

## ZASTOSOWANIE TRÓJWYMIAROWYCH TECHNIK WIZYJNYCH DO POMIARU I ANALIZY DRGAŃ

Piotr KOHUT, Piotr KUROWSKI

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Robotyki i Mechatroniki  
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: [pmk@agh.edu.pl](mailto:pmk@agh.edu.pl); [kurowski@agh.edu.pl](mailto:kurowski@agh.edu.pl)

### Streszczenie

Obecnie dużą wagę przywiązuje się do nowoczesnych bezstykowych metod pomiaru drgań mechanicznych. Mogą być tutaj wykorzystywane różne techniki, np. magnetyczne, laserowe, wizyjne, akustyczne. W prezentowanym artykule autorzy skupiają się na wykorzystaniu technik wizyjnych, a w szczególności na zastosowaniu metody struktury z ruchu do pomiaru i analizy drgań. Na bazie dekompozycji na wartości osobliwe zostały opracowane i zaimplementowane ich różne modele: prostopadły, skalowany prostopadły oraz para-perspektywiczny. Amplituda drgań jest wyznaczana dla wybranych punktów pomiarowych analizowanego obiektu. Każdy punkt reprezentowany jest przy pomocy znacznika montowanego na konstrukcji. W artykule zawarto rozważania teoretyczne dotyczące omawianych metod, ich weryfikację na podstawie danych symulacyjnych oraz wstępne testy eksperymentalne.

Słowa kluczowe: trójwymiarowe techniki wizyjne, struktura z ruchu, pomiary drgań.

### APPLICATION OF 3D VISION TECHNIQUES FOR VIBRATION MEASUREMENT AND ANALYSIS

#### Summary

At present time they attach importance to modern non-contact methods of mechanical vibration measurements. There can be used various techniques, e.g.: magnetic, laser, visual, and acoustics. In the paper authors concentrate in application of vision techniques: structure from motion for vibration measurement and analysis in particular. There were developed and implemented various models: orthographic, scaled orthographic and para-perspective on the basis of singular value decomposition method. Amplitude of vibration was calculated for selected measurement points of analysed object. Each measurement point was represented by means of marker mounted on a construction. In the paper theoretical considerations of mentioned methods and verification based on simulation data as well as initial experimental tests were discussed.

Keywords: 3D vision techniques, structure from motion, vibration measurement.

## 1. WPROWADZENIE

Rekonstrukcja trójwymiarowej struktury oraz ruchu obiektów sceny z sekwencji obrazów jest jednym z najczęściej podejmowanych i studiowanych problemów dotyczących technik wizyjnych. Znajduje ona zastosowanie w wielu aplikacjach inżynierskich włączając nawigację, naprowadzanie i czynności manipulacyjne robotów oraz kartografię. W diagnostyce techniki wizyjne znajdują zastosowanie w monitorowaniu stanu urządzeń jako narzędzia do detekcji i lokalizacji pojawiających się na konstrukcji uszkodzeń [5] do pomiaru wielkości charakteryzujących własności dynamiczne konstrukcji [6, 7]. W tradycyjnych technikach pomiaru drgań maszyn, urządzeń i konstrukcji wykorzystywane są przetworniki takie jak: akcelerometry, przetworniki siły, czujniki tensometryczne. Zastosowanie tego rodzaju przetworników wymaga ich bezpośredniego

mocowania do badanych elementów podczas przeprowadzania eksperymentu. W wielu przypadkach nie jest to ani możliwe ani pożądane, np. kiedy badaniu struktury towarzyszą niebezpieczne warunki pracy, wysoka temperatura lub ograniczenia techniczno-konstrukcyjne i eksploatacyjne. Innym powodem są niskoczęstotliwościowe drgania często spotykane w konstrukcjach mostów, wiaduktów, masztów, kominów, w pojazdach, pomostach operatorów maszyn i urządzeń, stropach budynków, itp. Ich pomiar ze względu na niskie pasmo częstotliwości jest trudny, a często wręcz niemożliwy za pomocą standardowych akcelerometrów. Stwarza to konieczność 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. Dodatkową zaletą

takiego podejścia jest możliwość realizacji pomiaru w całym analizowanym obszarze nie zaś punktowo jak ma to miejsce w technikach klasycznych.

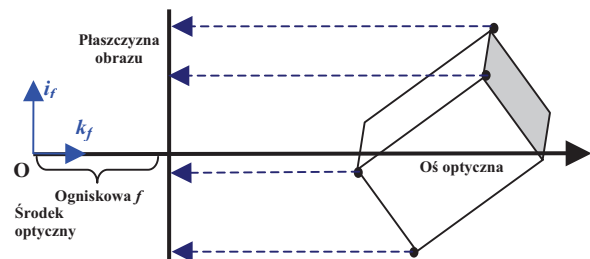
W artykule przedstawiono sposób wykorzystania technik struktury z ruchu do trójwymiarowego pomiaru amplitudy drgań wybranych elementów maszyn, urządzeń i konstrukcji oraz rekonstrukcji trójwymiarowej struktury badanych obiektów.

Metoda rozkładu na czynniki wprowadzona przez Kanade [14] jest jednym z najbardziej efektywnych algorytmów umożliwiających jednocześnie uzyskanie kształtu obiektu oraz ruchu kamery z sekwencji obrazów bez przyjęcia modelu ruchu takiego jak stała translacja lub rotacja. W pierwszych pracach została ona jednak ograniczona do modelu prostopadłego, w którym niedostępna jest informacja o odległości kamery od obiektu oraz niemożliwa jest estymacja translacji wzdłuż osi optycznej kamery. Wady te w znaczny sposób ograniczyły użyteczność metody w wielu aplikacjach. Technika ta została rozszerzona do wielu perspektywicznych aproksymacji skupiających rzutowanie perspektywiczne w zakresie równań liniowych. Prace [1, 2, 10, 11, 12] dotyczą modelu prostopadłego skalowanego zaś w pracach [1, 11, 12] przedstawiony został również model para-perspektywiczny.

## Modele rzutu

### Model prostopadły

W modelu prostopadłym (rys. 1) wszystkie promienie biegnące od punktu obiektu rzutowane są równoległe na płaszczyznę obrazu. W tym modelu wartości współrzędnych punktu obiektu  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  rzutowane są bezpośrednio na płaszczyznę obrazu. Głębina,  $Z$ , jest pomijana. Rzutowanie prostopadłe przedstawiają równania (1).



Rys. 1. Model prostopadły

$$\begin{aligned} u &= X \\ v &= Y \end{aligned} \quad (1)$$

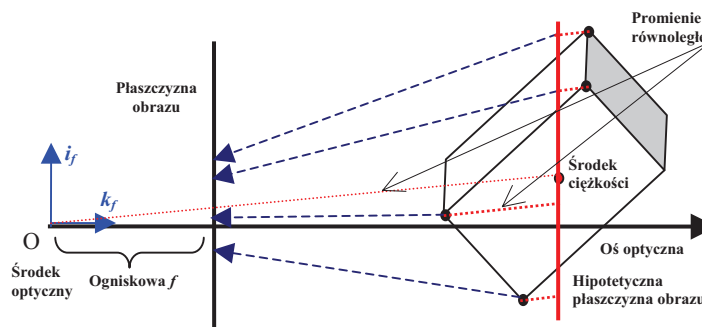
### Model prostopadły skalowany (słaba perspektywa)

W porównaniu do modelu prostopadłego model słabej perspektywy (rys. 2.) zapewnia efekt skalowania, który obiekty bliższe skaluje jako większe, zaś dalsze jako mniejsze. W tym modelu, w pierwszej kolejności, punkty obiektu rzutowane są wzdłuż osi równoległej do osi optycznej kamery na płaszczyznę hipotetyczną prostopadłą do osi optycznej i przechodzącą przez środek ciężkości obiektu. Następnie punkty te rzutowane są zgodnie z rzutowaniem perspektywicznym z płaszczyzny hipotetycznej na płaszczyznę obrazu ze współczynnikiem skali. Równoważne jest to efektowi skalowania przez stosunek długości ogniskowej do odległości do płaszczyzny hipotetycznej. Model zakłada, że wszystkie punkty posiadają tę samą wartość głębi  $Z_0$ . Opisany jest za pomocą liniowych równań (2) zawierających długość ogniskowej  $f$  oraz stałą głębię  $Z_0$ :

$$\begin{aligned} u &= f \frac{X}{Z_0} \\ v &= f \frac{Y}{Z_0} \end{aligned} \quad (2)$$

### Model para-perspektywiczny

W porównaniu do modelu słabej perspektywy model para-perspektywiczny (rys. 3.) oprócz efektu skalowania zawiera również efekt położenia, który dalsze obiekty obrazu modeluje jako widziane pod innym kątem niż obiekty znajdujące się bliżej środka



Rys. 2. Model prostopadły skalowany

rzutowania. W tym modelu w pierwszym etapie punkty obiektu rzutowane są wzdłuż kierunku prostej łączącej punkt ogniskowej ze środkiem ciężkości obiektu na płaszczyznę hipotetyczną równoległą do płaszczyzny obrazu, przechodzącą przez środek ciężkości obiektu. A następnie punkty te rzutowane są zgodnie z rzutowaniem perspektywicznym z płaszczyzny hipotetycznej na płaszczyznę obrazu. Ponieważ wszystkie punkty znajdują się na płaszczyźnie hipotetycznej równoległej do płaszczyzny obrazu jest to równoważne ze skalowaniem obrazu przez współczynnik będący stosunkiem długości ogniskowej do odległości od płaszczyzny hipotetycznej.

Różnica między modelem prostopadłym skalowanym i para-perspektywicznym zawarta jest w sposobie rzutowania na płaszczyznę hipotetyczną. Mając dane położenie środka ciężkości obiektu  $(X_0, Y_0, Z_0)^T$ , długość ogniskowej  $f$  oraz wartość głębi  $Z_0$  model opisany jest za pomocą następujących równań:

$$u = f \frac{X - X_0 \frac{Z}{Z_0} + X_0}{Z_0} \quad (3)$$

$$v = f \frac{Y - Y_0 \frac{Z}{Z_0} + Y_0}{Z_0}$$

### Struktura z ruchu

Metoda „struktura z ruchu” umożliwia odtworzenie geometrii sceny oraz ruchu kamery z uzyskanej sekwencji obrazów. Do jej wyznaczenia wykorzystywana jest technika dekompozycji macierzy. Metoda „faktoryzacji” - dekompozycji na wartości szczególne należy do metod typu rzadkiego (ang. „sparse”), czyli metod bazujących na wybranych cechach obrazu. Najistotniejszą ideą tego podejścia stanowi brak konieczności posiadania wiedzy o ilości obiektów oraz początkowej segmentacji, a macierz pomiarowa jest poddawana globalnej dekompozycji na dwie macierze (macierz

ruchu oraz struktury) i charakteryzuje się dużą odpornością na szum. Metoda ta daje bardzo dobre wyniki dla obiektów rejestrowanych z dużych odległości. Oryginalne założenia faktoryzacji podane w pracy [12, 14] są następujące:

- model kamery jest prostopadły;
- położenia  $n$  punktów obrazu  $(u_{fp}, v_{fp})$  śledzone są w  $F$  sekwencji ramek ( $F \geq 3$ );  $n$  punktów obrazu odpowiada  $P$  punktom sceny.
- nie wszystkie śledzone punkty sceny są współpłaszczyznowe.

Istota problemu polega na wyznaczeniu ruchu kamery między kolejnymi ramkami obrazu mając dane położenia punktów obrazu  $(u_{fp}, v_{fp})$  śledzonych przez  $F$  ramek obrazu ( $1 \leq f \leq F$ ,  $1 < p \leq n$ ). Podstawowym zadaniem jest śledzenie cech  $(u_{fp}, v_{fp})$  w sekwencji  $f$  ramek dla  $p$  punktów.

Algorytm śledzenia cech [3, 8, 9, 16] oparto o model translacyjny, w którym przemieszczenie  $h$  cechy obrazu  $x$  pomiędzy kolejnymi klatkami może zostać wyznaczone poprzez minimalizację sumy różnic kwadratów pomiędzy dwoma obrazami  $I_i(x)$  oraz  $I_{i+1}(x+d)$  w małym oknie  $W(x)$  wokół punktu cechy  $x$ . Problem minimalizacji dla przemieszczenia  $d$  zapisano jako (4):

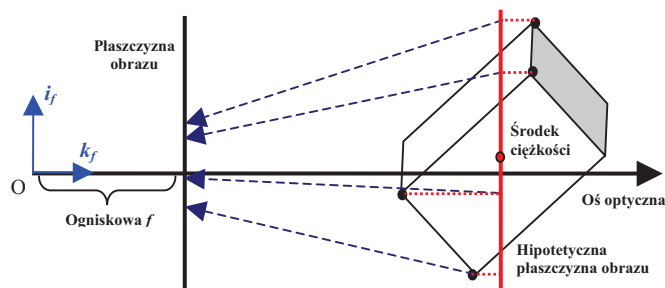
$$\min_h E(h) = \min_h \sum_{x \in W(x)} [I_2(x+h) - I_1(x)]^2 \quad (4)$$

Zgodnie z pracami [11, 12, 14] początek globalnego układu współrzędnych (rys.4) przyjęty został w środku ciężkości punktów obiektu  $P$ ;  $s_p = (x_p, y_p, z_p)^T$ ,  $p = 1, \dots, P$  w przestrzeni która odpowiada punktom cech  $P$  śledzonych w sekwencji obrazów.

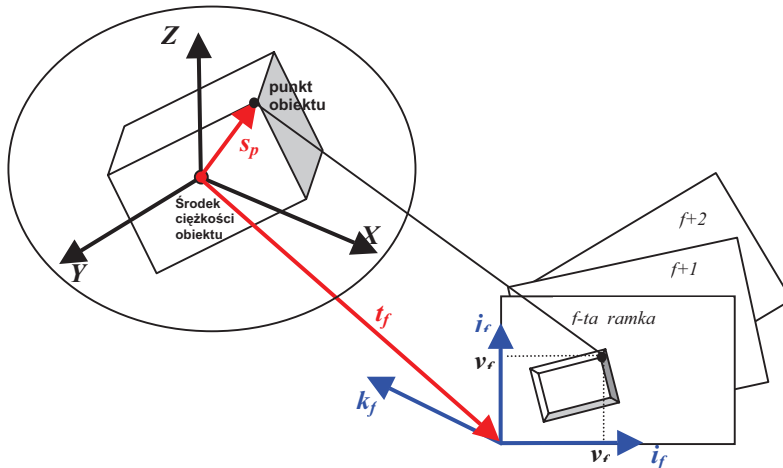
Z rys. 4 wynika, że rzut położenia cech obrazu  $(u_{fp}, v_{fp})$  punktów  $s_p = (x_p, y_p, z_p)^T$  na ramkę obrazu  $f$  opisany jest równaniami (4):

$$\begin{aligned} u_{fp} &= i_f^T (s_p - t_f) \\ v_{fp} &= j_f^T (s_p - t_f) \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie:  $t_f$  – wektor translacji skierowany od początku układu globalnego do początku ramki obrazu  $f$ . Wektor ten wykorzystany zostanie do wyznaczenia drgań analizowanych obiektów.



Rys. 3. Model para-perspektywiczny



Rys. 4. Układ referencyjny:  $s_p$  – położenie cechy punktu  $P$  w globalnym układzie współrzędnych, którego początek leży w środku masy wszystkich punktów obiektu sceny.  $R$  – macierz orientacji kamery dla ramki  $f$  reprezentowana jest przez trzy wersory osi  $i_f, j_f, k_f$  ( $i_f$  – odpowiada osi  $x$  na płaszczyźnie obrazu zaś  $j_f$  osi  $y$ ); wektory  $i_f, j_f$  są gromadzone dla wszystkich ramek  $F$  jako macierz ruchu  $R$ . Układ współrzędnych scentrowany w obiekcie – początek znajduję się w środku ciężkości punktów sceny  $P_1 \dots P_n$ .

Początek układu globalnego układu współrzędnych jest położony w środku ciężkości punktów obiektu (6).

$$\frac{1}{P} \sum_{p=1}^P s_p = 0 \quad (6)$$

Po odjęciu średniej wartości położenia 2D równania pomiarowe przyjmują postać:

$$\begin{aligned} u_{fp} &= i_f^T s_p \\ v_{fp} &= j_f^T s_p \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie:  $i_f$  – składowa macierzy orientacji,  $s_p$  – wektor położenia.

Poprzez połączenie ich w formę macierzy otrzymuje się macierz pomiarową w postaci:

$$\tilde{W} = RS \quad (8)$$

gdzie:

$R = (i_1, \dots, i_F, j_1, \dots, j_F)^T$  – macierz orientacji  
 $S = (s_1, \dots, s_p)$  – macierz kształtu (wyrażona w układzie dołączonym do środka ciężkości analizowanego obiektu)

Rozmiar macierzy pomiaru wznosi:  $\tilde{W} = R_{2F \times 3} S_{3 \times p}$

Zastosowanie metody dekompozycji sprowadza się do wykorzystania algorytmu SVD umożliwiającego znalezienie rozkładu macierzy  $\tilde{W}$  względem wartości szczególnych. Czyli optymalizacji ruchu i kształtu za pomocą metody najmniejszych kwadratów.

Kolejno dokonuje się:

a) wyznaczenia

$$\tilde{W} = UDV \quad (9)$$

w którym  $D$  musi być rzędu 3. W przypadku szumu równanie (9) przyjmie postać:

$$\tilde{W} = UDV = U' D' V' + U'' D'' V'' \quad (10)$$

**Teoria rzędu dla pomiarów z szumem:** cała informacja o strukturze i orientacji w  $\tilde{W}$  zawarta jest w trzech największych wartościach własnych.

Drugi składnik macierzy  $\tilde{W}$  odpowiada za szum. W pracy rozważono:  $U'' D'' V'' = 0$

$$\begin{aligned} D &= D(1:3, 1:3) \\ U &= U(:, 1:3) \\ V &= V(:, 1:3) \end{aligned} \quad (11)$$

b) i konstrukcji

$$\begin{aligned} \hat{R} &= U' \sqrt{D'} \\ \hat{S} &= \sqrt{D'} V'^T \end{aligned} \quad (12)$$

Dekompozycja macierzy  $\tilde{W}$  za pomocą SVD nie jest jednoznaczna:

$$\begin{aligned} W &= UDV \\ W &= \hat{R}\hat{S} = \hat{R}(QQ^{-1})\hat{S} = (\hat{R}Q)(Q^{-1}\hat{S}) \end{aligned} \quad (13)$$

W tym celu należy dołączyć dwa dodatkowe ograniczenia, które muszą spełniać wiersze macierzy  $R$ :

- ✓ wektory trójwymiarowe tworzące wiersze macierzy  $R$  muszą być znormalizowane do jedności
- ✓  $i_i^T$  – ty wyraz macierzy  $R$  musi być ortogonalny do odpowiadającego mu wyrazu  $j_i^T$ .

Macierz korekcji  $Q$  powinna spełniać następującą zależność:

$$\begin{aligned} |m_f|^2 &= i_i^T i Q Q^T i_i = 1 \\ |n_f|^2 &= j_i^T Q Q^T j_i = 1 \\ m_f n_f &= i_i^T Q Q^T j_i = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Nowe macierze  $R = \hat{R}Q$  oraz  $S = Q^{-1}R$  nadal umożliwiają dekompozycję macierzy  $\tilde{W}$  na wartości osobliwe, zaś wiersze macierzy  $R$  spełniają powyższe ograniczenia (14).

W przypadku prostopadłego modelu kamery metoda nie wyznacza ruchu kamery wzdłuż osi optycznej, w wyniku, czego uzyskana rekonstrukcja kształtu obiektu jest najczęściej zdeformowana. W celu uniknięcia tego problemu stosowane są dwie inne metody [1, 11, 12], które umożliwiają aproksymację perspektywicznego charakteru kamery. Pierwsza z nich przyjmuje skalowany prostopadły model kamery, zwany również słabą perspektywą, druga zaś rzutowanie paraperspektywiczne. W przypadku metody słabej perspektywy przyjmuje się, że zróżnicowania w głębi obiektu w kierunku osi optycznej są małe w porównaniu do odległości, z której rejestrowany jest obiekt. Metoda wprowadza efekt skalujący współrzędne obrazu przez współczynnik będący stosunkiem długości ogniskowej do głębi. Druga metoda stanowi dużo lepszą aproksymację modelu kamery, ponieważ oprócz efektu skalującego wprowadza efekt położenia. Co oznacza że modeluje bliższe oraz dalsze położenie obiektu od kamery jako efekt obserwacji pod różnym kątem. Wymienione dwie metody wprowadzają inne ograniczenia metryczne na macierz  $Q$  (tab. 1).

Niech  $x_f, y_f$  oraz  $z_f$  oznaczają względne położenie kamery. Można wyróżnić następujące trzy modele kamery z następującymi ograniczeniami:

Tabela 1. Ograniczenia metryczne związane z trzema modelami kamer [8, 9, 11]

Prostopadły	$ m_f ^2 = 1$ $ n_f ^2 = 1$ $m_f * n_f = 0$
Prostopadły skalowany	$ m_f ^2 =  n_f ^2 = 1 / z_f^2$ $m_f * n_f = 0$ $ m_l ^2 = 1$
Para-perspektywiczny	$ m_f ^2 / (1 + x_f^2) =  n_f ^2 / (1 + y_f^2) = 1 / z_f^2$ $m_f * n_f = 0$ $ m_l ^2 = 1$

Następny etap wspomnianych metod, w oparciu o przedstawione w tabeli 1 ograniczenia metryczne, dotyczy wyznaczenia macierzy  $Q$ . W prezentowanej pracy macierz korekcji  $Q$  wyznaczona została za pomocą metody optymalizacyjnej Newton-Raphson'a na podstawie przedstawionych warunków metrycznych.

Zgodnie z pracami [11, 12, 14] zależności umożliwiające obliczenie szukanego wektora  $t_f$  reprezentującego amplitudę drgań obiektu dla modelu kamery słabej perspektywy oraz paraperspektywicznego podano w tabeli 2.

Tabela 2. Zależności opisujące wektor  $t_f$  reprezentujący amplitudę drgań analizowanych obiektów

Model Prostopadły skalowany	$t_f = \begin{bmatrix} \hat{i}_f \\ \hat{j}_f \\ \hat{k}_f \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_f x_f \\ z_f y_f \\ -z_f \end{bmatrix}$	$z_f = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{1}{ m_f ^2} + \frac{1}{ n_f ^2} \right)}$
Model Para-perspektywiczny		$z_f = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{1+x_f^2}{ m_f ^2} + \frac{1+y_f^2}{ n_f ^2} \right)}$

Na podstawie wyznaczonego wektora  $t_f$  możliwe jest uzyskanie położenia kamery dla każdej ramki obrazu (w każdej chwili czasowej). Wektor ten opisuje translację (rys. 4) między początkiem układu współrzędnych kamery, a początkiem globalnego układu współrzędnych (środek ciężkości obiektu). Wyznaczony w każdej chwili czasowej reprezentuje amplitudę drgań obiektu

## 2. WERYFIKACJA METODY

### 2.1. Testy symulacyjne

Opracowane metody struktury z ruchu z różnymi modelami kamer były przedmiotem testów za pomocą serii symulacji. Obiektem symulacji była sześcienna kostka (rys. 7a) reprezentująca punkt pomiarowy na badanej konstrukcji. W pracy przyjęto, że amplituda drgań wyznaczana będzie dla każdego takiego obiektu. Za pomocą wymuszenia sinusoidalnego symulowany był ruch obiektu (drgania) w kierunku wszystkich osi. Dane symulacyjne przyjęto dla kamery skalibrowanej wewnątrz i zewnątrz [4, 9]. Błąd wyznaczany był z zależności (15):

$$error = ||R * (R^T * R)^{-1} * R^T * W - W||^2 \quad (15)$$

gdzie:  $R$  – macierz ruchu kamery (określająca orientację kamery w każdej ramce sekwencji);  $W$  – macierz pomiarowa, wyznaczona po odjęciu wektora określającego środek ciężkości punktów obiektu

Z uwagi na opisane powyżej ograniczenia modelu prostopadłego kamery, nie został on uwzględniony podczas testów z zadaniem wymuszeniem drgań.

Algorytm z modelem słabej perspektywy (rys. 8a) błędnie odtworzył modelowane drgania obiektu wzdłuż wszystkich jego osi. Jak przedstawiono na rys.8a. dobrą zgodność uzyskano tylko dla osi  $X$ , nieco gorszą dla osi  $Y$ , zaś dla osi  $Z$  wartość amplitudy odpowiedzi była znacznie większa niż zadana, a jej przebieg posiadał przeciwną fazę. Z przeprowadzonych badań wynika, że w przypadku analizy drgań obiektu w kierunku wszystkich osi model „skalowany prostopadły” jest niewystarczający do uzyskania zgodnej odpowiedzi algorytmu z zadanymi sygnałami wejściowymi

Opracowany algorytm z modelem para-perspektywnym prawidłowo odtworzył wszystkie modelowane amplitudy drgań obiektu wzdłuż wszystkich osi układu globalnego, co zostało zilustrowane na rys. 8b).

Dodatkowo model para-perspektywny przetestowano za pomocą wymuszenia szumem zadanym na amplitudę i częstotliwość sygnału wymuszającego (rys. 9): Wymuszenie zadano w kierunku wszystkich osi układu globalnego.

Opracowany algorytm „Struktury z Ruchu” z modelem para-perspektywnym prawidłowo wyznaczył modelowane drgania z nałożonym szumem obiektu wzdłuż wszystkich osi układu globalnego. W związku z tym zdecydowano, że może zostać użyty do badań na obiektach rzeczywistym.

W odniesieniu do trójwymiarowej rekonstrukcji struktury badanego obiektu (rys. 7.b) otrzymano właściwe wyniki rekonstrukcji dla wszystkich opracowanych modeli kamer.

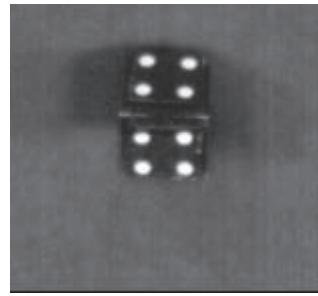
## 2.2. Testy eksperymentalne

Wybrana metoda z modelem para-perspektywnym została zweryfikowana również w trakcie testów eksperymentalnych. Obiektem badań był trójwymiarowy znacznik naklejony na wzbudnik w postaci kostki sześciennej (tab. 3). Ilość punktów - cech na znaczniku wynosiła 8. Znacznik, który mógł być nanoszony na dowolne miejsce analizowanej konstrukcji reprezentował jeden punkt pomiarowy (rys. 5).

Dokonano kalibracji parametrów wewnętrznych i zewnętrznych kamery (tabela 3) [17].

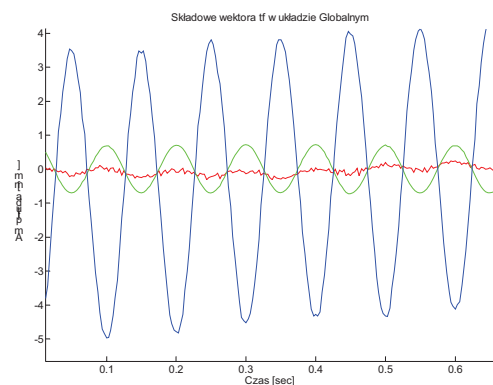
Tabela 3. Parametry wewnętrzne i zewnętrzne

Parametry wewnętrzne	Parametry zewnętrzne
Rozmiar piksela $p_x$ , $p_y = 0.012$ mm Długość ogniskowej $f = 55$ mm; Położenie punktu głównego: $u_0 = 1260/2$ ; $v_0 = 1024/2$ ; Skoszenie piksela: $skew = 90 * \pi/180$ ;	Kąty $RPY$ układu współrzędnych związanego z kamerą: $Roll = 0$ , $Pitch = 30^\circ$ , $Yaw = 0$ Wektor położenia kamery względem wzbudnika $T_0 = [0,0,1200]$



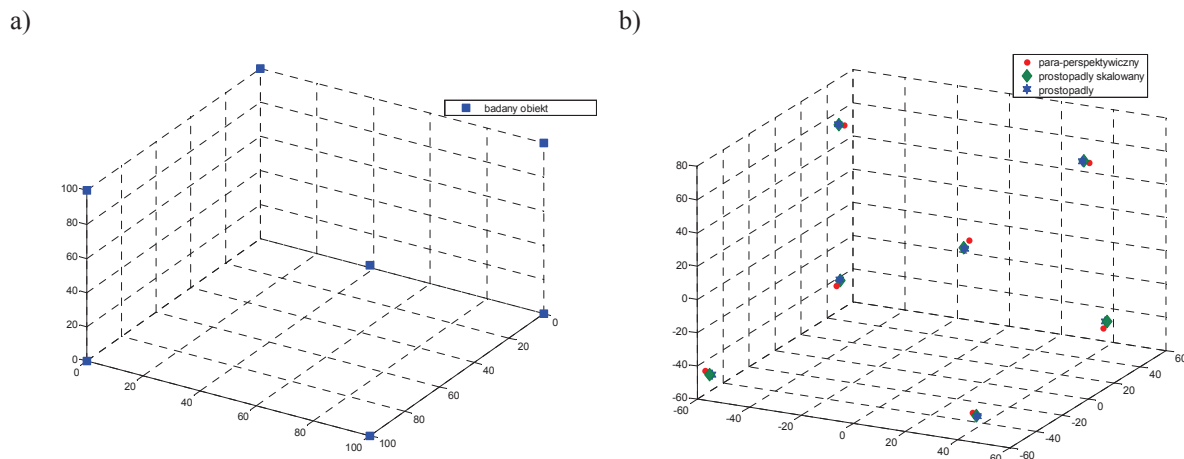
Rys. 5. Obiekt badań. Obiekt pomiarowy naklejony na wzbudnik drgań

Dla zadanego wymuszenia sinusoidalnego w kierunku osi  $Z$  układu globalnego o częstotliwości 10 Hz oraz częstotliwości akwizycji obrazów 400 Hz uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 6.

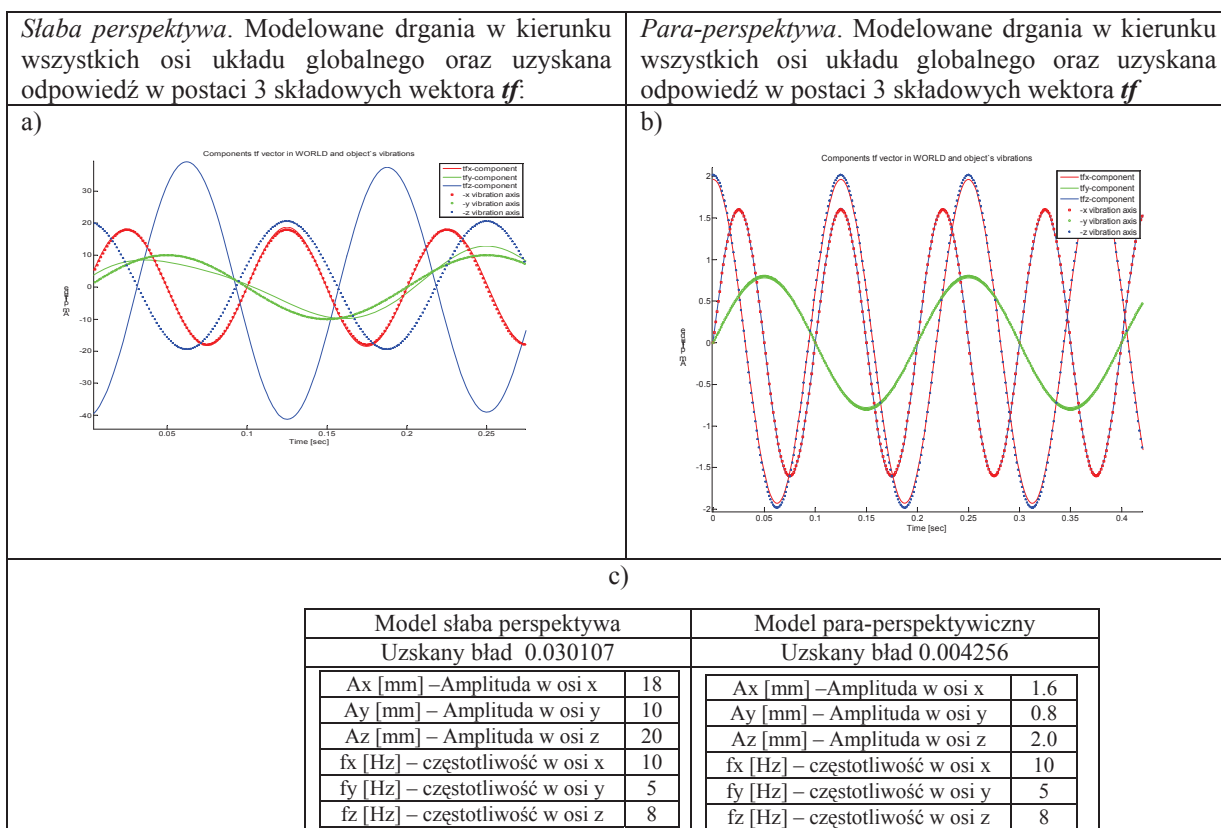


Rys. 6. Odpowiedź algorytmu z modelem para-perspektywnym na wymuszenie sinusoidalne. Dodatkowe drgania w kierunku osi  $Y$  (prostopadłe do kierunku wymuszenia) dotyczą niepożądanych drgań „bocznych” podwieszonoego na sztywnych cięgnach wzbudnika

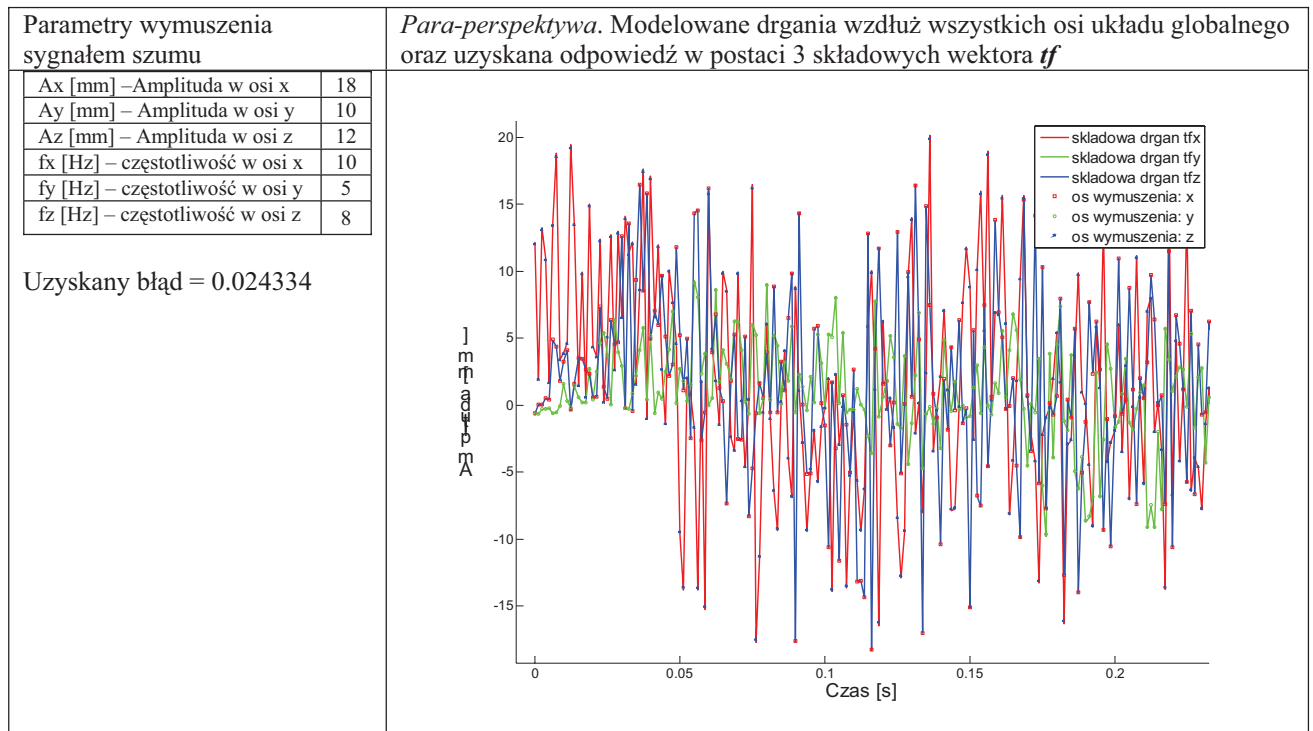
Opracowany algorytm dla modelu para-perspektywnego prawidłowo wyznaczył zadane drgania kostki sześciennej naklejonej na wzbudnik. Pod względem jakościowym zgodne są częstotliwości drgań i charakter przebiegu, zaś pod względem ilościowym wyznaczona amplituda drgań. Dodatkowo zarejestrowane zostały niepożądane drgania boczne wzbudnika w kierunku osi  $Y$  prostopadłej do kierunku wymuszenia. Drgania te o małej amplitudzie są wynikiem podwieszenia wzbudnika na sztywnych cięgnach, spowodowania dodatkowego ruchu stojaka i dokonania pomiaru w stanie ruchów bocznych wzbudnika (stan nieustalony).



Rys.7. Badany obiekt: a) sześcian zawierający 7 punktów – cech; b) trójwymiarowa rekonstrukcja badanego obiektu (uzyskana z modeli: prostopadłego, prostopadłego skalowanego oraz para-perspektywicznego).  
Wszystkie trzy modele kamer zwróciły właściwy rezultat rekonstrukcji



Rys. 8. Odpowiedź algorytmu: a) słaba perspektywa; b) para-perspektywa c) przyjęte parametry wymuszenia dla rozważanych dwóch modeli kamery



Rys. 9. Odpowiedź algorytmu z modelem para-perspektywicznym. Modelowane drgania z nałożonym szumem w kierunku trzech osi układu globalnego oraz uzyskana odpowiedź w postaci trzech składowych wektora  $t_f$  reprezentującego odpowiedź na zadane wymuszenia

### 3. WNIOSKI

W artykule przedstawiono porównanie trzech modeli metody struktury z ruchu: prostopadłego, prostopadłego skalowanego oraz para-perspektywicznego do wyznaczania drgań w wybranych punktach badanej struktury. Z przeprowadzonych badań wynika, że model prostopadły w uwagi na ograniczenie związane z nieuwzględnieniem głębi nie nadaje się do proponowanego zastosowania. Za pomocą modelu słabej perspektywy nie udało się prawidłowo otworzyć zadanego ruchu. Wyniki uzyskane z modelu para-perspektywicznego są najbardziej zgodne z zadanymi przebiegami drgań. W związku z tym model ten zostanie wykorzystany do dalszych prac ukierunkowanych m.in. na połączenie opracowanych trójwymiarowych technik wizyjnych z narzędziami analizy modalnej w celu uzyskania dodatkowych informacji o własnościach dynamicznych badanej konstrukcji.

W odniesieniu do rekonstrukcji trójwymiarowej struktury badanego obiektu użycie wszystkich trzech modeli pozwoliło na uzyskanie satysfakcjonujących rezultatów.

### LITERATURA

- [1] Christy S., Horaud R.. *Euclidean shape and motion from multiple perspective views by affine iteration*. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 18(11):1098– 1104, Nov.1996.
- [2] Han M. and Kanade T., *Perspective Factorization Methods for Euclidean Reconstruction tech. report CMU-RI-TR-99-22*, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, August, 1999.
- [3] Harris C., Stephens M. *A Combined Corner and Edge Detector*., Proc. of The Fourth Alvey Vision Conference, Manchester, pp. 147-151. 1988.
- [4] Hartley, Zisserman A. „*Multiple View Geometry in Computer Vision*” Cambridge University Press, 2004.
- [5] Kohut P., Kurowski P., *Zastosowanie systemu wizyjnego do detekcji i lokalizacji uszkodzeń*, Diagnostyka, Nr 35, ss.71-76, grudzień, 2005
- [6] Kohut P., Kurowski P: *The Integration of Vision System and Modal Analysis for SHM Application*, A Conference&Exposition on Structural Dynamics, pp.8, IMAC XXIV, January –February 02, St. Louis, 2006.
- [7] Kohut P., *Zastosowanie analizy obrazu do pomiaru przemieszczeń*, Diagnostyka Procesów Przemysłowych, s., 519- 525, Władysławowo, 15-17 Wrzesień , 2003.
- [8] Lucas B. D., Kanade T., *An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision*, International Joint Conference on Arti\_cial Intelligence, pp. 674-679, 1981.



- [9] Ma Y., Soatto S., Kostecka J., Sastry S., *An invitation to 3D Vision*. Springer-Verlag, New York, 2004.
- [10] Mundy J.L., Zisserman A., *Geometric invariance In Computer Vision*, MIT Press, 1992, p.512.
- [11] Poelman C., Kanade T. *A paraperspective factorization method for shape and motion recovery*. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 19(3):206–218, March, 1997.
- [12] Poelman C., Kanade T.; *A Paraperspective Factorization Method for Shape and Motion Recovery*, Technical Report CMU-CS-93-219, Pittsburgh, PA, Dec 1993.
- [13] Tadeusiewicz R., Systemy wizyjne robotów przemysłowych, *WNT*, Warszawa, 1992
- [14] Tomasi C., Kanade T. *Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method*. Int'l J. Computer Vision '92, 9(2):137–154, November 1992.
- [15] Tomasi C., Kanade T.; *Shape and Motion from Image Streams: a Factorization Method*, Technical Report CMU-CS-92-104, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, Jan 1991.
- [16] Trucco E., Verri A.; *Introductory Techniques for 3D Computer Vision*, Prentice-Hall, 1998.
- [17] [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/index.html](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html)



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.



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