieje możliwość dowolnego manipulowania wielkością okna przeszukiwań i nie jest ona ograniczona koniecznością zachowania stałego kształtu wzorca w oknie. Pozwala to na zwiększenie gęstości punktów pomiarowych, dzięki czemu może zostać uzyskany dokładniejszy i wygładzony obraz krzywej ugięcia. Ten rodzaj tekstury nie jest odporny na duże zakłócenia powodujące zmianę charakteru wzorca.

Wzorcy w postaci cech o określonej geometrii są bardziej odporne na przypadkowe zakłócenia oraz zmiany rozdzielczości obrazu lub oświetlenia. Nie mogą być jednak stosowane z taką samą elastycznością jest tekstura w postaci szumu, gdyż narzucają stały podział obrazu konstrukcji na fragmenty. Zwiększenie gęstości podziału wiąże się z koniecznością wykonania nowego wzorca.

Wielkość okna przeszukującego (wzorca obrazu) jest również bardzo ważnym parametrem. Jego

wzrost powoduje zwiększenie unikalności funkcji poziomów szarości, wzrost błędów geometrii oraz czasu obliczeń. Zmniejsza się gęstość punktów pomiarowych.

Główną zaletą zastosowania znormalizowanego współczynnika korelacji w porównaniu z innymi miarami funkcji korelacji jest duża odporność na szum o nieznanym rozkładzie gęstości prawdopodobieństwa, oraz na nierównomierność oświetlenia.

Dokładność wyznaczania deformacji konstrukcji przy pomocy korelacji zależy od poprawności przeprowadzenia etapu usunięcia perspektywy z obrazów zniekształconych. Jest ona tym mniejsza, im większe są zniekształcenia perspektywiczne. Badania wykazały jednak że wpływ ten jest znikomy, jeśli zniekształcenia perspektywiczne nie są duże. Nawet dla większych zniekształceń maksymalny błąd wynikający z usunięcia perspektywy wynosił 0,35 mm (dla metod podpikselowych).

Dużo większy wpływ na dokładność wyznaczenia pola przemieszczeń punktów ramy ma skośność płaszczyzny na której leżą znaczniki (wspólne punkty kontrolne) służące do wyznaczenia macierzy  $H$  w stosunku do płaszczyzny konstrukcji. W przypadku rektyfikacji obrazów z wykorzystaniem niewspółpłaszczyznowych znaczników, maksymalny błąd wyznaczonego przemieszczenia wynosił ponad 3 mm (zarówno z zastosowaniem technik podpikselowych jak i bez ich użycia). Zaletą wprowadzenia macierzy homografii jest możliwość dowolnego umiejscowienia kamery podczas akwizycji obrazu. Oznacza to kompensację błędów pomiaru związanych z względnym ruchem kamery podczas dokonywania pomiaru oraz kompensację ewentualnych drgań podłoża.

Zastosowanie technik podpikselowych po wyznaczeniu współczynnika korelacji pozwoliło na zwiększenie dokładności pomiaru ugięcia badanej ramy nawet do wartości 0,02mm. Metody te umożliwiły uzyskiwanie dokładnego i wygładzonego przebiegu krzywej ugięcia analizowanej konstrukcji.

Eksperyment potwierdził również fakt, że techniki wizyjne w stosunku do drogich technik laserowych są bardzo dobrą konkurencyjną metodą pomiarową nie tylko z uwagi na wysoką dokładność pomiarową, ale również ze względu na uniwersalność i prostotę użycia. Najmniejszy zarejestrowany błąd między pomiarem laserowym i wizyjnym wyniósł 0,0075 mm.

## PODZIĘKOWANIA

Projekt wykonano dzięki finansowemu wsparciu MNiSW, w ramach projektu nr 0526/T02/2007/02



## LITERATURA

- [1]. Bruck, H. A., McNeil, S. R., Sutton, M. A. and Peters, W. H.: *Digital Image Correlation Using Newton-Raphson Method of Partial Differential Correction*. Experimental Mechanics, 29(3), 261-267, 1989.
- [2]. Sutton, M. A., Wolters, W. J., Peters, W. H., Ranson, W. F. and McNeil, S. R.: *Determination of Displacements Using an Improved Digital Correlation Method*. Image and Vision Computing, 1(3), 133-139, 1983.
- [3]. Sutton, M. A., Cheng, M. Q., Peters, W. H., Chao Y. J. and McNeill, S. R.: *Application of an Optimized Digital Correlation Method to Planar Deformation Analysis*. Image and Vision Computing, 4(3), 143-151, 1986.
- [4]. Sutton, M. A., Turner, J. L., Bruck, H. A. and Chae, T. A.: *Full-field Representation of Discretely Sampled Surface Deformation for Displacement and Strain Analysis*. Experimental Mechanics, 31(2), 168-177, 1991.
- [5]. Sutton, M. A., McNeill, S. R., Jang, J. and Babai, M.: *Effects of Subpixel Image Restoration on Digital Correlation Error*. Journal of Optical Engineering, 27(10), 870-877, 1988.
- [6]. Kurowski P.: *Identyfikacja modeli modalnych konstrukcji mechanicznych na podstawie pomiarów eksploatacyjnych*, Praca doktorska, AGH, Kraków 2001.
- [7]. Uhl T.: *Zmienność i niepewność parametrów w analizie dynamiki konstrukcji* Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Wybrane zagadnienia analizy modalnej konstrukcji mechanicznych, Radom 2004 r. str. 185-193.
- [8]. Uhl T.: *Diagnostyka przez identyfikację* Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji "Inżynieria diagnostyki maszyn", Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004 r. str. 359-388.
- [9]. Uhl T.: *Identification Process in monitoring and diagnostics*. Advanced Mechanics of Urban Structures, CVRE Gdańsk, str.51-66.
- [10]. Uhl T.: *Application of modal analysis for monitoring and diagnostics of mechanical structures*, Advanced Course on Structural Control and Health pp. 377-423, Warszawa, 22-25 May, 2001.
- [11]. Uhl T., Lisowski W., Kurowski P.: *In operation modal analysis and its applications*, AGH Katedra Robotyki I Dynamiki Maszyn 2001.
- [12]. 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.
- [13]. Kohut P.: *Zastosowanie analizy obrazu do pomiaru przemieszczeń*, Diagnostyka Procesów Przemysłowych, s. 519- 525, Władysławowo, 15-17 Wrzesień, 2003.
- [14]. Kohut P., Kurowski P.: *Zastosowanie trójwymiarowych technik wizyjnych do pomiaru i analizy drgań*, I Kongres Mechaniki Polskiej, Warszawa, 28–31 sierpnia 2007r.
- [15]. Kohut P., Kurowski P.: *The 3D vision-based measurements for modal analysis*, Proc.of the OPTIMESS07 Workshop Leuven, , 28th-30th May 2007.
- [16]. Chu TC, Ranson WF, Sutton MA, Peters WH, *Application of digital-image correlation techniques to experimental mechanics*. Exp Mech 25:232–244, September, 1985.
- [17]. Peters WH, Ranson WF *Digital imaging technique in experimental stress analysis*. Opt Eng 21:427–431 May, 1982 .
- [18]. Peters WH, Ranson WF, Sutton MA, et al *Applications of digital image correlation methods to rigid body mechanics*. Opt Eng 22:738–742, June, 1983.
- [19]. Devernay F.: *A Non-Maxima Suppression Method for Edge Detection with Sub-Pixel Accuracy*, INRIA, Raport, N° 2724 November 1995.
- [20]. Ramdania S., Boucharab F.; Djemala K.: *Probability distribution of sub-pixel edge position*, Signal Processing, Volume 84, No 3, pp. 445-452(8), March 2004.
- [21]. Nehab D., Rusinkiewicz Sz., Davis J.: *Improved Sub-pixel Stereo Correspondences through Symmetric Refinement*, Tenth IEEE International Conference on Volume 1, Issue , pp: 557 - 563 17-21 Oct. 2005.
- [22]. Jin GC, Bao NK, Chung PS. *An advanced digital speckle correlation method for strain measurement and nondestructive testing*. SPIE 1996; 2921:572–7.
- [23]. Ma S P, Jin G C.: *New correlation coefficients designed for digital speckle correlation method (DSCM)*. SPIE, 2003, 5058: 25-33.
- [24]. Lewis J. P.: *Fast Normalized Cross-Correlation*, Industrial Light & Magic.
- [25]. Hartley R., Zisserman A., *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, 2004.
- [26]. Ma Y., Soatto S., Kosetska J., Sastry S.: *An Invitation to 3D Computer Vision* Springer-Verlag, New York 2004.
- [27]. Harris C., Stephens M. J.: *A combined corner and edge detector*. In Alvey Vision Conference pages 147-152, 1988.
- [28]. Szelinski R., Heung-Yeung S.: *Creating full view panoramic image mosaics and environment maps*. In Proceeding of the

ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics, 1997.

- [29]. Darko P., Volker S., Leif K.: *Interactive image completion with perspective correction*, Visual Comput, Springer-Verlag 2006.
- [30]. Jaganathan J., Jawahar C. V.: *Perspective Correction Methods for Camera Based-Document Analysis*, International Institute of Information Technology, India.



Prof. dr hab. inż. **Tadeusz UHL** jest kierownikiem Katedry Robotyki i Mechatroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. W swoich pracach zajmuje się zagadnieniami dynamiki konstrukcji, a zwłaszcza analizą modalną i jej zastosowaniami. Jego

zainteresowania obejmują także układy aktywnej redukcji drgań, układy sterowania i szeroko pojętą mechatronikę oraz monitorowanie stanu konstrukcji. Jest autorem 15 książek i kilkuset artykułów dotyczących wspomnianych zagadnień.



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.



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.