

Opis metody i stanowiska pomiarowego do badania przepływów pulsacyjnych w elastycznych przewodach

MAREK GAWOR

Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul Reymonta 27; 30-359 Kraków

Streszczenie

W pracy przedstawiono opis metody pomiarowej do badania odkształceń i szybkości odkształceń elastycznych przewodów. Metodę pomiarową oparto o cyfrową dylatometrię obrazową oraz cyfrową anemometrię obrazową. Omówiono algorytmy do wyznaczania odkształceń (funkcja dwuwymiarowej korelacji wzajemnej) oraz służące do osiągnięcia lepszych wyników obliczeń (kontrastowanie zdjęć, analiza odchylenia standardowego funkcji korelacji). Podano przykład weryfikacji oprogramowania polegający na wyznaczeniu prędkości liniowej na brzegu obracającej się tarczy.

Podano opis stanowiska pomiarowego, na którym testowano pulsacje lateksowej nakładki na palec. Przedstawiono możliwości synchronizacji momentu wykonanych zdjęć z przebiegiem zjawiska.

Przedstawiono wstępne wyniki eksperymentu mającego na celu odpowiedni dobór elastycznych przewodów przepływowych i sposobu nanoszenia znaczników. Analiza wyników pomiarów prowadzi do wniosku, że zaproponowana metoda pomiarowa nadaje się do badań odkształceń i szybkości odkształceń w elastycznych przewodach.

Słowa kluczowe: cyfrowa anemometria obrazowa, fotografia cyfrowa, przepływy w przewodach elastycznych

1. Wstęp

Przepływy związane z biomechaniką należą do działu fizyki nazywanego mechaniką płynów. Są one bardzo złożone ze względu na skomplikowany system kanałów oraz charakter płynu – ciecz nieniutonowska (krew), z zawartością zawiesiny składającej się z elastycznych cząsteczek (krwinki). Dodatkowo dochodzą takie problemy jak elastyczność ścian przewodów, przez które następuje przepływ, niestacjonarność przepływu, czy też występowanie pulsacji w przepływie. Rozgałęzienia w sieci przewodów (bifurkacje) prowadzą do powstania wirów (nawet przy przepływach laminarnych), przepływów turbulentnych oraz znacznej zmiany profilu prędkości wzdłuż przewodów, prowadzącemu niekiedy do lokalnego odwrócenia przepływu. Powstawać mogą również struktury wirowe, prostopadłe do głównego kierunku przepływu (Bębenek, 1999; Cieśliski, 2001; Filipczyński i in., 1980).

Dotychczasowe wyniki badań przepływów o wyżej przedstawionych właściwościach są niezbyt liczne i czasem sprzeczne ze sobą. Zastosowanie przy badaniu profilu prędkości dużych czujników zakłóca przepływ właściwy, co daje błędne rezultaty.

W pracy przedstawiono badania eksperymentalne przepływów pulsacyjnych w elastycznych przewodach. Przepływ cieczy przez elastyczny przewód jest procesem niestabilnym – dowolny, nawet losowy wzrost prędkości cieczy wywołuje, zgodnie z prawem Bernoulliego, obniżenie w niej ciśnienia statycznego. Prowadzi to do jeszcze większego wzrostu prędkości, proces narasta lawinowo (dodatnie sprzężenie zwrotne). W efekcie dochodzi do zapadania się elastycznego przewodu. Z drugiej strony siły bezwładności płynącego strumienia, a więc konieczność „przepuszczenia” odpowiedniego natężenia przepływu (równanie ciągłości – zachowanie masy) prowadzą do otwierania się przewodu. W wyniku tych zjawisk powstają drgania samowzbudne. Badanie takich efektów ma duże znaczenie przy odpowiednim konstruowaniu protez naczyń krwionośnych (zastawki serca).

Badanie odkształceń elastycznych ścian zostało zrealizowane metodą analizy obrazu znaczników (kropek) naniesionych na zewnętrzną stronę ścianki modelu. Wykonanie dwóch zdjęć w znanym odstępście czasu umożliwia wyznaczenie odkształceń ścianki oraz szybkości tych odkształceń.

2. Metoda pomiaru odkształceń elastycznych przewodów

2.1. Opis metody pomiarowej

W prezentowanej pracy podstawową metodą pomiarową jest cyfrowa dylatometria obrazowa. Metoda ta stanowi modyfikację cyfrowej anemometrii obrazowej, która wykorzystywana jest do wyznaczania dwuwymiarowych pól prędkości przepływu płynów (Particle Image Velocymetry – PIV) lub dwuwymiarowych pól temperatury (Particle Image Thermometry – PIT). Podstawę do wyznaczania prędkości przepływu stanowi wyznaczenie lokalnego przemieszczenia znaczników.

Narzędziem pomiarowym w tych badaniach jest kamera cyfrowa (CCD), za pomocą której wykonywane są dwa zdjęcia w znanym odstępście czasu Δt (Hiller i in. 1992). Fotografowana jest powierzchnia przepływu oświetlana płaszczyzną światła („nóż świetlny”). Rejestracja obrazów odbywa się w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny światła.

Obrazy cyfrowe mogą być reprezentowane przez tablice rozkładu jasności pikseli

$$I_1(i,j) \quad I_2(i,j) \quad (1)$$

gdzie: $1 < i < M$; $1 < j < N$ $M \times N$ – rozmiar tablicy pikseli,
indeks 1 odnosi się do pierwszego zdjęcia, a 2 do drugiego.

W celu wyznaczenia lokalnego przemieszczenia znaczników z obrazów I_1 i I_2 wybierane są podobrazy I_{s1} i I_{s2} , nazywane maską lub sekcją. Dla każdego położenia maski wyliczana jest dwuwymiarowa funkcja korelacji wzajemnej:

$$K_{xy}(\Delta_x, \Delta_y) = \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} I_{s1}(x, y) I_{s2}(x - \Delta_x, y - \Delta_y) \quad (2)$$

gdzie:

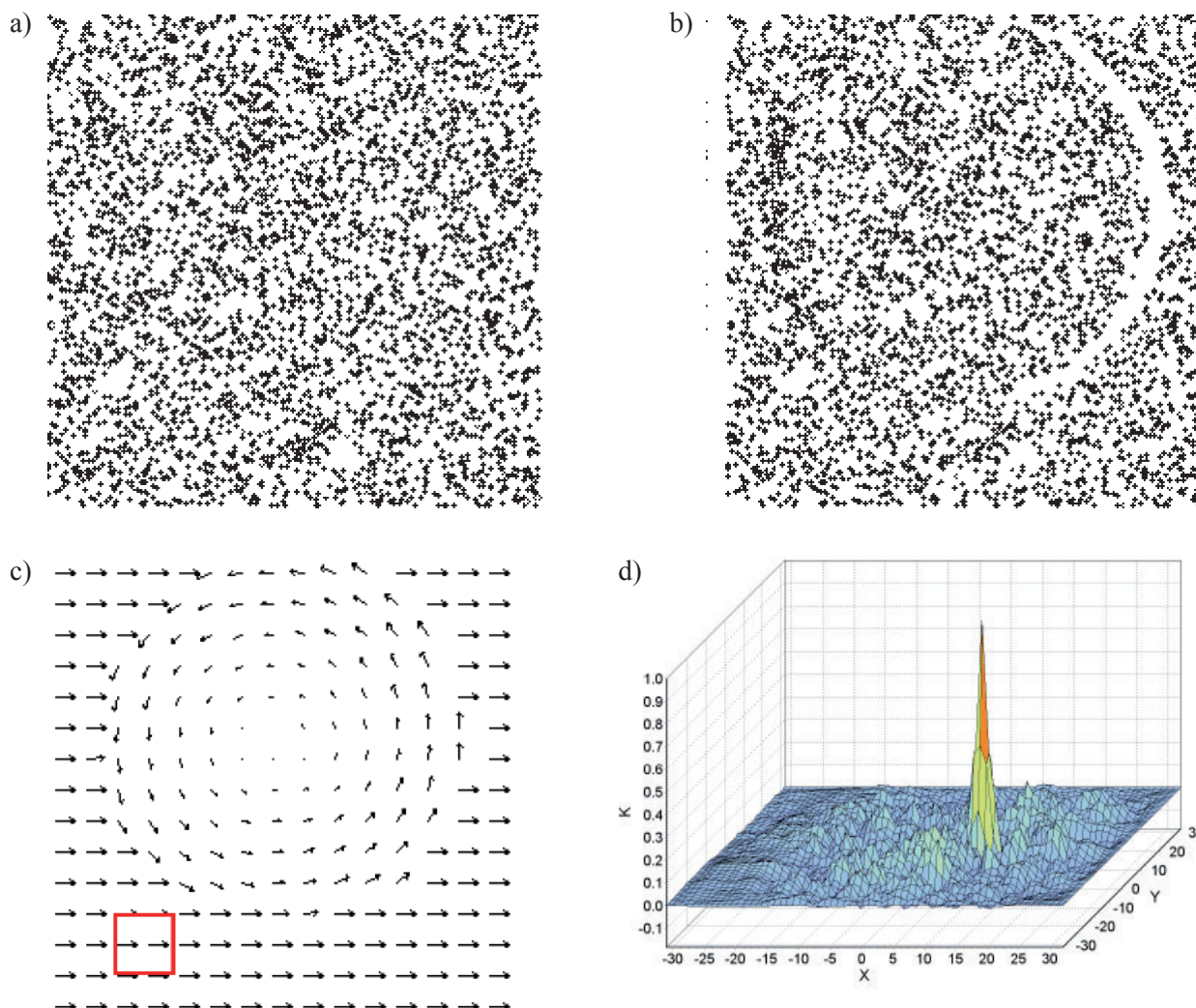
m, n – rozmiar maski,
 Δ_x, Δ_y – przemieszczenie odpowiednio wzdłuż osi x i y .

Położenie maksimum funkcji $K_{xy}(\Delta_x, \Delta_y)$ wskazuje przesunięcie wektora w płaszczyźnie xy . Należy zauważyć, że tak wyznaczone przemieszczenie jest średnim przemieszczeniem w obrębie maski. Wynika z tego, że metoda ma charakter statystyczny i wymagane jest, aby w obrębie maski znajdowała się odpowiednia ilość znaczników.

Na Rys. 1 poglądowo przedstawiono zasadę działania cyfrowej anemometrii obrazowej. Rys. 1a przedstawia obraz cząsteczek wygenerowanych losowo. Wygenerowano 5 000 cząsteczek przy rozmiarze zdjęcia $N = 256, M = 256$ pikseli. Rys. 1b przedstawia obraz, który został przesunięty o $dx = 10$ pikseli w stosunku do obrazu na Rys. 1a. Fragment obrazu (koło o promieniu 100 pikseli został obrócony o 5° . Na Rys. 1c przedstawiono wyznaczone za pomocą funkcji korelacji wzajemnej przesunięcia wektorów. Zaznaczony kwadrat na Rys. 1c przedstawia położenie maski. Wykres na Rys. 1d przedstawia moduł funkcji korelacji wzajemnej dla zaznaczonej maski. Widać, że pik (maksymalna wartość macierzy korelacji K_{xy}) znajduje się w położeniu $x = 10$ pikseli, $y = 0$ pikseli.

W celu zagęszczenia poszukiwanych przesunięć maska może być przesuwana o określoną ilość pikseli np. maska o rozmiarach 32×32 piksele może być przesuwana o 16×16 pikseli. Dokładność wyznaczenia przemieszczenia zależy od: wielkości zdjęcia, doboru maski oraz wielkości jej przesuwania, ostrości zdjęcia, kontrastu zdjęcia. Dokładność mniej zależy od ilości refleksów, gdyż występują one w tym samym miejscu na obu zdjęciach i wyliczona funkcja korelacji wynosi zero.

Funkcję korelacji wzajemnej wyznacza się poprzez transformatę Fouriera. W przypadku funkcji dyskretnej wykorzystuje się algorytmy szybkiej transformaty Fouriera (FFT). Warunkiem wykorzystania tych algorytmów jest analizowanie dyskretnej funkcji, które zawierają ilość punktów będących potęgą dwójki. Wymusza to stosowanie masek o wymiarach 8, 16, 32, 64 itd.



Rys. 1. Poglądowy schemat wyznaczenia przesunięcia znaczników
(przykład oparty jest na sztucznie generowanych znacznikach i zadanym przemieszczeniu drugiego obrazu)

2.2. Opcje programu i eksperymentu

2.2.1. Parametry eksperymentu

Parametrami związanymi z eksperymentem są: skala zdjęcia p oraz czas pomiędzy zdjęciami Δt . Skala wyliczana jest na podstawie znanej ilości pikseli przypadającej na jeden centymetr zdjęcia. Wymaga to wykonania zdjęcia, na którym naniesiony jest obiekt o znanych wymiarach. W miejsce fotografowanego przedmiotu ustawia się kartkę papieru z naniesioną siatką o znanej odległości pomiędzy oczkami siatki. W programie istnieje możliwość (poprzez przeciąganie kursora myszy) odczytania ilości pikseli odpowiadającej temu obiektowi.

W celu wyliczenia prędkości konieczne jest podanie odstępu czasowego pomiędzy zdjęciami Δt w milisekundach. Prędkość wyliczana jest ze wzoru:

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{\Delta t} p \cdot 10^3 \quad (3)$$

gdzie: \vec{s} – przemieszczenie (położenie maksimum funkcji korelacji) w pikselach; prędkość wyliczana jest w cm/s.

Wzór na odkształcenie $\Delta \vec{r}$ wyrażone w milimetrach ma postać:

$$\Delta \vec{r} = \vec{s} p \cdot 10 \quad (4)$$

2.2.2. Wielkość maski

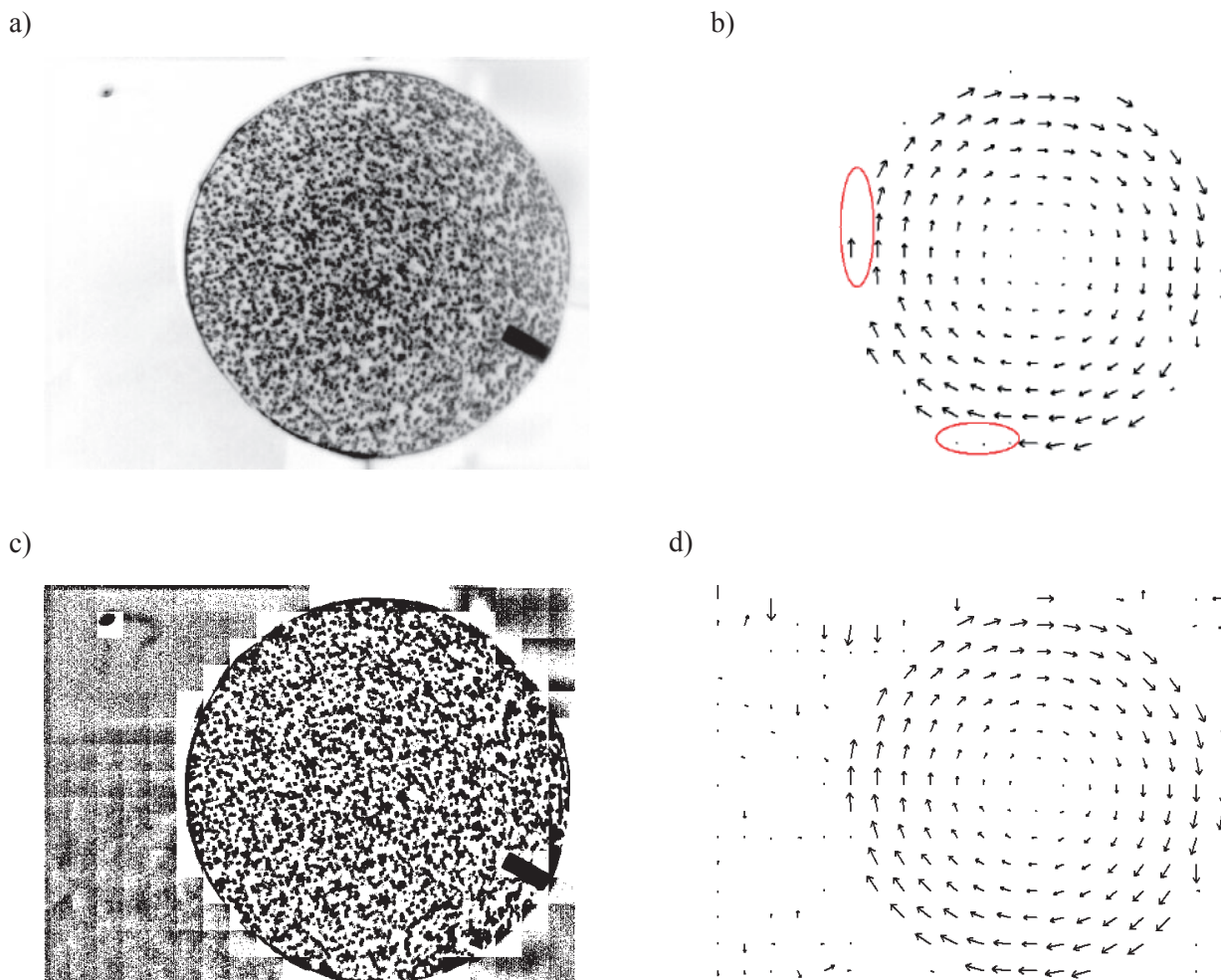
W celu uzyskania odpowiednich pików funkcji korelacji należy dobrać wielkość maski i krok jej przesuwania. Rozmiar maski może być różny w obu kierunkach (x, y). Analizę zdjęć można przeprowadzić przy różnych wielkościach maski. W przypadku, gdy zmiany wektora prędkości lub odkształcenia są duże należy zastosować mniejszą maskę. Przy małych zmianach wektora prędkości maska może być większa. Również zmniejszenie kroku przesuwu maski skutkuje lepszym wynikiem przy dużych zmianach wektora prędkości.

2.2.3. Kontrastowanie zdjęcia

W celu dokładniejszej analizy przemieszczeń znaczników zastosowano algorytm polegający na lokalnym kontrastowaniu zdjęcia. Algorytm ten polega na binaryzacji fragmentów zdjęcia względem podanego progu. W obrębie wyznaczonego fragmentu zdjęcia wyliczana jest średnia wartość intensywności pikseli. Następnie wykonywana jest operacja, która polega na przypisaniu każdemu pikselowi wartości 255 (biały) jeżeli jego intensywność jest większa od wartości progowej i wartości 0 (czarny) jeżeli jego intensywność jest mniejsza od wartości progowej.

Wyniki działania tego algorytmu przedstawiono na Rys. 2. Eksperyment polegał na fotografowaniu obracającej się tarczy z naniesionymi znacznikami. Na Rys. 2a przedstawiono pierwsze analizowane zdjęcie. Rys. 2b przedstawia natomiast wyniki obliczeń wektorów. Rys. 2c przedstawia obraz po kontrastowaniu. Wygląd zdjęcia jest diametralnie inny niż zdjęcia pierwotnego. Obraz wektorów powstałych ze zdjęcia po kontrastowaniu przedstawiono na Rys. 2d.

Jak można zauważyć wektory pochodzące z oryginalnych obrazów zawierają pewne luki w obrębie wirującej tarczy (zaznaczone owalami). Korzystnym efektem działania algorytmu jest brak wektorów poza



Rys. 2. Lokalne kontrastowanie zdjęć

obrębem tarczy. Po analizie zdjęcia kontrastowanego nastąpiło wypełnienie brakujących wektorów w obrębie tarczy (niektóre są błędnie wyznaczone). Powstała jednak duża ilość wektorów poza obwodem tarczy. Wektory te są błędnie wyznaczone i należy je usunąć.

2.2.4. Usuwanie błędnie wyznaczonych wektorów

Analiza testowych zdjęć doprowadziła do wniosku, że oprócz właściwych wektorów wyznaczane są wektory błędne. Spowodowane jest to: nierównomiernością oświetlenia, lokalnymi zmianami intensywności obrazu, refleksami na zdjęciu związanymi z odbiciem światła od tła. Również jak wyżej napisano kontrastowanie zdjęcia wprowadza dodatkowo błędnie wyznaczone wektory. Dlatego napisano procedury umożliwiające korektę wyznaczonych wektorów.

Pierwsza możliwość korekty polega na usuwaniu wektorów, dla których maksimum funkcji korelacji jest mniejsze od zadanego. W programie wyznaczana jest maksymalna wartość funkcji korelacji dla całego zdjęcia, a następnie wyliczana jest procentowa wartość funkcji korelacji dla każdego położenia maski. Usuwanie błędnie wyznaczonych wektorów polega na podaniu procentowego progu. Na podstawie tego progu zostają usunięte wszystkie wektory, dla których procentowa wartość funkcji korelacji jest od niego mniejsza.

Kolejna możliwość usuwania błędnie wyznaczonych wektorów polega na założeniu, że funkcja korelacji ma rozkład gaussowski (Boliner 1990, Raffel i in. 1998). Dlatego do funkcji korelacji dopasowywano funkcję Gaussa w postaci:

$$G(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right) + A \quad (5)$$

gdzie:

- \bar{x} – wartość średnia,
- σ – odchylenie standardowe,
- A – wartość minimalna.

Wartość średnia \bar{x} stanowi o położeniu maksimum funkcji Gaussa i może być wykorzystana do wyznaczenia wielkości przesunięcia (wyznaczenia wektorów). Wyznaczenie tej wartości daje możliwość obliczenia przesunięcia z dokładnością większą niż jeden piksel.

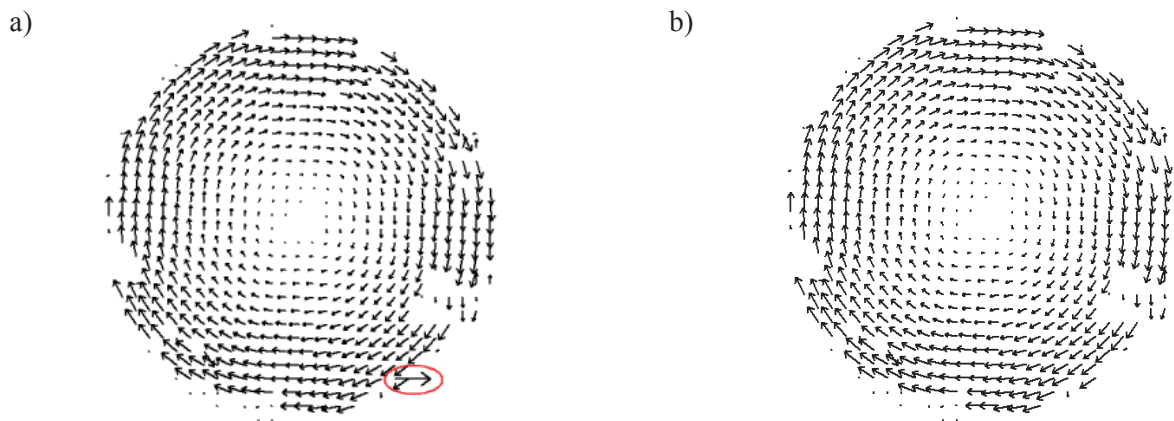
Z kolei odchylenie standardowe σ daje informacje o „smukłości” funkcji Gaussa. Im mniejsza wartość odchylenia standardowego tym bardziej „smukła” jest funkcja Gaussa, a więc tym lepsze wyznaczenie przesunięcia.

Z powyższych spostrzeżeń wynika, że usuwane być powinny wektory, dla których odchylenie standardowe funkcji Gaussa jest większe od zadanych wartości progowych (dokładniej zostanie przypisana im wartość zerowa przesunięcia). Funkcja Gaussa wyliczana jest oddzielnie dla składowej x i y . Dlatego dla obu składowych należy uwzględnić oddzielnie wartość progową.

Następne założenie dotyczące poprawności wyznaczania wektorów związane jest z wielkością maski. Jest oczywiste, że przesunięcie nie może być większe od rozmiaru maski. Można jednak założyć, że przesunięcie nie powinno być większe od połowy maski. W programie można wybrać, czy dopuszczamy przesunięcie większe od połowy maski. Na Rys. 3a przedstawiono wynik obliczania wektorów w sytuacji, gdy dopuszczono możliwość wyliczania przesunięcia większego niż połowa maski. Owalem zaznaczono błędnie wyznaczony wektor. Rys. 3b przedstawia obraz wektorów w przypadku gdy usuwane są wektory większe od połowy maski.

2.3. Dodatkowe funkcje programu

W celu łatwiejszej analizy zdjęć oraz poprawienia jakości wykonanych obliczeń wektorów prędkości w programie przewidziano ustawianie dodatkowych parametrów. Przyspieszenie obliczeń można uzyskać poprzez wyłączenie funkcji związanych z obliczaniem funkcji Gaussa. W przypadku gdy zamierzamy porównać wyliczone wektory na podstawie położenia maksimum funkcji Gaussa z wyznaczonymi na podstawie położenia maksimum funkcji korelacji należy: włączyć opcję wyliczania funkcji Gaussa oraz opcję rysowania wektorów wyznaczonych na jej podstawie.



Rys. 3. Przykład usuwania wektorów większych niż połowa maski

W programie można wyświetlić siatkę związaną z kolejnymi położeniami maski. Siatka wyświetlana na tle analizowanego zdjęcia umożliwia odpowiedni dobór wielkości maski.

Możliwość ustawiania wielkości rysowanych wektorów oraz ich grubości służy do odpowiedniej prezentacji wyników obliczeń. Podobnie dobór odpowiedniej mapy kolorów, zależnej od wartości modułu prędkości, albo maksimum funkcji korelacji umożliwia lepszą interpretację wyników eksperymentu.

Wyniki pomiarów prezentowane są również w postaci tabeli (Rys. 4). W tablicy tej w kolejnych wierszach wypisywane są:

- lp. – kolejny numer wiersza,
- Y_i – współrzędna pionowa położenia maski,
- X_j – współrzędna pozioma położenia maski,
- dx – przesunięcie wektora wzdłuż osi poziomej (piksele),
- dy – przesunięcie wektora wzdłuż osi pionowej (piksele),
- max – wartość maksimum funkcji korelacji odniesioną do wartości globalnego maksimum dla wszystkich masek (maksimum globalne wypisywane jest w dolnym pasku stanu, w lewym rogu np. „Maks. glob. 1503.309”,
- vx – pozioma składowa prędkości w cm/s,
- vy – pionowa składowa prędkości w cm/s,
- $|v|$ – moduł prędkości w cm/s,
- xg – przesunięcie wektora wzdłuż osi poziomej wyliczane na podstawie funkcji Gaussa (pseudopiksele),
- yg – przesunięcie wektora wzdłuż osi pionowej wyliczane na podstawie funkcji Gaussa (pseudopiksele),
- sig_x – odchylenie standardowe wyliczane na podstawie funkcji Gaussa wzdłuż osi poziomej,
- sig_y – odchylenie standardowe wyliczane na podstawie funkcji Gaussa wzdłuż osi pionowej.

Zmiana wiersza tabeli powoduje ustawienie maski na zdjęciu w miejscu wynikającemu z wartości X_j , Y_j tabeli. Naciśnięcie klawisza DEL powoduje usunięcie zaznaczonego wektora tzn. przypisanie przesunięciom wartości zero. Naciśnięcie klawisza ENTER powoduje ustawienie w tablicy wiersza o maksymalnej wartości modułu prędkości (przy naciśniętym klawiszu SHIFT wartości minimalnej).

W programie istnieje możliwość ustawienia maski w wybranym przez użytkownika miejscu zdjęcia. W tym celu wystarczy kliknąć myszą w odpowiednim miejscu zdjęcia. Maskę może być również przesuwana przy pomocy klawiszy z klawiatury, jak również za pomocą suwaków.

Ustawienie maski na zdjęciu powoduje wybór odpowiedniego wiersza w tabeli. Istnieje więc możliwość odczytania wyliczonych parametrów wektora i obserwacji jego reprezentacji na zdjęciu. Opisane powyżej opcje programu umożliwiają usuwanie błędnie wyznaczonych wektorów w oparciu o własną interpretację.

lp	Yi	Xj	dx	dy	max [%]	vx [cm/s]	vy [cm/s]	v [cm/s]	xg	yg	sig_x	sig_y
47	2	7	0	1	44.1	0.000	0.620	0.620	-0.489	1.283	2.191	1.699
48	2	8	-4	2	27.2	-2.480	1.240	2.773	-3.789	2.351	2.733	2.205
49	2	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	2	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	2	11	0	13	10.7	0.000	8.060	8.060	20.329	12.891	2.718	0.727
52	2	12	0	13	9.9	0.000	8.060	8.060	-2.658	12.528	3.329	0.559
53	2	13	-2	15	10.5	-1.240	9.300	9.382	-1.819	14.991	0.121	0.687
54	2	14	0	16	11.0	0.000	9.920	9.920	-0.200	17.946	0.151	1.666
55	2	15	4	16	11.8	2.480	9.920	10.225	17.914	15.549	6.365	1.123
56	2	16	0	2	12.7	0.000	1.240	1.240	0.110	0.789	1.772	1.979

Maks. glob. 1503.309 Min = 9.855 Max. = 100.000 Max. IVI = 10.225 Min. IVI = 0.620 MinSY=0.559 MaxSY=4.005

Rys. 4. Tabela wyników

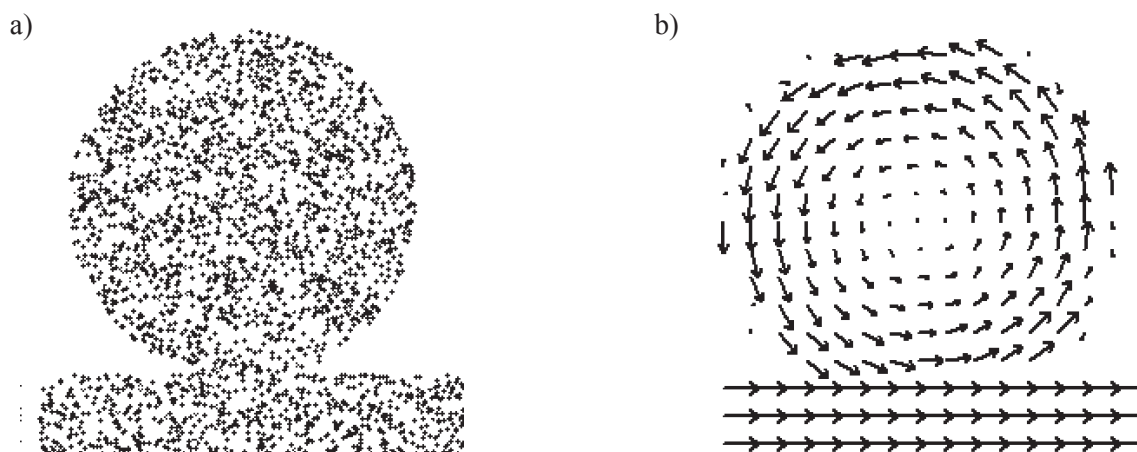
2.1. Testowanie oprogramowania i algorytmów obliczeniowych

Pierwszy etap testowania oprogramowania polegał na sprawdzeniu działania algorytmów obliczania funkcji korelacji i wyznaczania wektorów przesunięcia.

Jak wcześniej napisano, w programie zaimplementowano procedury umożliwiające tworzenie obrazów testowych. Wygenerowane, w sposób losowy, znaczniki na pierwszym obrazie są na drugim przemieszczane według wybranych schematów np. przemieszczenie o zadaną wartość, obrót fragmentu obrazu o zadany kąt. Znając transformację drugiego obrazu względem pierwszego można sprawdzić, czy wyznaczone przesunięcia są poprawne.

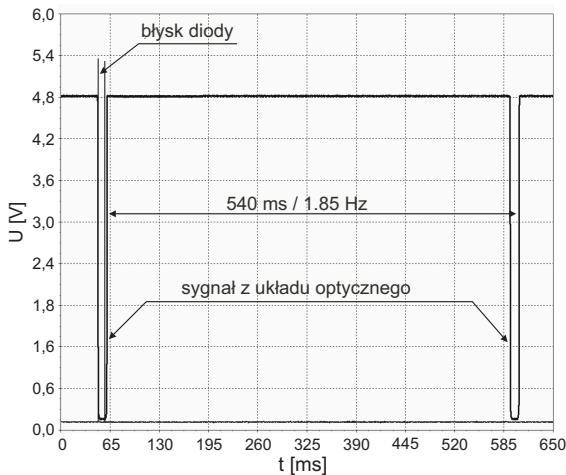
Na Rys. 5 przedstawiono przykład „tętniaka” generowanego w ten sposób, że znaczniki w dolnej części obrazu uległy przemieszczeniu, a w środkowej zostały obrócone o kąt 5° . Rys. 5a przedstawia analizowany obraz, a Rys. 5b wynik obliczeń. Dokładna analiza potwierdza prawidłowe działanie algorytmów wyznaczania wektorów przesunięć.

W celu sprawdzenia dokładności działania algorytmów w sensie poprawności nie tylko jakościowej, ale również ilościowej (dokładność wyznaczania składowych wektora prędkości) wykonano eksperyment, w którym fotografowano obracającą się tarczę z losowo naniesionymi znacznikami. Średnica tarczy wynosiła 6 cm. Wyznaczanie prędkości obrotowej tarczy umożliwił układ złożony z diody świecącej i fototranzystora

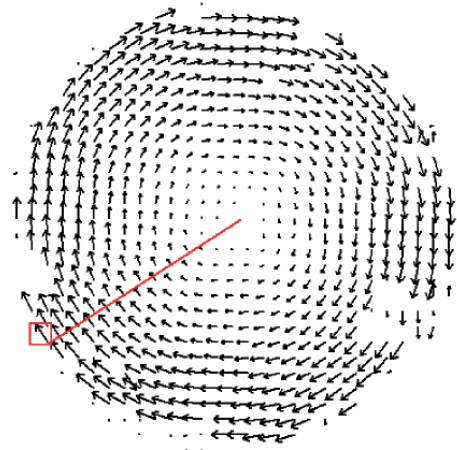


Rys. 5 „Tętniak” jako przykład testowania algorytmów obliczeniowych

(transoptor). Na Rys. 6 przedstawiono sygnały z transoptora. Odstęp czasowy pomiędzy kolejnymi sygnałami wynosił 540 ms. Jest to czas jednego obrotu tarczy (częstotliwość obrotu $f = 1.85$ Hz). Analizowana była prędkość w pobliżu brzegu tarczy – wektor pokazany na Rys. 7. Odległość tego wektora od środka tarczy (linia na Rys. 7) wynosiła $r = 2.85$ cm. Tak więc prędkość na brzegu tarczy wynosi 32.9 cm/s ($\vec{v} = 2\pi fr$). Wyznaczona metodą cyfrowej anemometrii obrazowej prędkość dla analizowanego wektora miała wartość 29.2 cm/s.



Rys. 6. Sygnał z transoptora



Rys. 7. Analiza liniowej prędkości na brzegu tarczy

3. Kamera cyfrowa i jej oprogramowanie

3.1. Parametry kamery

W zastosowanej w eksperymencie kamerze wykorzystywany jest światłoczuły sensor firmy Texas Instruments typ TC237 (Katalog Texas Instrument 1996). Sensor ten posiada dwie powierzchnie pokryte elementami światłoczułymi (piksele). Piksele te zachowują się jak kondensatory, których ładunek jest proporcjonalny do natężenia padającego na nie światła. Matryca sensora składa się z dwóch części: jednej światłoczułej, odsłoniętej i drugiej zasłoniętej zwanej pamięcią.

Podczas pracy kamery w trybie Fram-Transfer istnieje możliwość regulacji szybkości przenoszenia obrazu z jednej matrycy do drugiej. W tym trybie pracy kamery całkowite zdjęcie, obrazujące fazy procesu, ma rozdzielczość 658×992 pikseli.

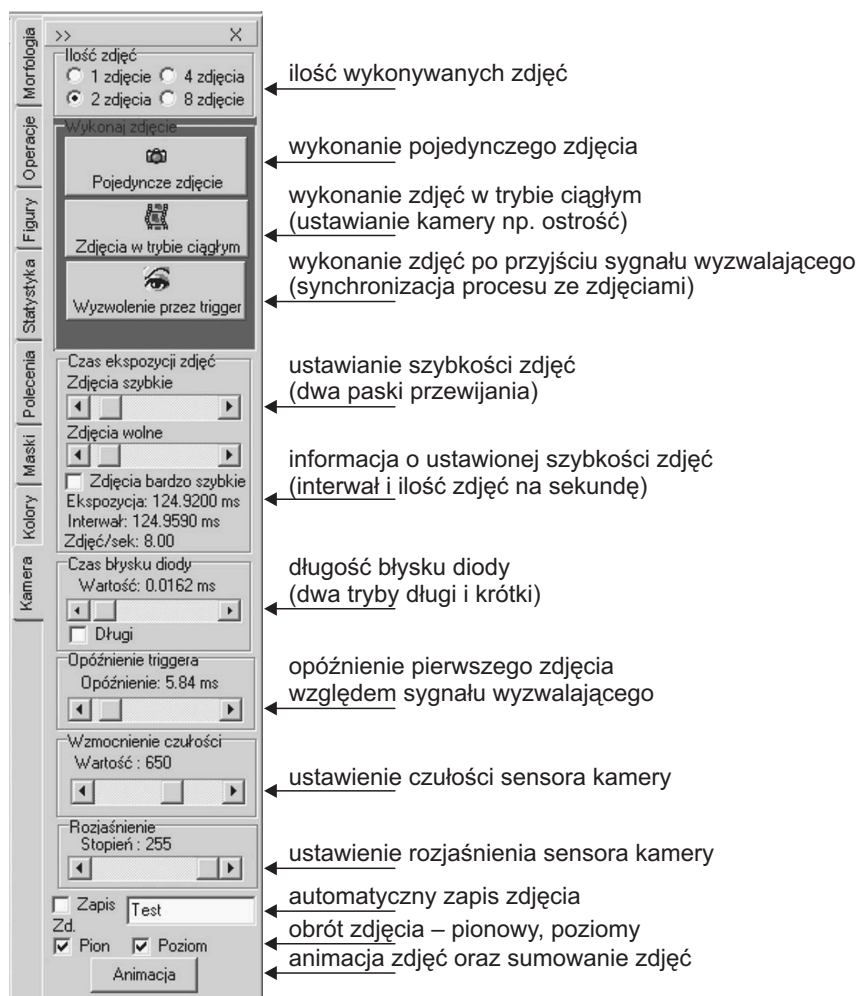
Kamera, rozumiana od tego momentu jako sterowany sensor światłoczuły, ma następujące parametry: ilość wykonywanych zdjęć 2, 4, 8, szybkość zdjęć 25510 – 0.5 zdjęć/sekundę (odstęp czasu pomiędzy zdjęciami 40 μ s do 2 sek.), regulacja długości błysku światła; w przedziale od 0.2 μ s do 490 ms, możliwość wyzwalania pracy kamery zewnętrznym sygnałem TTL, przesunięcie czasowe pomiędzy zewnętrznym sygnałem TTL i pierwszym zdjęciem, regulowane w zakresie od 0 do 81 ms co 10 μ s.

W celu sterowania kamerą, ustawiania parametrów zdjęcia, został napisany specjalny program, który posiada również funkcje obrazujące wykonane zdjęcia na ekranie monitora (Gawor i in. 1994). Dodatkowo, za pomocą tego programu, można dokonać pewnych operacji na wykonanym zdjęciu np. rozjaśnianie, kontrastowanie, cyfrowe filtrowanie, obracanie i wycinanie fragmentu zdjęcia itp. Regulacja odstępu czasu pomiędzy zdjęciami umożliwia zastosowanie kamery do cyfrowej dylatometrii (anemometrii DPIV, termometrii DPIT) (Kowalewski i in. 1988). Kamerę można również zastosować do badania przesunięć obiektów. Rys. 8 przedstawia panel programu, w którym można ustawiać parametry sterujące pracą kamery.

Oprócz sterowania kamerą program umożliwia wykonywanie wielu operacji na mapach bitowych:

- „Morfologia” wykonywanie operacji morfologicznych np. erozja, dylacja, szkieletyzacja, funkcje logiczne itd.,
- „Operacje” operacje typu: binaryzacja, kontrastowanie, rozjaśnianie, obrót itd.,

- „Figury” możliwość rysowania figur: prostokąt, elipsa, wielokąt itd. (istnieje możliwość wyznaczenia powierzchni narysowanych figur),
- „Statystyka” informacje statystyczne o obrazie: rozmiar, wartość minimalna i maksymalna intensywności, odchylenie standardowe itd.,
- „Polecenia” wypisywane są polecenia wykonywane przez program,
- „Maski” ustawienie maski do filtrów cyfrowych,
- „Kolory” możliwość automatycznego wyznaczenia powierzchni obiektów (funkcja wykorzystywana np. do wyznaczenia przekroju powierzchni wyrobiska górniczego).



Rys. 8. Panel sterujący parametrami kamery

W programie istnieje również możliwość:

- wykonania histogramu zdjęć (rozkładu intensywności oddzielnie dla każdego koloru RGB),
- pokazania rozkładu intensywności w wybranych liniach pionowych i poziomych,
- obliczenia pochodnej intensywności w wybranych liniach pionowych i poziomych,
- wyznaczenia transformaty Fouriera intensywności w wybranych liniach pionowych i poziomych,
- wyznaczenia funkcji korelacji pomiędzy wybranymi liniami.

4. Laser impulsowy – generator noża świetlnego

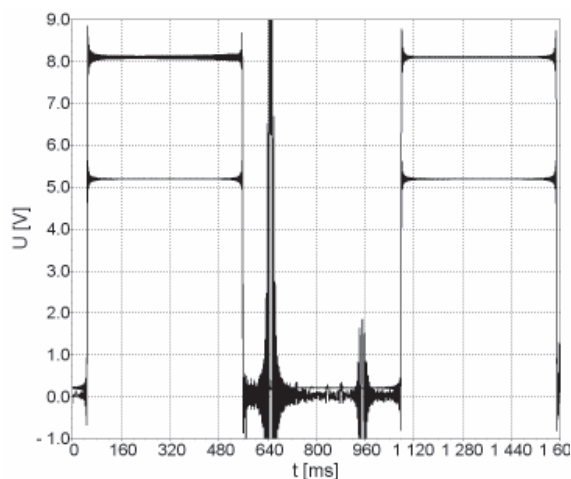
Do badania przepływu cieczy należy zastosować impulsowe oświetlenie w postaci „noża świetlnego”. Dodatkowo źródło światła musi być zsynchronizowane z kamerą, a dokładniej z momentem wykonywanych zdjęć.

W celu zastosowanie tej techniki pomiarowej zastosowano impulsowy laser Magnum II firmy Stoc-kerYale. Ma on następujące parametry:

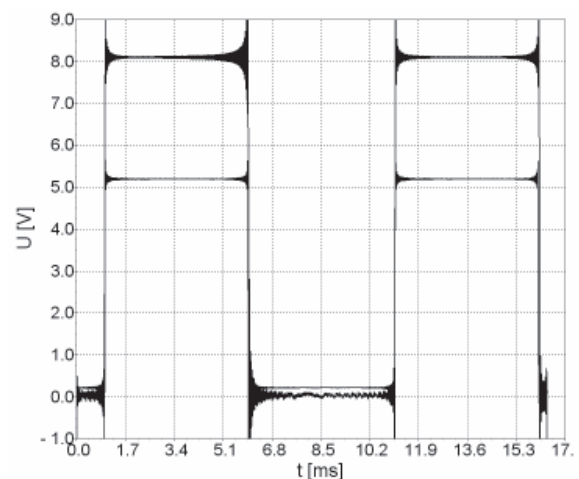
- moc optyczna regulowana w zakresie od 480 do 750 mW,
- długość fali – 680 nm (światło czerwone),
- minimalna szerokość noża świetlnego – 10° (regulowana),
- regulowany czas impulsu od 10 μ s (100 kHz).

W celu sprawdzenia szybkości działania lasera wykonano testy polegające na tym, że światło z lasera podawane było na fototranzystor. Długość impulsu lasera regulowano za pomocą generatora.

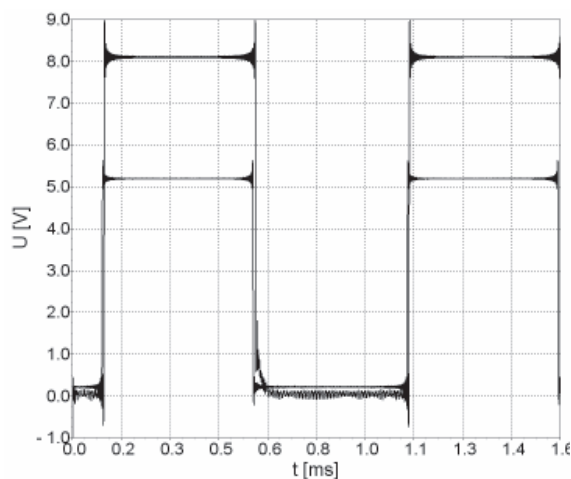
Na Rys. 9 przedstawiono momenty zapalania i wygaszania lasera przy częstotliwościach sygnału z generatora wymuszających 1 Hz (Rys. 9a), 100 Hz (Rys. 9b), 1 kHz (Rys. 9c) i 10 kHz (Rys. 9d). Sygnał wymuszający zmieniał się od 0 do 5 V, natomiast sygnał pochodzący z fototranzystora od 0 do 8 V. Przy częstotliwościach do 100 Hz zapalenie i wygaszenie lasera następuje synchronicznie z sygnałem wymuszającym. Przy częstotliwości 1 kHz następuje opóźnienie zapalania i wygaszania lasera o 8 μ s. Częstotliwość



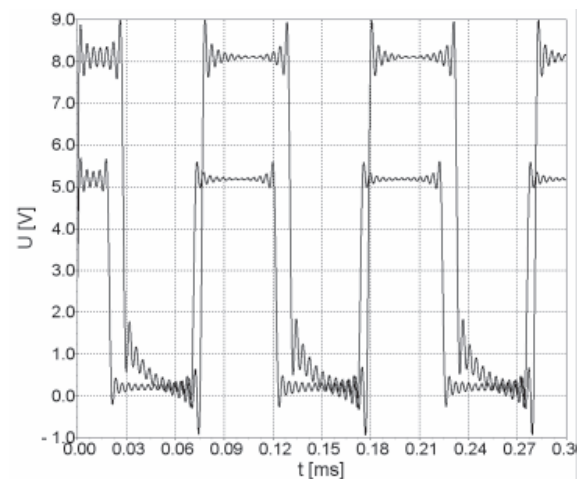
a) $f = 1$ Hz



b) $f = 100$ Hz



c) $f = 1$ kHz



d) $f = 10$ kHz

Rys. 9. Testowanie szybkości lasera impulsowego

świecenia lasera nie ulega zmianie. Przy częstotliwości 10 kHz opóźnienia zapalania lasera wynosi 5 μ s natomiast wygaszania 9 μ s. Również w tym przypadku częstotliwość świecenia lasera nie ulega zmianie.

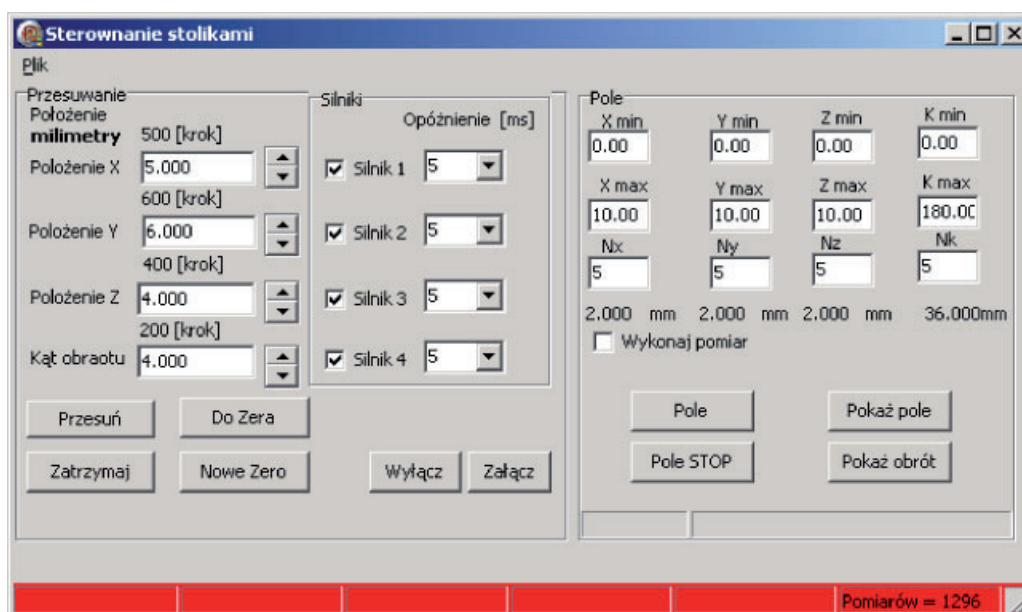
Te niewielkie przesunięcia czasowe błysku lasera nie mają wpływu na jakość wykonywanych zdjęć, gdyż czas ekspozycji zdjęcia jest dużo dłuższy niż czas świecenia lasera (w przeciwnym wypadku zdjęcia byłyby rozmyte).

Przy wyłączeniu lasera następowały duże oscylacje sygnału z fototranzystora. Powodem tego może być wzbudzenie wzmacniacza fototranzystora lub natura pracy lasera. Dlatego wykresy zostały odfiltrowane za pomocą transformaty Fouriera. Zastosowano filtr dolnoprzepustowy o wartościach granicznych odpowiednio: 0.25 Hz, 25 Hz, 250 Hz, 250 Hz.

5. Koordynatometr

Koordinatometr składa się z trzech stolików liniowych oraz jednego stolika obrotowego sterowanych przez silniki krokowe. Odpowiednie zamontowanie stolików umożliwia przemieszczanie kamery w trzech płaszczyznach XYZ. Zakresy przesuwu liniowego stolików wynoszą 600, 400 i 100 mm. Zakres obrotu stolika obrotowego wynosi 360°. Umieszczenie kamery na koordynatometrze umożliwia wykonanie zdjęć w różnych miejscach rozgałęzionych przewodów przepływowych.

Do sterowania silnikami krokowymi został napisany program, w którym istnieje możliwość zadawania parametrów przesuwu stolików (Rys. 10). W programie można dokonać przesuwu stolików do określonego położenia ustawiając współrzędne położenia. Istnieje również możliwość wyboru, które stoliki zostaną przesunięte, a które pozostaną na swoim miejscu. Szybkość przesuwania stolików może być regulowana. Jest to realizowane poprzez opóźnienie pomiędzy kolejnymi krokami silnika.



Rys. 10. Forma do sterowania koordynatometrem i stolikiem obrotowym

Stoliki zostały wyposażone w mechaniczne ograniczniki krańcowe. W przypadku przekroczenia przez stolik ograniczenia krańcowego przesuw stolika zostaje zatrzymany, a program informuje, które ograniczenie krańcowe zostało przekroczone.

W programie istnieje możliwość automatycznego przesuwu stolików od podanych wartości minimalnych do maksymalnych z zadaniem krokiem. W celu wykonania pomiarów po każdym przesunięciu stolików przesuw zostaje zatrzymany (jest to opcja programu).

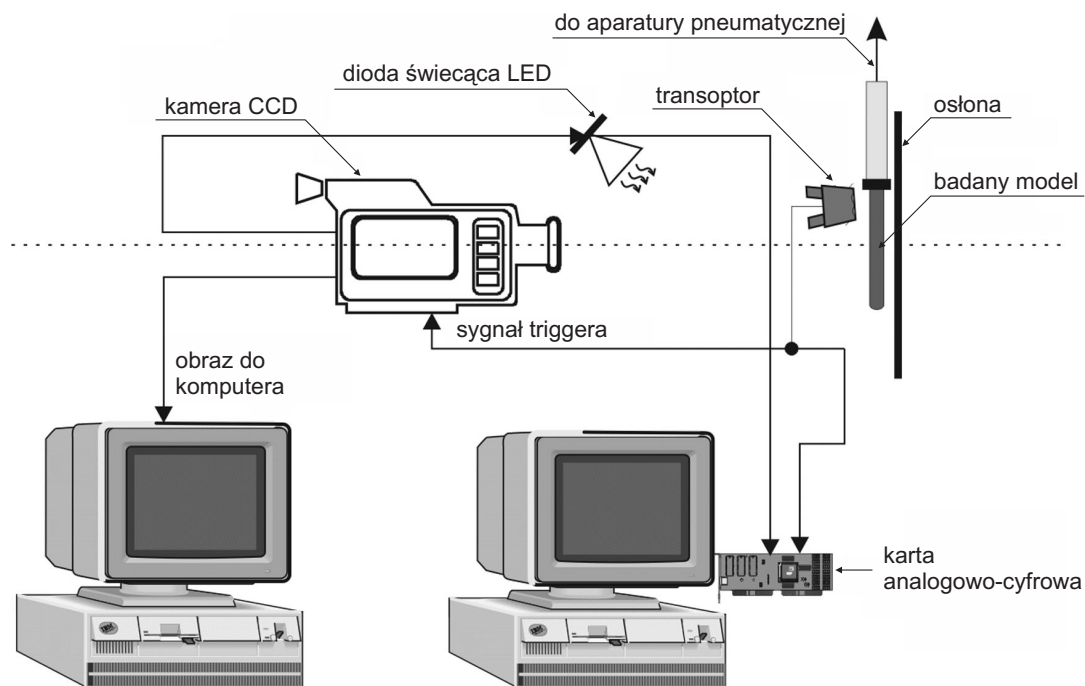
Program umożliwia śledzenie położenia stolików zarówno przesuwu liniowego, jak również obrotowego. Na wykresach pokazywane jest aktualne położenie stolików w każdej z trzech osi oraz aktualny kąt obrotu stolika obrotowego.

6. Opis stanowiska pomiarowego

Wykonany eksperyment miał na celu testowanie aparatury pomiarowej, a w szczególności:

- sprawdzenie układu wyzwalającego,
- dobór parametrów pracy kamery,
- testowanie metody nanoszenia znaczników na elastyczny przewód.

Schemat eksperymentu przedstawiono na Rys. 11. Jako źródła światła użyto diody świecącej (LED) o mocy 10 mW. Dioda świecąca oświetlała badany obiekt na całej jego powierzchni (nie był to nóż świetlny). W celu równomiernego oświetlenia obiektu użyto matówki. Badanym modelem była lateksowa nakładka na palec (Rys. 12) – „walec” o wysokości 75 mm i średnicy 20 mm.



Rys. 11. Schemat eksperymentu

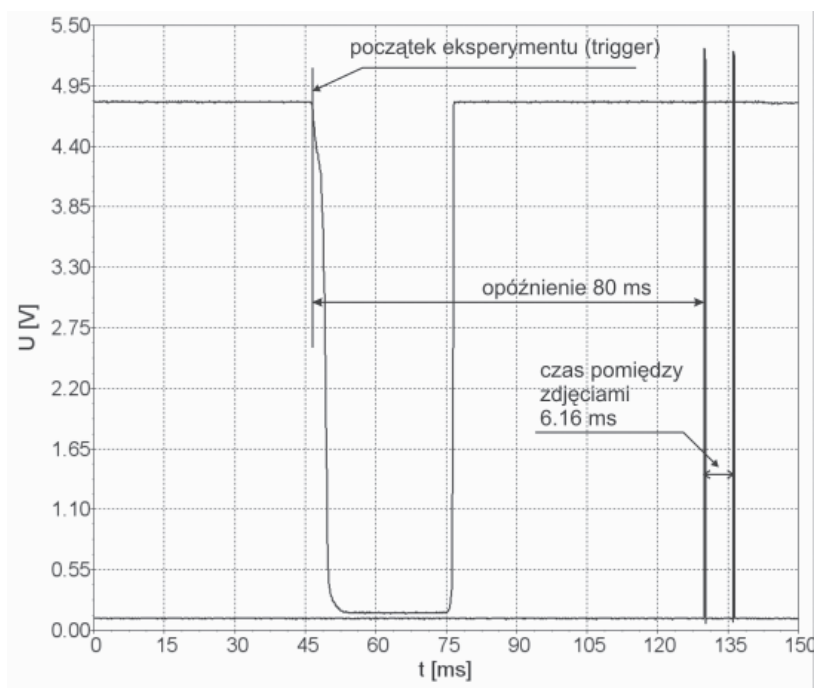
Układ wyzwalający stanowił transoptor odbiciowy – światło wysyłane przez diodę świecąca odbija się od przeszkody i pada na fototranzystor. Transoptor umieszczony był w górnej części modelu w takim miejscu, że po rozszerzeniu modelu światło z diody odbijało się od modelu, co generowało sygnał wyzwalający. Na wysokości transoptora na modelu namalowano białą plamę, co miało polepszyć czułość transoptora. Na Rys. 13 przedstawiono sygnał wyzwalający (opadająca krzywa). Sygnał triggera nastąpił w 47 ms. Drugi sygnał (dwie linie pianowe) pochodzą z wyjścia kamery, która steruje zapaleniem diody świecącej. Moment zapalenia diody uznawany jest za czas wykonania zdjęcia. Na prezentowanym rysunku opóźnienie pierwszego zdjęcia względem sygnału wyzwalającego wynosiło 80 ms, a odstęp czasu pomiędzy zdjęciami wynosił 6.16 ms. Rejestracja napięć została wykonana za pomocą szybkiej karty analogowo-cyfrowej (Gawor, 1999).

Na model nanoszono znaczniki poprzez rozpylanie farby ze szczotki. Na Rys. 12 przedstawiono zdjęcie fotografowanego obiektu przed eksperymentem. W górnej części lateksowy palec przymocowany był do uchwyty za pomocą oringu.

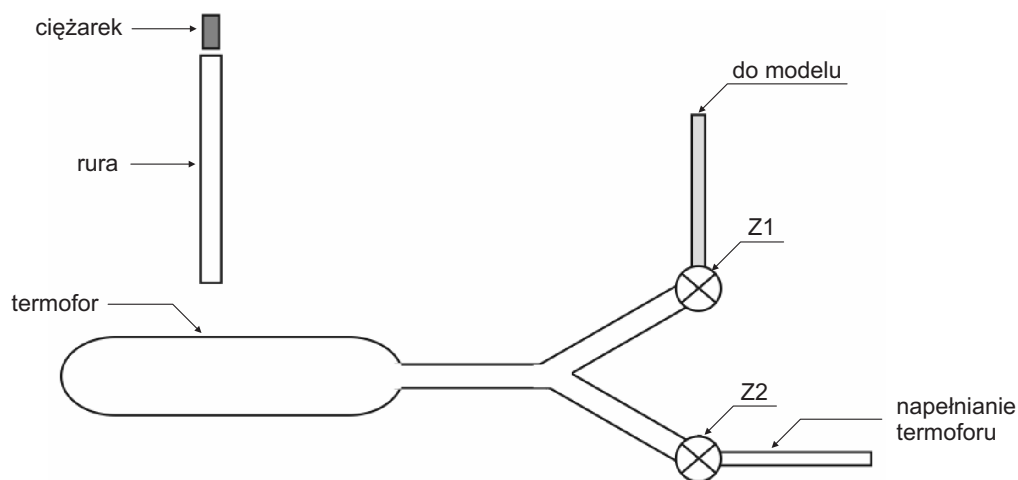
Nagły wzrost ciśnienia wywołany był poprzez upuszczenie ciężarka na termofor. Ciężarek o masie 1.04 kg spuszczały był z wysokości 45 cm. Schemat aparatury pneumatycznej przedstawiono na Rys. 14. Aparatura umożliwiała napełnienie termoforu; zawór (Z2 otwarty Z1 zamknięty). Podczas eksperymentu zawór Z2 był zamknięty, a zawór Z1 otwarty.



Rys. 12. Badany model – lateksowa nakładka na palec



Rys. 13. Sygnał triggera i sygnał zapalania diody świecącej



Rys. 14. Schemat aparatury pneumatycznej

7. Eksperymenty mające na celu odpowiedni dobór przewodów przepływowych i sposobu nanoszenia znaczników

Eksperymenty wykonywano przy następujących ustawieniach kamery:

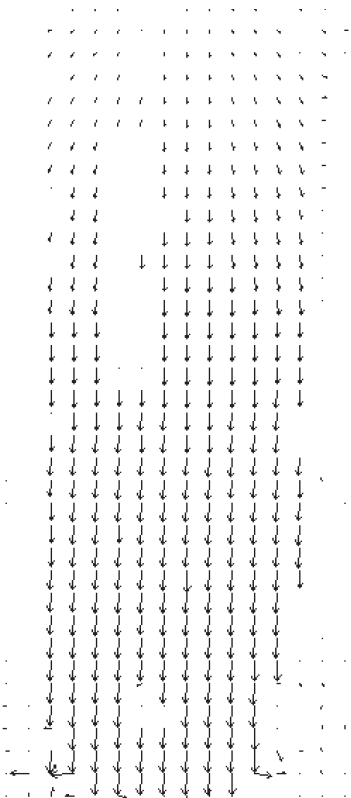
- ilość zdjęć: 2,
- czas pomiędzy zdjęciami: 6.16 ms,
- czas błysku diody: 0.33 ms,
- opóźnienie triggera: od 0 do 80 ms,
- czułość kamery: 700,
- rozjaśnienie: 125.

W celu dalszej analizy prędkości odkształceń z obiektem związany zostanie układ współrzędnych w ten sposób, że oś x jest osią poziomą skierowaną w prawo, oś y jest osią pionową skierowaną w dół.

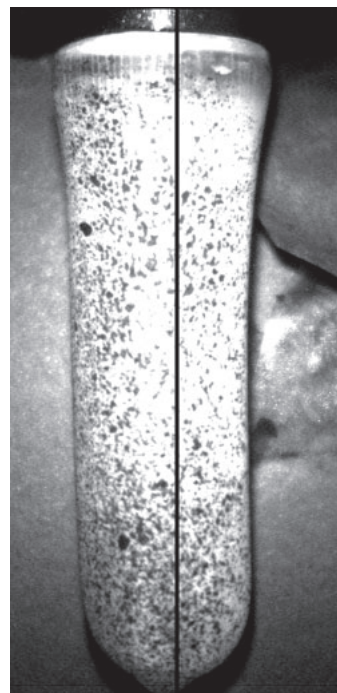
Na Rys. 15 przedstawiono przykładowe wektory odkształceń w chwili 0.2 ms od momentu sygnału wyzwalającego. Rysunek pokazuje, że w tej fazie następuje rozciąganie obiektu w dół (strzałki obrazujące wektory prędkości skierowane są w dół). Jedynie w górnej części modelu można zauważyć niewielkie odkształcenia poziome.

W eksperymentach wykorzystano możliwość opóźnienia pierwszego zdjęcia względem sygnału wyzwalającego. Daje to możliwość analizy odkształcenia modelu w różnych fazach. Wykonano eksperymenty przy opóźnieniach: 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 i 80 ms. Transpor generował sygnał wyzwalający w momencie kiedy model ulegał znacznemu odkształceniu. Tak więc przy tak ustalonym sygnale wyzwalającym nawet przy opóźnieniu 0 ms mamy do czynienia ze znacznym odkształceniem modelu. Nie ma więc możliwości śledzenia początkowej fazy odkształcenia. W przyszłości należałoby zamontować do układu pomiarowego czujnik ciśnienia z komparatorem, co umożliwi obserwację dowolnej fazy odkształcenia modelu.

Poniżej zostaną przedstawione przykładowe przebiegi przestrzenno-czasowe. Pierwszy przykład dotyczy analizy zmian prędkości odkształcenia wzdłuż linii pionowej przebiegającej w pobliżu środka modelu (Rys. 16). Linia ta jest położona w odległości $x = 1.7$ cm od lewego brzegu zdjęcia. W środkowej części widać refleks światła związany z nieodpowiednim doбором oświetlenia. Jedna dioda świecąca nie zapewnia odpowiedniego oświetlenia.



Rys. 15. Przykładowy obraz odkształcenia modelu

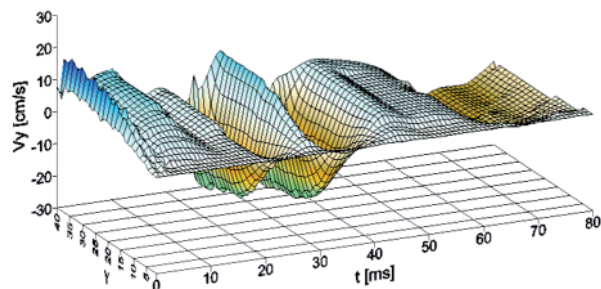


Rys. 16. Wygląd modelu z naniesioną analizowaną kolumną (kolumna 9, $x = 1.7$ cm)

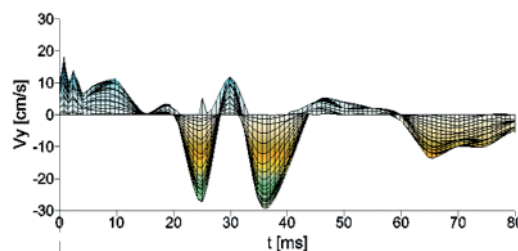
Rys. 17 przedstawia przebiegi składowych prędkości odkształceń oraz moduł prędkości. Dolna oś (dłuższa) jest osią czasu t w milisekundach. Druga dolna oś na rys. 17a, 17c i 17d jest osią y . Zero oznacza górny brzeg zdjęcia. Oś ta została wyskalowana w wartościach położenia maski od 1 do 40. Aby uzyskać położenie względem górnej krawędzi należy położenie maski na wykresie pomnożyć przez wartość skali (0.0124 pikseli/centymetr) oraz skok maski (16 pikseli).

W celu łatwiejszej analizy przebiegów czasowych w prawej kolumnie przedstawiono rzuty wykresów na płaszczyznę tv (Rys. 17 b, d, f).

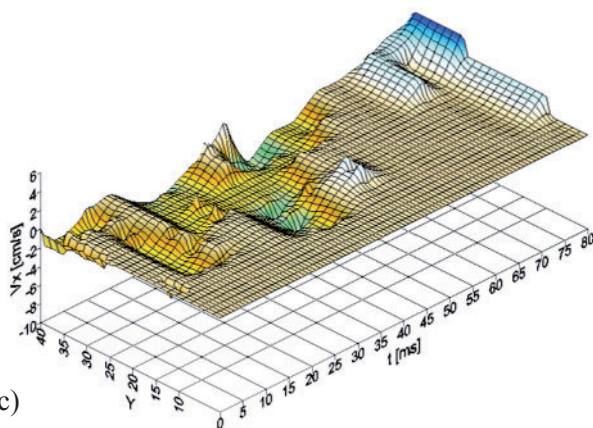
Analiza składowej v_y (Rys. 17 a, b) prowadzi do wniosku, że na początku eksperymentu następuje rozciąganie modelu w kierunku pionowym. Po 20 ms model zaczyna się kurczyć. Kolejnym etapem jest rozciąganie modelu, maksymalna wartość rozciągania zostaje osiągnięta w 30 ms. Po tym rozciąganiu następuje kolejne kurczenie, którego maksymalna wartość następuje w 36 ms. Maksymalna wartość składowej v_y (rozciąganie) wynosi 20 cm/s, a minimalna (kurczenie) -30 cm/s.



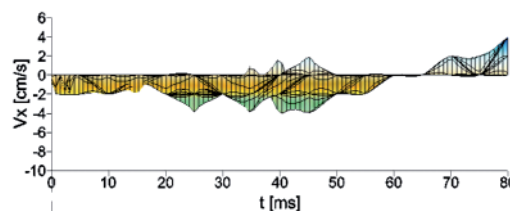
a)



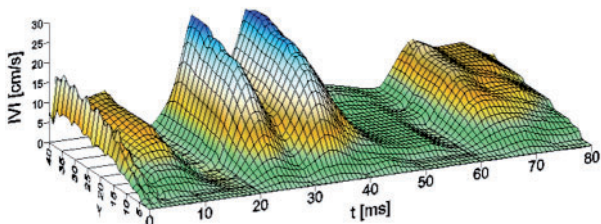
b)



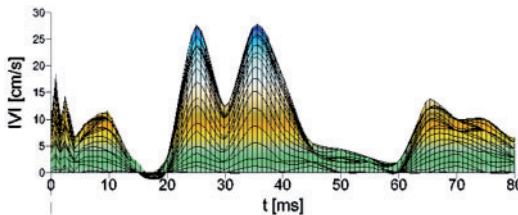
c)



d)



e)

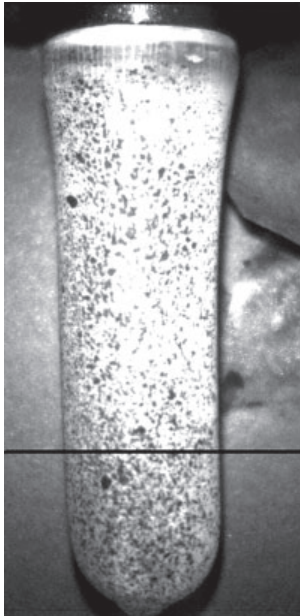


f)

Rys. 17. Rozkład czasowo-przestrzenny prędkości przemieszczenia wzdłuż kolumny 9 ($x = 1.7$ cm)

Składowa v_x (Rys. 17 c, d) zmienia się od wartości minimalnej -4 cm/s do maksymalnej 4 cm/s. Z wykresu Rys. 17d wynika, że wzdłuż osi x praktycznie do 60 ms następuje kurczenie modelu. Analizując wykresy c i d można stwierdzić, że wzdłuż analizowanej kolumny nie występują drgania składowej v_x .

Kolejny przykład dotyczyć będzie analizy szybkości odkształceń wzdłuż 30 wiersza tj. w odległości 6 cm od górnej krawędzi zdjęcia (Rys. 18). Podobnie jak dla kolumny 9 występują drgania składowej v_y pomiędzy 20, a 40 ms. Z Rys. 19 c widać, że na brzegu modelu wzdłuż osi x występują cykliczne rozciągania i kurczenia. Okres drgań wynosi ok. 10 ms. Wartości modułu prędkości są bardzo podobne jak w przypadku kolumny 9.



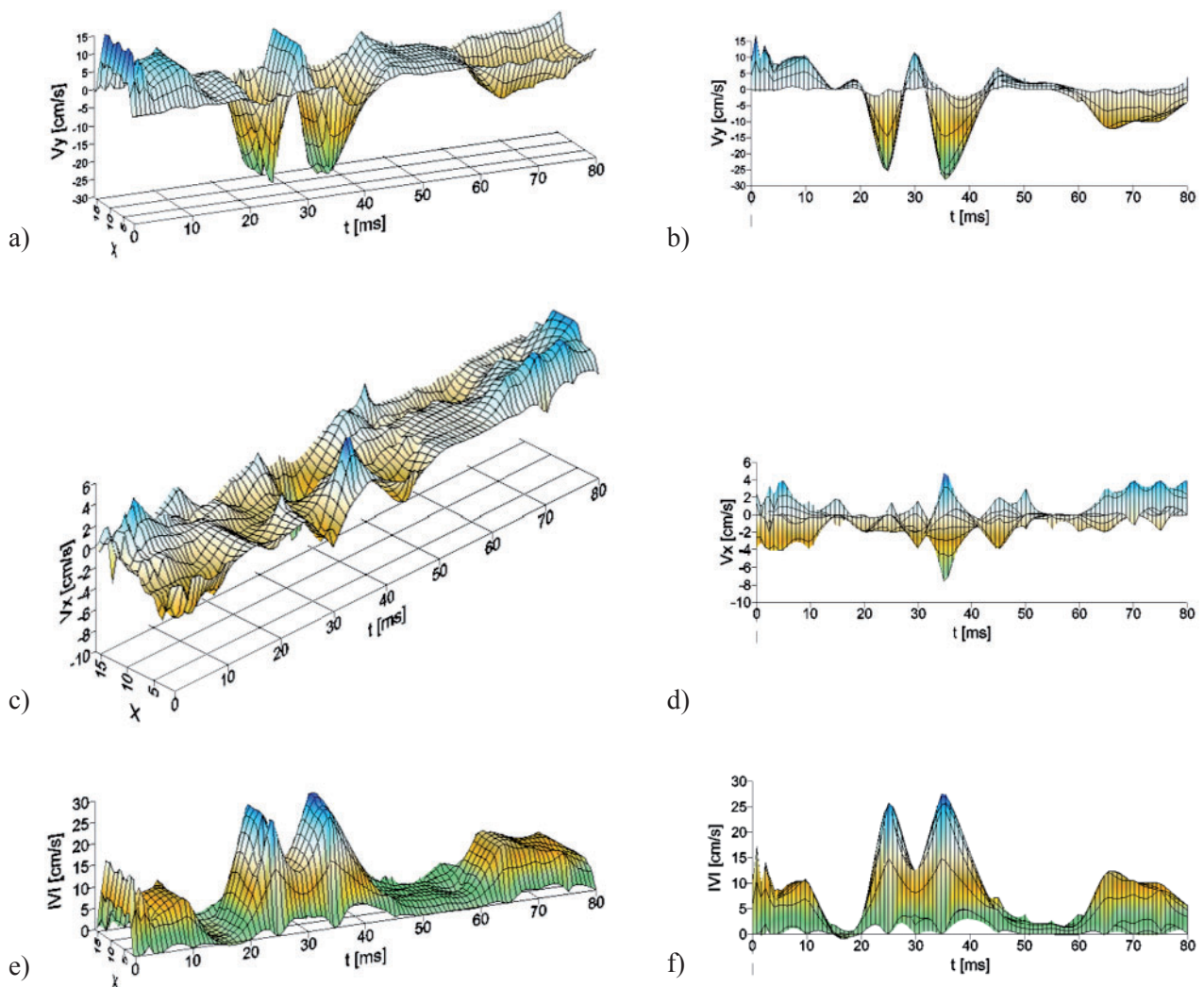
Rys. 18. Wygląd modelu z naniesionym analizowanym wierzem (wiersz 30, $y = 6.0$ cm)

8. Podsumowanie

W podsumowaniu należy stwierdzić, że zaproponowana metoda pomiaru odkształceń i szybkości odkształceń w elastycznych przewodach daje dobre rezultaty. Zbudowane stanowisko pozwala w szybki i wygodny sposób wykonać eksperymenty (seria 30 eksperymentów została wykonana w czasie ok. 1 godziny). Osiągnięto to w wyniku odpowiednio napisanego programu do sterowania kamerą i kartą przetwornika analogowo-cyfrowego.

Zastosowanie odpowiednich procedur w programie sterowania kamerą umożliwia automatyczne i szybkie wycinanie zdjęć oraz ich obracanie, co w wyniku daje dwa zdjęcia konieczne do analizy odkształceń.

Również program do cyfrowej anemometrii obrazowej posiada wygodny interfejs i szereg funkcji ułatwiających analizę wyników obliczeń



Rys. 19. Rozkład czasowo-przestrzenny prędkości przemieszczenia wzdłuż wiersza 30 ($y = 6.0$ cm)

np. wykresy funkcji korelacji. Zastosowane procedury korekty błędnie wyznaczonych wektorów pozwalają na uzyskanie czytelnych obrazów przemieszczeń.

Stanowisko pomiarowe wymaga jednak dalszej rozbudowy. W pierwszym etapie należy zainstalować czujniki ciśnienia, które umożliwią pomiar ciśnienia. Ciśnienie będzie również wykorzystane do preparacji sygnału wyzwalającego. W drugim etapie konieczne jest zastosowanie innego sposobu wymuszania periodycznych odkształceń elastycznych przewodów. Zostanie to zrealizowane poprzez użycie pomp wymuszających przepływy pulsacyjne.

Pracę wykonano w ramach prac statutowych Instytutu Mechaniki Górotworu pt. „Eksperymentalne i teoretyczne badania przepływów pulsacyjnych w rozgałęzionych naczyniach elastycznych” w 2008 roku.

Literatura

1. Bębenek B. (1999): *Przepływy w układzie krwionośnym*. Politechnika Krakowska, Kraków.
2. Boliner J. (1990): *On the accuracy of digital particle image velocimetry system*. Institutionen För Värme-och Kraftteknik Strömningsteknik, Lunds Tekniska Högskola. Technical Report.
3. Cieśliski K. (2001): *Hydrodynamiczne uwarunkowania krążenia mózgowego*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa.
4. Filipczyński L., Herczyński R., Nowicki A., Pawłowski T. (1980): *Przepływy krwi*. PWN, Warszawa – Poznań.
5. Gawor M., Kowalewski T., Rysz J., Smolarski A. (1994): *Experimental research on briquette destruction caused by rarefaction waves*. Archives of Mining Sciences. Vol. 39, s. 313-330.
6. Gawor M. (1999): *Karta szybkiego przetwornika analogowo cyfrowego z oprogramowaniem*. Metrologia i Systemy Pomiarowe VI. (4) 249-255.
7. Hiller W. J., Kowalewski T.A., Tatarczyk Th. (1996): *High speed imaging with a frame-transfer CCD*. Int. Cong. High-Speed-Photography Victoria, Canada, 21-25 Sept. 1992.
8. Katalog Texas Instruments.
9. Kowalewski T., Quenote G., Pakleza J. (1988): *Particle image velocimetry using optical flow for image analysis*. 8th Int. Symposium on Flow Visualization, Sorrento, Edts. G.M. Carlomagno and I. Grant. Edinburg, str. 47. 1-47.11.
10. Raffel M., Willert C., Werley S., Kompenhaus J. (1997): *Particle Image Velocimetry*. Springer.

Investigation of pulsating flows in elastic channel

Abstract

Current paper presents the method of measuring a deformations occurring in elastic channels during pulsating flows. Measuring method is based on digital optical dilatometry and digital particle imaging velocimetry. Algorithms used to calculating of deformation employ 2D autocorrelation function. In order to improve the results, image constructing and standard deviation analysis of autocorrelation function are introduced also. Used algorithms were tested by means of measuring the velocity of rotating target.

In work the experimental stand and result of investigations were described. Preliminary research consists on synchronization obtained pictures with process of the phenomenon and selecting proper channels and manner of placing markers on channels surface.

Obtained results shows usefulness of presented method to measuring a deformations and speed of deformation in elastic channels.

Keywords: digital particle imaging velocimetry, digital photography, flow in elastic channel

Recenzent: Prof. dr hab. inż. *Wacław Dziurzyński*, Instytut Mechaniki Górotworu PAN