

**Piotr GARBACZ**

Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom

## **ANALIZA NIEPEWNOŚCI POMIARÓW W STEREOWIZYJNYM UKŁADZIE OBSERWACJI**

### **Słowa kluczowe**

Optyczna inspekcja, układ stereowizyjny, cyfrowa korelacja obrazów.

### **Streszczenie**

W artykule przedstawiona została analiza niepewności pomiarowej dla stereowizyjnego układu obserwacji. Przeprowadzono przegląd stosowanych technik ilościowej oceny niepewności tej metody. Przeprowadzono analizę czynników wpływających na wielkość błędów, wynikających zarówno z cyfrowej korelacji obrazów, jak również procesu rekonstrukcji 3D, z uwzględnieniem procesu kalibracji kamery. Oszacowano niepewność pomiarową dla przykładowej konfiguracji systemu.

### **Wprowadzenie**

Bezkontaktowe, optyczne pomiary 3D na przestrzeni ostatnich lat stały się jednym z podstawowych narzędzi wykorzystywanych w badaniach eksperymentalnych. Jedną z metod należących do tej grupy pomiarów jest stereowizja. Charakteryzuje się ona dużą szybkością działania, a także możliwością zastosowań w skali mikro i makro. Do prawidłowego stosowania tej techniki konieczne jest zapewnienie odpowiedniej, dla danego przypadku, orientacji kamer względem siebie i badanej próbki oraz wykonanie kalibracji parametrów wewnętrznych i zewnętrznych kamer. Wymienione czynniki mają wpływ na jakość uzyskanej

stereo-pary obrazów oraz na dokładność wyznaczonej na ich podstawie mapy głębi. Złożoność tak wykonanego pomiaru skutkuje natomiast trudnością w określeniu niepewności pomiaru. Próby przedstawienia ilościowej analizy błędów tej metody były podejmowane przez różnych badaczy. Podejście empiryczne dla określenia wpływu kalibracji na to zagadnienie zaprezentował Roger Y. Tsai w 1987 [11]. Techniki stochastyczne, bazujące na rozwinięciu w szereg Taylora funkcji rozkładu zmiennych losowych stosowali m.in. B. Kamgar-Parsi [6] i P.W. Wong [21]. Inne podejście opierające się na optymalizacji obliczeń transformacji rzutowej proponował K. Kanatani [7]. Kolejni badacze podejmowali próby wykorzystania metody sumy najmniejszych kwadratów TLS [10] oraz szacowania maksymalnego prawdopodobieństwa MLE [2] przy estymacji wartości parametrów wewnętrznych i zewnętrznych kamer.

Większość autorów publikacji nie obejmuje jednak w swoich rozważaniach całości zagadnienia, a jedynie jego wybrane zagadnienia. Ponadto zakładana jest znajomość pewnych parametrów lub pomijany jest ich wpływ na dokładność pomiaru w stereowizyjnym układzie obserwacji. Często nieuwzględniane są błędy wynikające z programowego procesu dopasowywania pikseli, którego skuteczność zależy natomiast od jakości uzyskanych obrazów na etapie akwizycji. Próba pełnej analizy niepewności pomiaru w systemie stereowizyjnym podejmowana jest przez nielicznych badaczy [18].

## **1. Wpływ programowego procesu dopasowywania obrazów stereo na niepewność pomiaru**

Istotnym etapem w pomiarach 3D z wykorzystaniem stereowizji jest proces programowego dopasowywania pikseli na parze obrazów stereo. Algorytmy wykorzystywane do tego zadania, w celu zapewnienia większej dokładności, zazwyczaj są uzupełniane o funkcję interpolacji danych z obrazu do wartości sub-pikseli. W tym celu wartości między kolejnymi pikselami są aproksymowane z wykorzystaniem najczęściej 256 stopniowej skali szarości. Operacja ta obciążona jest jednak ryzykiem powstania błędów. Jedną z najczęściej stosowanych metod dopasowywania jest cyfrowa korelacja obrazów DIC (ang. Digital Image Correlation) [14]. Pomiarzy z wykorzystaniem DIC są od wielu lat szeroko stosowane do wyznaczania pola przemieszczeń 2D dla próbki poddawanej obciążeniom mechanicznym. Analiza niepewności dla tej metody była podejmowana przez wielu badaczy a podstawowy element wymieniany przez nich to sinusoidalna zależność błędów systematycznych procesu dopasowywania od wartości sub-pikseli.

Według teorii [17] opisany błąd systematyczny cyfrowej korelacji dla obrazów bez szumu jasności pikseli, ma przebieg sinusoidalny z amplitudą o wartości 0,01 pikseli. Wraz ze wzrostem poziomu szumu jasności pikseli do 5% wartość maksymalna błędu wrasta dwukrotnie. Statystyczny poziom szumu wy-

nika z kilku czynników zależnych od konfiguracji sprzętowej systemu [12]: szumu parametrów wewnętrznych kamer, szumu wolnych fotonów na matrycy, różnych warunków oświetlenia kamer, poziomu jasności pikseli, przestrzennego gradientu poziomu jasności pikseli, tekstury znajdującej się na badanej powierzchni. Dla obecnie dostępnych kamer błąd korelacji obrazów wynikający z poziomu szumu jest mniejszy niż 1/200 wartości piksela. Błąd losowy w zależności od wartości sub-piksela rośnie dynamicznie wraz ze wzrostem poziomu szumu [3].

Kolejnym czynnikiem wpływającym na dokładność procesu dopasowywania jest rozmiar obrazu wzorca. Im jest mniejszy, tym krótszy jest czas wykonywania algorytmu korelacyjnego, jednak dla zachowania wysokiej dokładności musi zawierać wystarczająco dużo informacji, w celu uniknięcia błędnych dopasowań [8]. Wpływ na prawidłowość wyniku ma także krok, z jakim wzorec ten jest przemieszczany po analizowanym obrazie [5]. Istotnym aspektem jest również rozmiar pojedynczych elementów tworzących wzorec i sposób, w jaki są na nim rozmieszczone [16]. Parametry te są natomiast ściśle powiązane z funkcją interpolacyjną. W celu redukcji błędów pochodzących z tych trzech źródeł wymagana jest optymalizacja ich parametrów [1].

## **2. Wpływ rekonstrukcji trójwymiarowej na niepewność pomiaru stereowizyjnego**

Poza błędami związanymi z korelacją obrazów duży wpływ na niepewność pomiaru stereowizyjnego ma proces rekonstrukcji 3D. Podczas jego realizacji, na podstawie współrzędnych dopasowanych pikseli oraz parametrów zewnętrznych i wewnętrznych kamer, uzyskanych podczas procesu kalibracji, wyznaczana jest mapa głębi. Jej dokładność zależy od precyzyjnego określenia parametrów kamer. Parametry wewnętrzne są ściśle powiązane z zastosowaną optyką w danym torze wizyjnym. Tworzą one tzw. macierz kalibracji –  $K$ , która składa się z pięciu parametrów metrycznych:  $f_x$  – ogniskowa pozioma,  $f_y$  – ogniskowa pionowa, współrzędne punktu głównego  $C$  oraz  $s$  – współczynnik określający kąt między osiami  $x$  i  $y$  matrycy światłoczułej kamery. Dodatkowo konieczne jest uwzględnienie zniekształceń geometrycznych układów optyki: radialnych i tangencjalnych. Opisane parametry kamer uzyskuje się za pomocą autokalibracji lub kalibracji manualnej wykorzystującej do tego celu specjalny wzorec. Pierwsza z wymienionych metod charakteryzuje się jednak znacznym błędem dopasowania, wynoszącym nawet kilka pikseli. Natomiast prawidłowo przeprowadzony proces kalibracji z wykorzystaniem drugiego sposobu gwarantuje precyzję nawet do 1 piksela [13]. Pozostałymi parametrami koniecznymi do rekonstrukcji trójwymiarowej są macierze rotacji  $R$  i translacji  $T$  z globalnego układu współrzędnych do układu współrzędnych kamer, czyli tzw. parametry zewnętrzne kamer. Ich znajomość pozwala na wyznaczenie macierzy projekcyj-

nej  $P$ , która wiąże ze sobą dowolny punkt przestrzeni ze współrzędnymi na płaszczyznach obrazów kamer za pomocą równania:

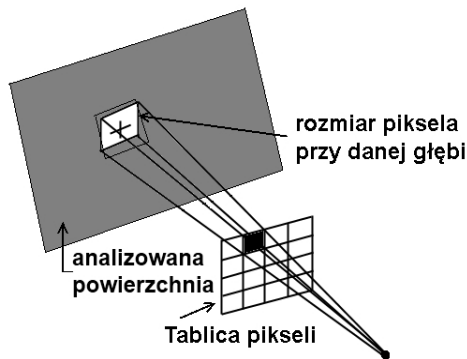
$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} = P \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad P = K \cdot \begin{bmatrix} R & T \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie:

$$R = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} & r_{xz} \\ r_{yx} & r_{yy} & r_{yz} \\ r_{zx} & r_{zy} & r_{zz} \end{bmatrix} \text{ – macierz kosinusów kierunkowych,}$$

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \text{ – wektor translacji.}$$

Analiza dokładności przeprowadzonej kalibracji może być wykonana na kilka sposobów. Jednym z nich jest określenie dokładności pomiaru współrzędnych 3D, uzyskanych za pomocą triangulacji z użyciem parametrów uzyskanych podczas kalibracji [20]. Głównym ograniczeniem procesu kalibracyjnego jest rzeczywista rozdzielczość pomiarowa kamer, która zależy od rozdzielczości matryc, odległości od badanej próbki oraz ogniskowej. Na rys. 1 przedstawiona została tablica pikseli, której element za pomocą projekcji wstecznej jest umieszczony na odpowiadającym mu obszarze obserwowanej powierzchni.



Rys. 1. Projekcja wsteczna matrycy na powierzchnię obserwowanej próbki

Obszar ten odpowiada niepewności kalibracji wynikającej z rozdzielczości pomiarowej kamer. Oznaczając prawidłowe współrzędne w przestrzeni dla da-

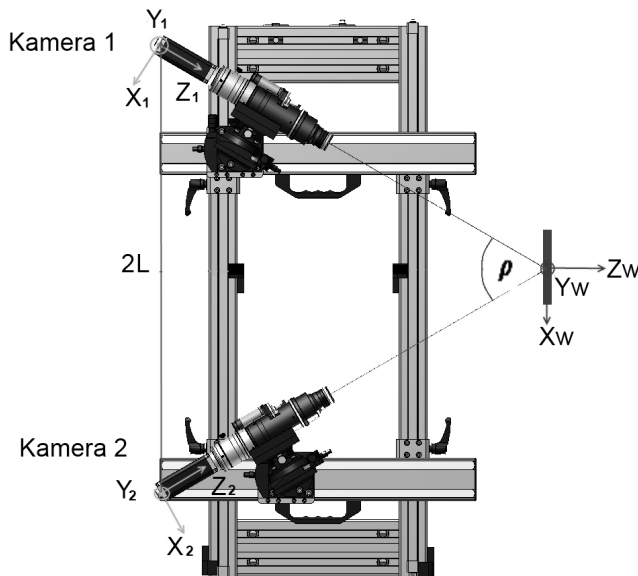
nego  $i$ -tego punktu kontrolnego  $(x_i, y_i, z_i)$  oraz odpowiadające mu współrzędne uzyskane po rekonstrukcji powierzchni za pomocą triangulacji jako  $(x'_i, y'_i, z'_i)$ , definiowany jest znormalizowany błąd kalibracji stereo (ang. Normalized Stereo Calibration Error) [20]:

$$NSCE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(x'_i - x_i)^2 + (y'_i - y_i)^2}{z_i^2 (f_x^{-2} + f_y^{-2}) / 12} \right] \quad (2)$$

gdzie:

$f_x$  – ogniskowa pozioma,  $f_y$  – ogniskowa pionowa,  $n$  – liczba punktów kontrolnych,

Dla wartości  $NSCE < 1$  średni błąd rekonstrukcji jest mniejszy niż szum digitalizacji dla danej głębi pomiaru. Wartość błędu  $NSCE \approx 1$  oznacza prawidłową kalibrację, przy której dystorsja pozostała po korekcji współrzędnych punktów jest pomijalna w stosunku do szumu digitalizacji dla danej głębi. Wartość  $NSCE > 1$  jest jednoznaczna z błędnym rezultatem kalibracji. Prawidłowość przeprowadzonej kalibracji jest jednak tylko jednym z czynników decydujących o dokładności rekonstrukcji 3D. Wszystkie parametry kamer, które odpowiadają danej konfiguracji systemu stereo, w różnym stopniu wpływają na niepewność pomiaru.



Rys. 2. Schemat układu stereowizyjnego opracowanego w ITeE – PIB

Według teorii [18] współrzędne globalne  $X_w$  i  $Z_w$  obserwowanego przez system sterowizyjny (rys. 2) punktu w przestrzeni mogą być wyznaczone na podstawie zależności (3). Zakłada się w tym przypadku, że jego przemieszczenie możliwe jest jedynie w płaszczyźnie  $X_w$ - $Z_w$ , a współrzędna  $Y_w = 0$ . Osie  $Y_w$ ,  $Y_1$ ,  $Y_2$  są prostopadłe do płaszczyzny utworzonej przez dwie osie optyczne oraz linię bazową między kamerami. Osie optyczne  $Z_1$  i  $Z_2$  przecinają się w początku globalnego układu współrzędnych. Kąty obrotów względem osi  $X$  i  $Z$  układów kamer są równe zero. Natomiast kąt między osiami optycznymi kamer wynosi  $\rho$ . Zniekształcenia optyczne są pomijalne lub usunięte w trakcie kalibracji.

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Z_w \end{bmatrix} = M^{-1} \cdot b \quad (3)$$

gdzie:

$$M = \begin{bmatrix} f_{x1} \cos(\rho/2) + (C_{x1} - X_{s1}) \sin(\rho/2) & -f_{x1} \sin(\rho/2) + (C_{x1} - X_{s1}) \cos(\rho/2) \\ f_{x2} \cos(\rho/2) + (C_{x2} - X_{s2}) \sin(\rho/2) & -f_{x2} \sin(\rho/2) + (C_{x2} - X_{s2}) \cos(\rho/2) \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} -(C_{x1} - X_{s1}) \frac{L}{\cos(\rho/2)} \\ -(C_{x2} - X_{s2}) \frac{L}{\cos(\rho/2)} \end{bmatrix}$$

- $L$  – odległość bazowa kamer,
- $f_{x1}, f_{x2}$  – ogniskowe poziome kamer,
- $\rho$  – kąt między osiami optycznymi kamer,
- $C_{x1}, C_{x2}$  – współrzędne punktów głównych kamer,
- $X_{s1}, X_{s2}$  – współrzędne odpowiadających sobie pikseli na obrazach

Błąd systematyczny w tym przypadku jako pomiar pośredni może być wyznaczony na podstawie wzoru (4). Analizowane punkty mogą w tym przypadku przemieszczać się jedynie po prostej  $X_w$ . Przyjęto także, że współrzędna pikselowa  $X_{s1}$  na płaszczyźnie obrazowej kamery referencyjnej 1 jest wartością prawidłową, nieobciążoną żadnymi błędami.

$$\begin{bmatrix} \Delta X_w \\ \Delta Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_w}{\partial X_{s2}} \\ \frac{\partial Z_w}{\partial X_{s2}} \end{bmatrix} \cdot \Delta X_{s2} \quad (4)$$

gdzie:

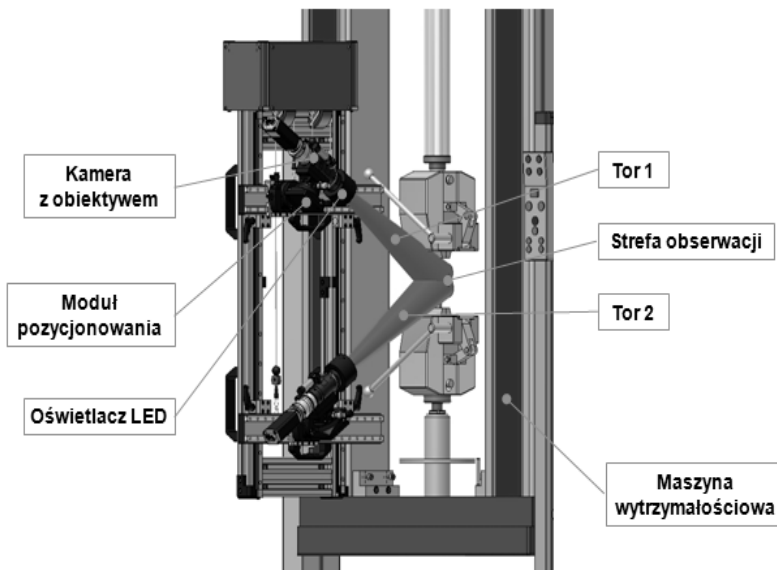
- $\Delta X_{s2}$  – błąd systematyczny procesu dopasowywania punktów stereo.

### 3. Analiza modelu eksperymentalnego

W celu oceny wpływu zmiany wybranych parametrów systemu na niepewność całego układu, przeprowadzona została analiza modelu eksperymentalnego systemu stereowizyjnego umożliwiającego monitorowanie procesów destrukcji materiałów, opracowywanego w ramach projektu badawczego [4]. Jako parametry systemu stereowizyjnego (tab. 1), uwzględnione w dalszych rozważaniach, przyjęto parametry konstrukcyjne opracowanego stanowiska eksperymentalnego. Model wirtualny systemu, przystosowany do montażu na maszynie wytrzymałościowej, przedstawiony został na rys. 3.

Tabela 1. Podstawowe parametry konstrukcyjne systemu stereowizyjnego

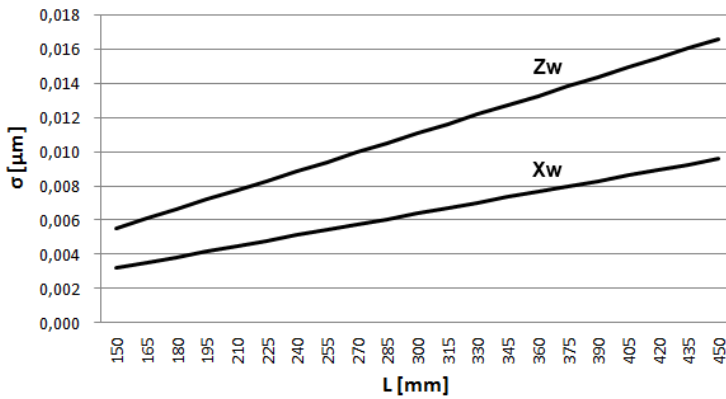
$f_{x2}$ [px]	$\rho$ [°]	L [mm]
$3,508 \cdot 10^4$	60	300



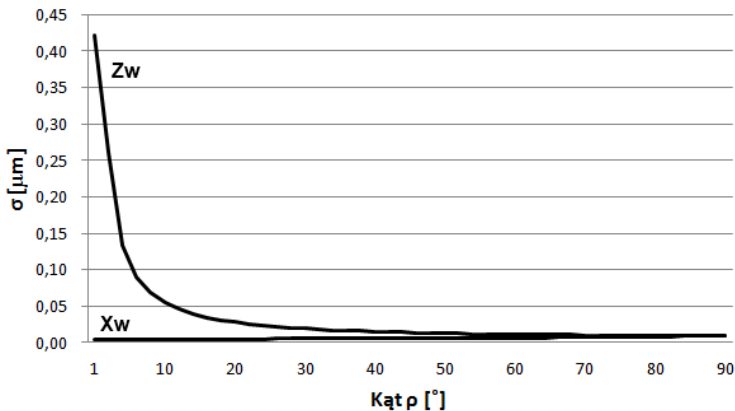
Rys. 3. Model stanowiska eksperymentalnego

Zmiana wartości jednego z parametrów systemu wpływa w różnym stopniu na wartość odchylenia standardowego pomiaru współrzędnych 3D. Przykładowo dla dwóch parametrów ściśle związanych z geometryczną konfiguracją systemu zależności te przedstawione zostały na rys. 4 i 5. Przy ich wyznaczeniu wykorzystano prawo przenoszenia odchyłeń standardowych. Ze względu na bezpośrednią zależność błędów wynikających z cyfrowego procesu korelacji

obrazów od właściwości tekstury obserwowanej powierzchni oraz jej aktualnych warunków oświetlenia przyjęto wartość odchylenia standardowego pozycji piksela, zgodnie z wynikami badań zawartymi w pracy [19], równą  $\sigma = 1,12 \cdot 10^{-3}$  [px]. Wartość ta odpowiada następującym parametrom pomiaru: jasność tekstury od 24 do 245 (8-bitowa skala szarości), funkcja interpolacyjna sub-piksela – funkcja sklejana III stopnia, rozmiar wzorca dopasowującego 209x209, poziom szumu jasności piksela – 1,01.



Rys. 4. Odchylenie standardowe położenia punktu w kierunku osi Xw i Zw globalnego układu współrzędnych dla różnych odległości bazowych kamer



Rys. 5. Odchylenie standardowe położenia punktu w kierunku osi Xw i Zw globalnego układu współrzędnych dla różnych kątów między osiami optycznymi kamer

Na rys. 4 przedstawiono zależność odchylenia standardowego położenia analizowanego punktu od odległości bazowej między punktami głównymi ka-



mer. Dla współrzędnej  $Z_w$  wartość ta rośnie liniowo dwukrotnie szybciej niż w przypadku współrzędnej w kierunku osi  $X_w$ . Przy zmianie kąta między osiami optycznymi kamer wartość odchylenia standardowego w kierunku osi  $X_w$  wzrasta nieznacznie przy zwiększaniu wartości kąta  $\rho$ . Dla wartości w kierunku osi  $Z_w$  zależność ta rośnie w przybliżeniu wykładniczo. Dla małych wartości kąta  $\rho < 30^\circ$  odchylenie standardowe jest nawet kilka razy większe niż dla kątów powyżej  $\rho > 60^\circ$ . Uzyskane wyniki wskazują, że duża wartość kąta  $\rho$  jest korzystna dla prawidłowej rekonstrukcji punktów znajdujących się poza płaszczyzną referencyjną analizowanej próbki. Dla parametrów systemu podanych w tabeli 1 wyznaczone zostały także wartości odchylenia standardowego w kierunkach  $X_w$  i  $Z_w$  w zależności od pozycji obserwowanego punktu na osi  $X_w$ . Zakres możliwych przemieszczeń przyjęto zgodnie z założonym dla systemu polem obserwacji w skali makro, wynoszącym  $50 \times 50$  mm. Wartości odchylenia standardowego w obydwu kierunkach, w podanym zakresie przemieszczeń  $25 \text{ mm} < X_w < 25 \text{ mm}$ , zmieniają się nieznacznie. Pozwala to na określenie ich średnich wartości w podanym obszarze obserwacji. Przyjmując rozkład Gaussa [9] prawdopodobieństwa pomiaru oraz poziom ufności  $k = 3$ , niepewności rozszerzone w omawianym przypadku wynoszą odpowiednio dla współrzędnej  $Z_w - u_{Z_w} = 3,3 \cdot 10^{-5}$  [mm], a dla współrzędnej  $X_w - u_{X_w} = 1,9 \cdot 10^{-5}$  [mm]. Ze względu na nieliniowy charakter błędów rekonstrukcji 3D rozkład normlany może być stosowany dla uproszczenia jedynie dla punktów znajdujących się w niedużej odległości od kamer. W innych przypadkach wymagane są bardziej zaawansowane rozwiązania, jak na przykład model Bayesa, który wykorzystuje probabilistyczny opis a-priori układu pomiarowego oraz tzw. model sensora, zawierający opis procesów stochastycznych [15].

## Podsumowanie

Przedstawiona analiza niepewności pomiarów w stereowizyjnym układzie obserwacji uwzględnia wszystkie etapy wchodzące w skład tego procesu. Przeanalizowany został wpływ procesu cyfrowej korelacji obrazów, rekonstrukcji 3D oraz kalibracji kamer. Identyfikacja czynników mających wpływ na dokładność pomiarów pozwala na optymalizację danego systemu stereowizyjnego, zarówno pod kątem programowym, jak i sprzętowym. W przypadku zastosowania cyfrowej korelacji obrazu, dla uzyskania najlepszych rezultatów, istotne jest zapewnienie odpowiedniej tekstury na analizowanej powierzchni, dużego rozmiaru obrazu wzorca dopasowującego oraz odpowiedniej funkcji interpolacyjnej wartości sub-pikseli. Podczas rekonstrukcji 3D istotne przede wszystkim jest zapewnienie odpowiednio dużego kąta między osiami optycznymi kamer. Jego wartość jest ściśle powiązana z odległością bazową kamer i wartościami ogniskowych kamer. Powoduje to konieczność kompleksowej optymalizacji tych parametrów w zakresie możliwych zmian konfiguracji systemu.

*Praca naukowa wykonana w ramach realizacji Programu Strategicznego pn. „Innowacyjne systemy wspomagania technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki” w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka.*

## **Bibliografia**

1. Bornert M., Brémand F., Doumalin P., Dupré J.-C., Fazzini M., Grédiac M., Hild F., Mistou S., Molimard J., Orteu J.-J., Robert L., Surré Y, Vacher P, Wattrisse B.: Assessment of Digital Image Correlation Measurement Errors: Methodology and Results, *Experimental Mechanics*, 2009 Vol. 49, p. 353–370.
2. Chojnacki W., Brooks M.J., Van Den Hengel A., Gawley D.: A new constrained parameter estimator for computer vision applications. *Image and Vision Computing*, *Image and Vision Computing* 22, 2004, p. 85–91.
3. Dupré J.C., Bornert M., Robert L., Wattrisse B.: Digital image correlation: displacement accuracy estimation, *EPJ Web of Conferences*, 2010 Vol. 6.
4. Garbacz P., Giesko T.: Concept Of Binocular Stereo Vision System For Inspection Of Surfaces, *Problemy Eksploatacji*, Radom, 2010, 4, s. 193–205.
5. Gi Jeung U., Hyoung-Jin K.: Experimental Error Assessment for Image Correlation Analysis on a Paper Tensile Specimen, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2007, Vol. 13, No. 2, p. 214–218.
6. Kamgar-Parsi B.: Quantization Error in Computer Vision, *Lecture Notes in Computer Science*, 1997, Vol. 1351, p. 296–304.
7. Kanatani K.: Unbiased Statistical Unbiased Estimation and Statistical Analysis of 3-D Rigid Motion from Two Views, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993, Vol. 15, No. 2.
8. Marciniak T., Bujnowski S., Lutowski Z., Boroński D., Giesko T.: Digital Image Correlation – Universal Tools Versus Custom Solutions, *Problemy Eksploatacji*, Radom, 2010, 4, p. 19–28
9. Matthies L., Shaffer S.A.: Error Modeling in Stereo Navigation, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 3, p. 241 1987.
10. Mühlich M., Mester R.: Unbiased errors-in-variables estimation using generalized eigensystem analysis. *ECCV Work-shop SMVP*, 2004.
11. Roger Y. Tsai: A Versatile Camera Calibration Technique for. High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology. Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses, *IEEE Journal of Robotics And Automation*, Vol. RA-3, No. 4, 1987.
12. Siebert T., Becker T., Spilthof K., Neumann I., Krupka R.: Error Estimations in Digital Image Correlation Technique, *Applied Mechanics and Materials*, 2007, Vols. 7–8, p. 265–270.
13. Sun Min, He Rixin, Wang Daojun: Precision Analysis To 3d Reconstruction From Image Sequences, *The 5th ISPRS Workshop on DMGISs*, 2007.

14. Sutton M.A, Orteu J.J., Schreier H.W.: Image Correlation For Shape, Motion and Deformation Measurements, Springer, 2009.
15. Szeliski R.: Bayesian Modeling of Uncertainty in Low-Level Vision, International Journal of Computer Vision, 1990, Vols. 5:3, p. 271–01.
16. Vassoler J. M., Fancello E.A.: Error Analysis Of The Digital Image Correlation Method, Argentina de Mecanica Computacional, Vol. XXIX p. 6149–161.
17. Wang Y.Q., Sutton M.A., Reu P.L., Miller T.J.: Image Matching Error Assessment in Digital Image Correlation, Proceedings of the SEM Annual Conference, 2009.
18. Wang Y.-Q., Sutton M.A., Ke X.-D., Schreier H.W., Reu P.L., Miller T.J.: On Error Assessment in Stereo-based Deformation Measurements. Part I: Theoretical Developments for Quantitative Estimates, Strain, 2009, Vol. 45, p. 160–178.
19. Wang Y.-Q., Sutton M.A., Bruck H.A., Schreier H.W.: Quantitative Error Assessment in Pattern Matching: Effects of Intensity Pattern Noise, Interpolation, Strain and Image Contrast on Motion Measurements, Experimental Mechanics, 2011, Vol. 51, p. 405–422.
20. Weng J., Cohen P, Herniou M.: Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation, IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, Vol. 14, p. 965–980.
21. Wong P.W.: On Quantization Error in Computer Vision, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, Vol. 13, No. 9.

Recenzent:  
**Eugeniusz RATAJCZYK**

## **Measurement uncertainty analysis in stereo vision system**

### **Key words**

Optical inspection, stereovision, digital image correlation.

### **Summary**

This paper presents measurement uncertainty analysis in stereo vision system. Error sources are divided into two categories: correlation errors and 3D reconstruction errors, including camera calibration influence. Errors related to the measurement devices, working environment and the digital image correlation principle itself are listed. The effect of various parameters of the

stereo vision system on 3D measurement accuracy has been presented. Quantitative error analysis has been described and the uncertainty of locating the 3-D space points was estimated for an experimental setup of the stereovision system.