

## Algorytm do wyznaczania wektorowego pola prędkości metodą anemometrii obrazowej

Wit STRYCNIEWICZ

*Zakład Aerodynamiki i Termodynamiki, Instytut Techniki Lotniczej,  
Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna,  
ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa*

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono metodykę wyznaczania wektorowego pola prędkości za pomocą metody anemometrii obrazowej. Szczególną uwagę zwrócono na zwiększenie dokładności uzyskiwanych wyników przy pracy z danymi o słabej jakości. W tym celu opracowany został własny algorytm w środowisku MATLAB. Sprawdzono działanie alternatywnego sposobu wyznaczania przemieszczeń w stosunku do standardowo stosowanego oraz efektywność metod poprawiania jakości sygnału korelacji podawanych w literaturze. Uzyskane wyniki porównane zostały z wynikami uzyskanymi za pomocą komercyjnego oprogramowania. Badania stanowią wstępną fazę do opracowania algorytmu do wyznaczania wektorowego pola prędkości w płynie za pomocą pomiarów ultrasonograficznych.

**Słowa kluczowe:** mechanika, eksperymentalne metody mechaniki płynów, anemometria obrazowa, wektorowe pole prędkości, PIV

### 1. WSTĘP

Doświadczalne wyznaczanie pola prędkości przepływającego płynu stanowi ważny element w analizie zagadnień przepływowych. Obecnie spośród metod optycznych, obok klasycznej wizualizacji w tunelach aerodynamicznych, bardzo często stosowaną metodą jest anemometria obrazowa (ang. PIV – Particle Image Velocimetry).

Analiza PIV obok informacji jakościowej dostarcza również informacji ilościowej w postaci lokalnych wartości prędkości. Uzyskane dane służą do utworzenia wektorowego pola prędkości przepływającego płynu. Główne obszary zastosowania metody to aerodynamika, badanie opływu, analiza przepływów typu vortex i turbulencji, analiza przepływów w dyszach i turbinach. Obecnie rozwijany jest również wariant metody do analizy przepływów nieprzeźroczystych optycznie, takich jak krążenie krwi w naczyniach krwionośnych, za pomocą ultrasonografii (ang. EchoPIV) [5].

Wyznaczanie wektorowego pola prędkości metodą anemometrii obrazowej odbywa się poprzez analizę obrazów przepływu za pomocą specjalistycznego oprogramowania. Na rynku znajduje się duża liczba programów do analizy PIV, zarówno komercyjnych (PIVview, VidPIV), jak i o charakterze open-source (PIVlab, mpiv). Głównym celem rozwoju własnego algorytmu było sprawdzenie rozwiązań zwiększających dokładność wyników podczas pracy z obrazami o niskiej rozdzielczości bądź posiadających niestandardowe artefakty. Usprawnienia podzielono na dwie grupy: alternatywną – do najczęściej stosowanych metodyk analizy obrazów oraz stanowiące wariację głównego algorytmu metody poprawiania jakości sygnału korelacji. Badania mają posłużyć rozwojowi oprogramowania do wyznaczania wektorowego pola prędkości przepływającego płynu z pomiarów ultrasonograficznych.

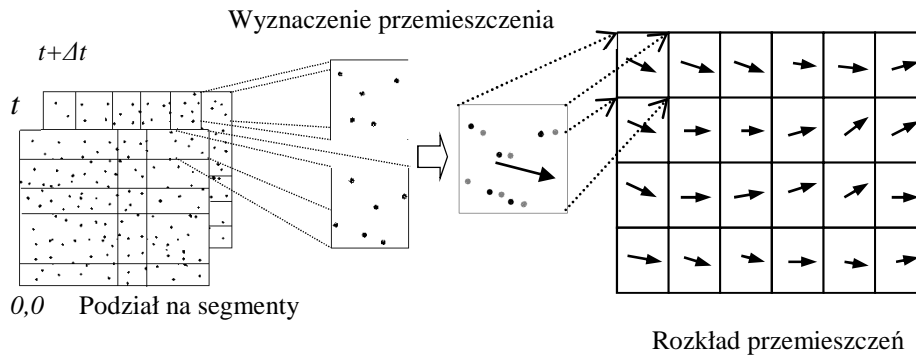
## 2. METODA

Anemometria obrazowa jest metodą do wyznaczania przemieszczeń układów poruszających się cząstek. Główne zastosowanie to wyznaczenie prędkości przepływu. Badanie charakteryzuje się nieinwazyjnością i może być podzielone na trzy fazy: 1) akwizycja obrazów, 2) wyznaczenie przemieszczeń, 3) opracowanie danych. Pierwszy etap ma na celu uzyskanie obrazów poruszających się zgodnie z ruchem płynu cząstek wskaźnikowych. Znaczniki te wprowadzane są do płynu w celu umożliwienia obserwacji przepływu i zachowania się warstw płynu. Cząstki wskaźnikowe powinny charakteryzować się następującymi cechami: niewielki rozmiar gwarantujący dokładne podążanie za miejscowymi zmianami przepływu, gęstość równa gęstości płynu oraz różny od płynu współczynnik odbicia światła lasera bądź fal ultrasonicznych w przypadku EchoPIV. Badany obszar przepływu podświetlany jest wąską płaszczyzną świetlną (za pomocą lasera, tzw. nóż świetlny). Światło odbite od znaczników rejestrowane jest na co najmniej dwóch osobnych bądź na jednej podwójnie naświetlonej klatce za pomocą kamery CCD. Przedstawiono metodykę wyznaczania wektorowego pola przemieszczeń pomiędzy dwoma pojedynczo naświetlonymi obrazami kolejno zarejestrowanymi w czasie  $t$  oraz  $t + \Delta t$ .

Klatki zapisane są w pamięci komputera jako dwuwymiarowe tablice w cyfrowym zapisie skali szarości od 0 do 255.

Koncentracja obrazów cząstek dobierana jest na etapie eksperymentu, tak aby zapewnić odpowiednio wysoką rozdzielczość przestrzenną uzyskanego pola wektorowego. W przypadku niewielkiej ilości cząstek przemieszczenia mogą być wyznaczone poprzez śledzenie pojedynczych cząstek. W większości przypadków w prezentowanej metodyce w związku z dużą ilością cząstek widniejących na jednym obrazie konieczne jest posłużenie się metodami statystycznymi.

W celu matematycznego opisu procesu wyznaczania przemieszczeń wprowadzamy układ współrzędnych związany z obrazem – ma on początek w rogu obrazu oraz prostopadłe osie o dyskretnych współrzędnych  $i, j$ . Przesunięcia wyznaczone są lokalnie poprzez podział obu obrazów na mniejsze segmenty (okna). Okna definiowane są poprzez podanie zakresu indeksów  $i, j$  określonych w układzie współrzędnych całego obrazu. Wektorowe pole przemieszczeń uzyskiwane jest poprzez zestawienie wszystkich przemieszczeń określanych w małych regionach próbkowania.



Rys. 1. Schemat wyznaczenia rozkładu przemieszczeń

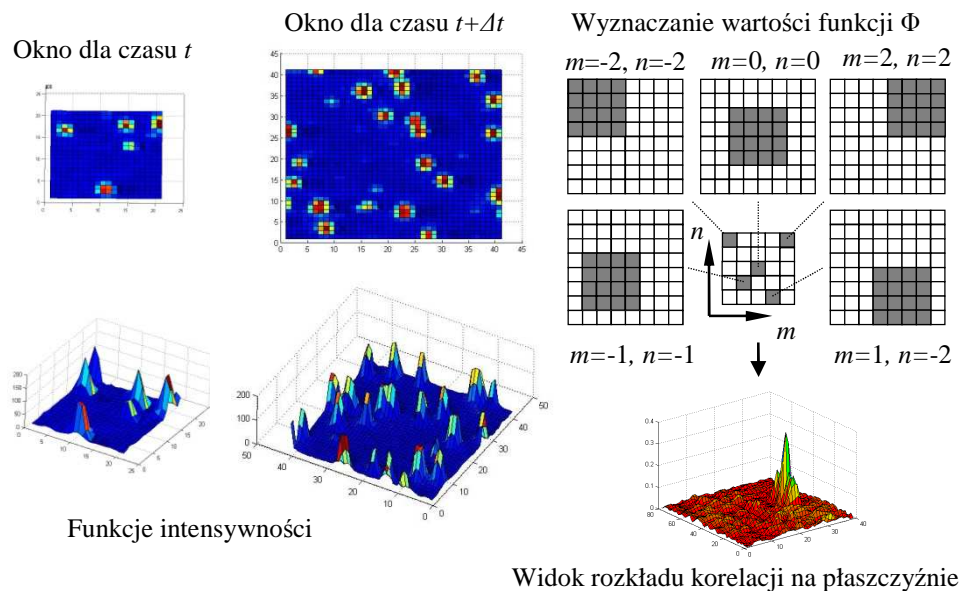
Fig. 1. Image interrogation scheme

Wielkość okien musi być tak dobrana, aby pozwolić na odwzorowanie lokalnych gradientów prędkości danego przepływu. Zmniejszenie okien powoduje zwiększenie rozdzielczości przestrzennej uzyskanego pola wektorowego, jednakże źle dobrana wielkość może uniemożliwić wykrycie pełnego zakresu przemieszczeń. Często wielkość segmentów obierana jest na podstawie reguły, zgodnie z którą bok okna powinien być czterokrotnie dłuższy od spodziewanego przemieszczenia.

Przesunięcie jest poszukiwane pomiędzy wzorami ułożenia cząstek w odpowiadających sobie oknach czasu  $t$  oraz  $t + \Delta t$ . Odbywa się to poprzez dyskretną przestrzenną korelację funkcji intensywności zgodnie z formułą:

$$\Phi(m, n) = \sum_i \sum_j f_t(i, j) f_{t+\Delta t}(i+m, j+n) \quad (1)$$

Intensywność obrazu zdefiniowana jest jako dyskretna funkcja  $f_t(i, j)$  przypisująca pikselowi o współrzędnych  $i, j$  jego liczbową wartość skali szarości. Wartości funkcji korelacji tworzone są poprzez przesuwanie nad oknem czasu  $t + \Delta t$  okna czasu  $t$ . Dla każdego przesunięcia  $m, n$  suma iloczynów wartości funkcji intensywności tworzy jedną wartość korelacji  $\Phi(m, n)$ . Po dokonaniu pełnego zakresu przesunięć ( $-M \leq m \leq M, -N \leq n \leq N$ ) utworzona jest płaszczyzna korelacji o wymiarach  $(2M + 1) \times (2N + 1)$  [1]. Definicja metody wymaga, aby okno rejonu próbkowania dla czasu  $t + \Delta t$  obejmowało większy obszar obrazu niż okno dla czasu  $t$  (rys. 2).



Rys. 2. Schemat wyznaczania rozkładu korelacji okien

Fig. 2. Illustration of the cross-correlation process

Dla wartości przesunięcia  $m, n$ , dla których ułożenie cząsteczek w rejonach próbkowania jest najbardziej zbliżone, wartość funkcji korelacji będzie miała większą wartość. Maksymalna wartość rozkładu funkcji korelacji na płaszczyźnie korelacji użyta jest do określenia przemieszczenia cząstek.

Alternatywnie do wyznaczania korelacji w dziedzinie przestrzennej za pomocą równania (1), korelacja może być przeprowadzona poprzez pomnożenie sprzężonych transformat Fouriera analizowanych obrazów. Wykorzystanie szybkiej transformaty Fouriera znacznie skraca ilość potrzebnych obliczeń w stosunku do korelacji w domenie przestrzennej.

Zaletą tą jest, iż metoda ta stosowana jest w większości algorytmów do anemometrii obrazowej. Szczegółowo metodyka omówiona jest w pracy [1].

Trzeci etap stanowiący opracowanie danych ma na celu usunięcie danych zaburzających wyniki tak, aby uzyskane pole wektorowe było jak najbardziej zgodne z rzeczywistym przepływem. Do najpoważniejszych niepożądanych zjawisk należą [4]:

- wektory o wartościach skrajnych, których wielkość odbiega znacznie od otoczenia,
- brakujące dane,
- dane wynikające z szumu instrumentów podczas procesu rejestracji obrazów.

Opracowanie danych obejmuje: 1) określenie wartości skrajnych, 2) zastąpienie brakujących lub błędnych danych, 3) wygładzenie danych.

### 3. ALGORYTM

#### 3.1. Opis algorytmu

Program napisany został w środowisku Matlab. Algorytm pracuje z cyfrowym zapisem obrazów uzyskanych podczas akwizycji i wczytanych do przestrzeni roboczej środowiska. Obrazy przechowywane są kolejno w postaci trójwymiarowej macierzy, gdzie trzeci wymiar odpowiada ilości klatek. Przedstawiają one zapis ruchu płynu wraz z cząsteczkami zarejestrowany na kolejnych klatkach.

W pierwszej fazie po wczytaniu interesującej nas matrycy określany jest obszar danych, w którym wyznaczone ma być pole prędkości. Odbywa się to poprzez manualne określenie obszaru zainteresowania (OZ) na pierwszej klatce za pomocą funkcji `getrect` oraz `poly2mask`. Współrzędne OZ służą do nałożenia maski na wszystkie klatki, tak aby korelacja odbywała się tylko w interesującym nas obszarze. Pozwala to na uniknięcie wyznaczania pola prędkości w obszarach, gdzie nie ma przepływu (np. ściany kanałów, przeszkody stałe etc.).

Następnym krokiem jest wyznaczenie przemieszczeń cząstek. W celu usprawnienia pracy programu zadanie to realizowane jest poprzez podfunkcję głównego algorytmu. Przygotowane w pierwszej fazie obrazy, stanowiące dane wejściowe tej funkcji, analizowane są podczas kolejnych iteracji w oknach próbkowania o wymiarach zadanych przez użytkownika programu w pikselach ( $n \times m$ ). Następnie przeprowadzana jest korelacja funkcji intensywności pary odpowiadających sobie przestrzennie okien czasu  $t$  i  $t + \Delta t$ .

Dane literaturowe wykazują zwiększenie dokładności wyników poprzez stosowanie korelacji w znormalizowanej formie [2-3].

Wynikiem zastosowania tej metodyki jest uzyskanie rozkładu współczynników korelacji  $\gamma(m, n)$  o zakresie wartości od 0 do 1, wyznaczanych zgodnie ze wzorem:

$$\gamma(m, n) = \frac{\sum_i \sum_j [f_t(i, j) - \bar{f}_{m, n}] [f_{t+\Delta t}(i-m, j-n) - \bar{f}_{t+\Delta t}]}{\sqrt{\sum_i \sum_j [f_t(i, j) - \bar{f}_{m, n}]^2 \sum_i \sum_j [f_{t+\Delta t}(i-m, j-n) - \bar{f}_{t+\Delta t}]^2}} \quad (2)$$

W algorytmie znormalizowana korelacja wyznaczana jest za pomocą funkcji programu Matlab `normxcorr2`. Teoretyczne podstawy metodyki działania algorytmu tej funkcji podane są w pracy [3].

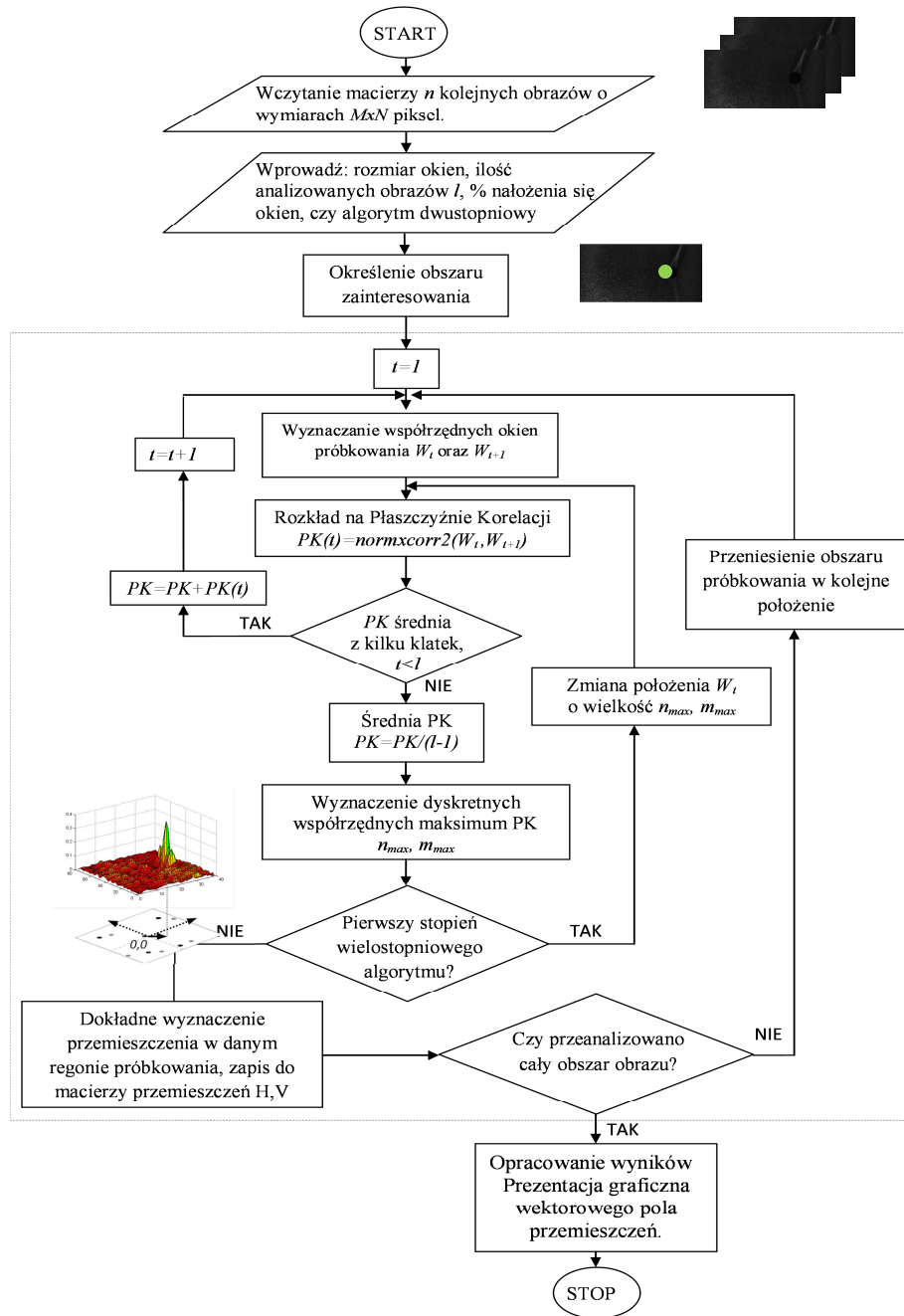
Położenie maksimum rozkładu korelacji na uzyskanej płaszczyźnie odpowiada przemieszczeniu cząstek w danej parze okien. Współrzędne określone są w układzie, którego początek określony jest w centralnym punkcie płaszczyzny (rys. 3). Położenie maksimum w początku układu współrzędnych odpowiada zerowej zmianie położenia cząsteczek w czasie.

W związku z dyskretnym charakterem danych wejściowych wyznaczone przemieszczenie również charakteryzuje się dyskretnym rozkładem o rozdzielczości jednego piksela. W algorytmie zastosowano metodę zwiększenia dokładności wyznaczanych przemieszczeń do poziomu poniżej jednego piksela. Odbywa się to poprzez aproksymację danych w otoczeniu maksymalnej wartości korelacji za pomocą krzywej opisanej funkcją Gaussa [1]. Do wyznaczenia krzywej używa się wartości trzech najbliższych maksimum punktów. Przebieg aproksymowanej funkcji służy do dokładniejszego określenia przemieszczenia.

Wyznaczone przemieszczenia zapisywane są w dwóch osobnych macierzach przemieszczeń poziomych i pionowych. Zapis taki pozwala na odtworzenie wektorowego pola przemieszczeń za pomocą funkcji Matlab `quiver` użytej do prezentacji wyników. Taka forma zapisu przemieszczeń jest również użyteczna do późniejszego opracowania danych.

Odtworzenie wektorowego pola prędkości z mapy przemieszczeń możliwe jest poprzez przeskalowanie uzyskanych wartości przemieszczeń w pikselach zgodnie z formułą:  $v = (a*d)/t$ , gdzie:  $a$  – zależność pomiędzy pikselem obrazu a odpowiadającym mu rzeczywistym wymiarem,  $d$  – wyznaczone przemieszczenie,  $t$  – czas pomiędzy kolejnymi akwizycjami.

Ostatnim etapem jest obróbka danych zapisanych w macierzach przemieszczeń. Proces ten dokonany zostaje za pomocą algorytmu `pppiv`, pracującego również w środowisku MATLAB autorstwa Garcia [4]. Program ten można pobrać z centrum pobrań na stronie firmy MathWorks produkującej oprogramowanie MATLAB.



Rys. 3. Schemat algorytmu

Fig. 3. Diagram of the algorithm

### **3.2. Zastosowane metody poprawienia jakości sygnału korelacji (ang. Correlation Signal Enhancement)**

Literatura podaje wiele możliwości poprawienia jakości sygnału korelacji [1]. Sprawdzono działanie algorytmu z następującymi modyfikacjami:

- określenie przemieszczenia z uśrednionych rozkładów korelacji z kilku klatek (ang. *Ensemble Correlation Method*);
- dwustopniowy proces wyznaczenia przemieszczenia;
- nakładanie się pozycji okien.

W metodzie określenia przemieszczenia z uśrednionych rozkładów korelacji przemieszczenie wyznaczone jest nie z pary obrazów, ale z kilku kolejnych obrazów. Współrzędne maksimum wyznaczone są z rozkładu korelacji będącego średnią rozkładów korelacji z kilku kolejnych klatek. W algorytmie użytkownik zadaje liczbę obrazów, z których wyznaczane mają być średnie płaszczyzny korelacji dla danych okien. Minimalna liczba to dwa obrazy – w sytuacji tej mamy do czynienia z klasycznym algorytmem.

Dwustopniowy proces wyznaczania przemieszczenia dzieli się na wyznaczenie zgrubne oraz bazujące na wynikach pierwszego, wyznaczenie dokładne. Wyznaczona podczas pierwszego stopnia całkowita wartość przemieszczenia użyta jest jako parametr w stopniu drugim. Ilustracja tego procesu w formie schematu blokowego znajduje się na rysunku 3. Zabieg ten ma na celu nałożenie się obrazów cząsteczek po pierwszym etapie i dokładniejsze określenie przemieszczenia. Całkowite przemieszczenie w danym segmencie stanowi sumę przemieszczenia zgrubnego i dokładnego.

Nakładanie się pozycji okien (ang. *Window Overlapping*) jest usprawnieniem, którego celem jest zwiększenie rozdzielczości uzyskanego wektorowego pola przemieszczeń. W metodzie tej kolejna pozycja regionu próbkowania pokrywa się w pewnym stopniu z poprzednią pozycją. Stosunek nałożenia się okien podawany jest w procentach. W algorytmie dopuszczane są wartości w granicach 0-100%, gdzie maksymalna wartość wskazuje na całkowite pokrycie się pozycji okien. Nakładanie się pozycji okien podawane jest przez użytkownika podczas rozpoczęcia działania programu w kierunku horyzontalnym i wertykalnym osobno. Literatura podaje 50% jako optymalną wielkość. Szersze omówienie zastosowanych metod zawarte jest w pracy [1].

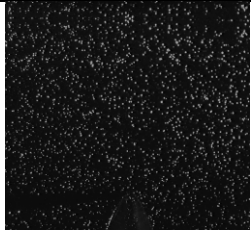
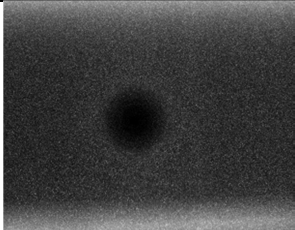
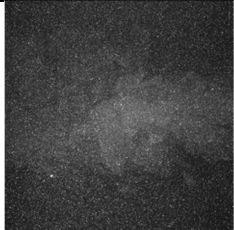
## **4. PREZENTACJA ORAZ OMÓWIENIE WYNIKÓW**

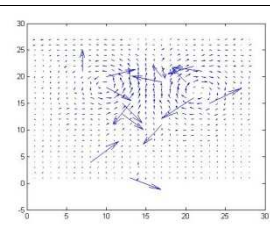
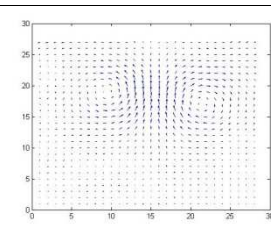
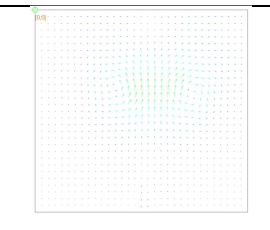
### **4.1. Porównanie wyników działania własnego algorytmu z komercyjnym programem**

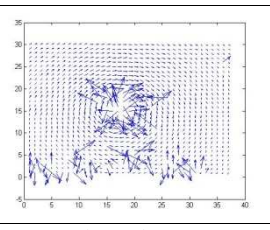
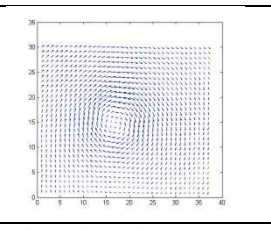
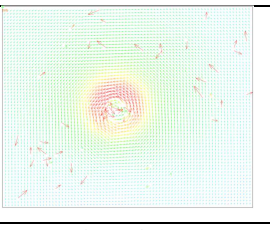
Pole prędkości uzyskane za pomocą opracowanego algorytmu porównane zostało z otrzymanym za pomocą komercyjnego oprogramowania PIVview.

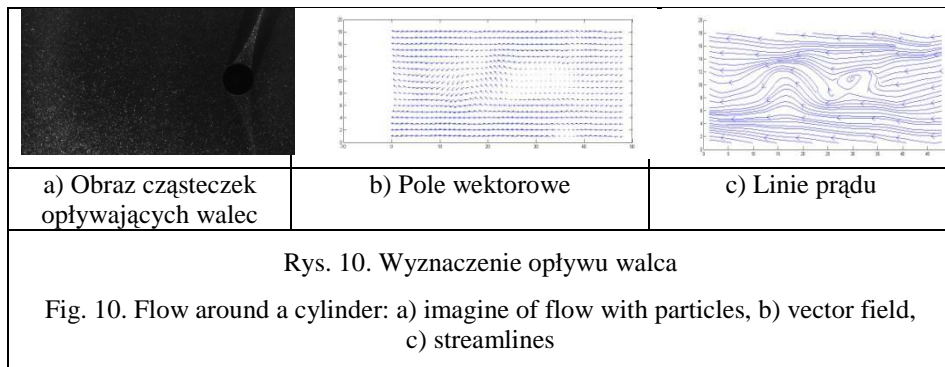
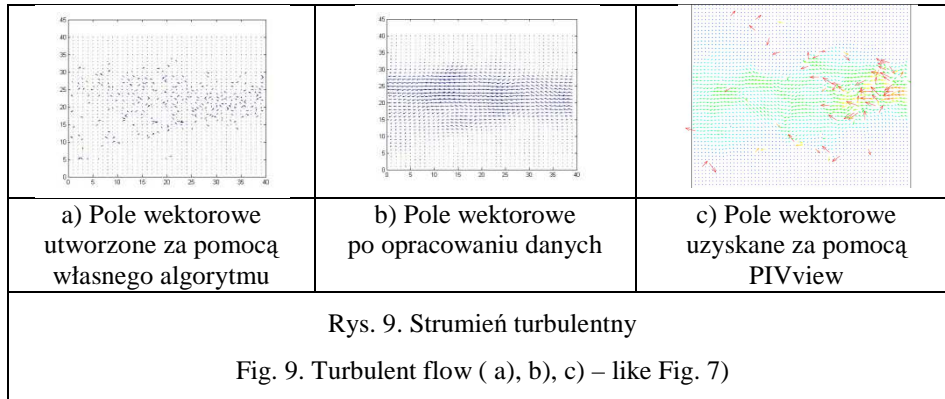


Do porównania wyników użyte zostały obrazy dostępne na stronie producenta programu PIVview, firmy PivTec GmbH. Przykładowe obrazy użyte do wyznaczenia przepływu przedstawione są na rysunkach 4-6.

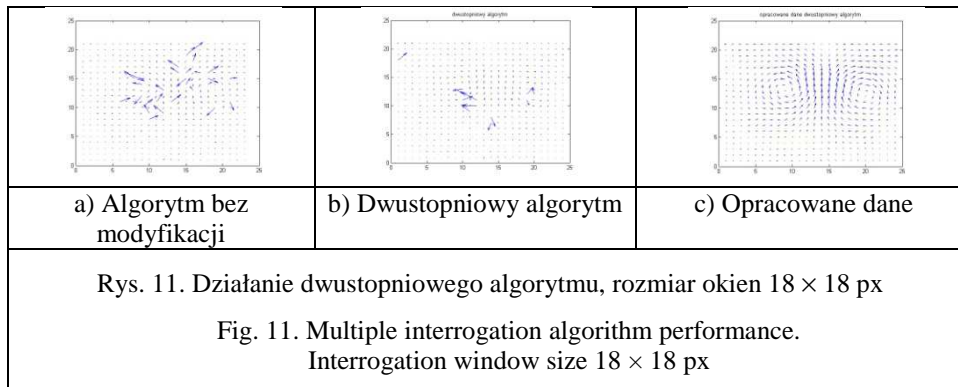
		
Rys. 4. Wstrzyknięcie płynu Fig. 4. Fluid injection	Rys. 5. Silny wir Fig. 5. Vortex	Rys. 6. Strumień turbulentny Fig. 6. Turbulent flow

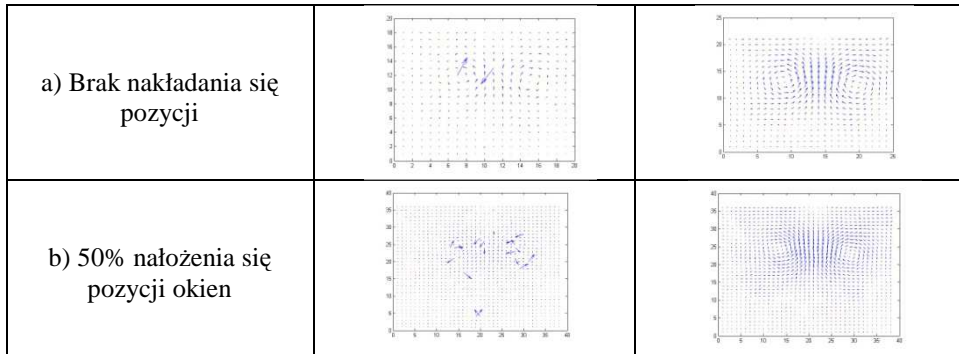
		
a) Pole wektorowe utworzone za pomocą własnego algorytmu	b) Pole wektorowe po opracowaniu danych	c) Pole wektorowe uzyskane za pomocą PIVview
Rys. 7. Wstrzyknięcie płynu Fig. 7. Fluid injection: a) home-made algorithm, b) post-processed results, c) commercial software		

		
a) Pole wektorowe utworzone za pomocą własnego algorytmu	b) Pole wektorowe po opracowaniu danych	c) Pole wektorowe uzyskane za pomocą PIVview
Rys. 8. Silny wir, zmniejszona liczba cząstek wskaźnikowych w centrum Fig. 8. Vortex, low concentration of particles in the center ( a), b), c) – like Fig. 7)		



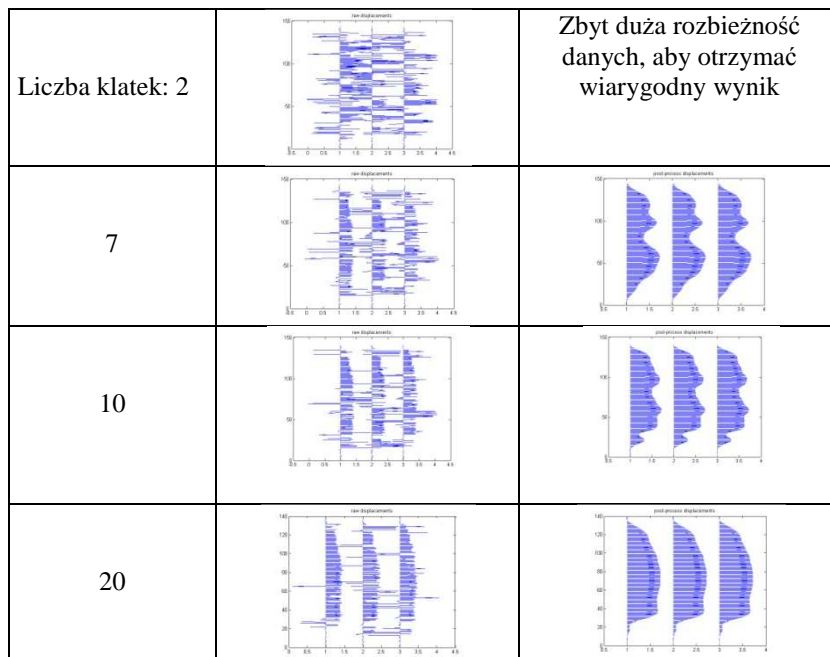
#### 4.2. Prezentacja wpływu zastosowanych metod polepszenia jakości sygnału korelacji na uzyskane wyniki





Rys. 12. Nakładanie się pozycji okien, rozmiar okien  $24 \times 24$  piksele

Fig. 12. Window overlapping, interrogation window size  $24 \times 24$  px:  
a) without window overlapping, b) 50% widow overlapping



Rys. 13. Wyznaczanie przemieszczeń ze średniej płaszczyzny korelacji pomiędzy kilkoma klatkami

Fig. 13. Ensemble Correlation Method, for 2, 7, 10 and 20 frames

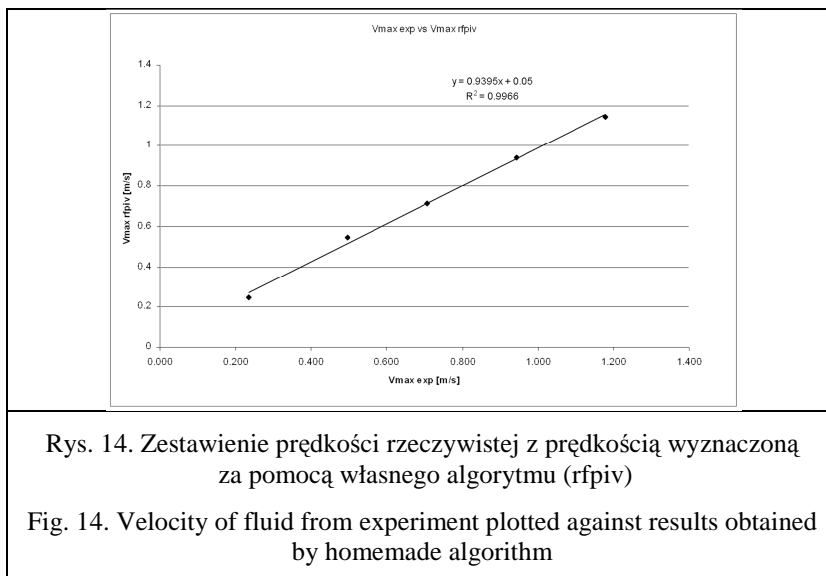


Tabela 1. Porównanie średnich wartości przemieszczeń

Table 1. Comparison of the displacements obtained by homemade algorithm and commercial software

Kierunek	Własny algorytm	PIVview	Różnica w %
horyzontalny	0,08	0,1	20
wertykalny	0,276	0,291	5

### 4.3. Omówienie wyników

Pola wektorowe przedstawione na rysunkach 7-9 wyznaczone za pomocą własnego algorytmu wykazują zadowalające podobieństwo z polami wektorowymi uzyskanymi za pomocą komercyjnego algorytmu. W przypadku obrazów wstrzyknięcia płynu różnica pomiędzy wyznaczonymi przemieszczeniami horyzontalnymi i wertykalnymi wynosi odpowiednio 20% i 5%. Szczególną skuteczność w odzyskiwaniu utraconych danych wykazał zastosowany post-processing. Jest to widoczne na przykładzie rysunku 8, gdzie przedstawiony jest silny wir. W tym przypadku w związku z brakiem cząsteczek wskaźnikowych w centrum wiru, nieopracowane dane posiadały liczne braki i skrajne wartości przemieszczeń. Pole wektorowe po zastosowaniu procesu opracowania przedstawia prawidłowy rozkład. W przypadku przepływu zaburzonego na rysunku 9 efekt zastosowania własnego algorytmu różni się w pewnym stopniu od wyników uzyskanych za pomocą komercyjnego programu. Algorytm dostarcza danych dostatecznych do wyznaczenia linii prądu, co widoczne jest na rysunku 10.

Wyniki działania algorytmu z dwustopniowym wyznaczeniem przemieszczenia, przedstawione na rysunku 11, wykazują poprawę jakości wyników w stosunku do algorytmu bez modyfikacji. Wyznaczone pole wektorowe posiada mniej wartości skrajnych, przedstawiając dokładniejszą reprezentację przepływu. Na rysunku 12 przedstawiono wynik 50% nakładania się pozycji okien. Widoczny jest dwukrotny wzrost rozdzielczości uzyskanego pola wektorowego.

Do sprawdzenia działania metody wyznaczenia przemieszczeń ze średniej płaszczyzny korelacji, użyto danych słabszej niż pozostałe obrazy rozdzielczości. Obrazy przedstawiały przepływ ustalony w prostej rurce z parabolicznym rozkładem profilu prędkości. Na rysunku 13 pokazano wpływ zwiększania ilości klatek na jakość uzyskiwanych wyników. W przypadku korelacji pomiędzy dwoma kolejnymi obrazami nie jest możliwe odtworzenie wektorowego pola prędkości. Wzrost ilości klatek przynosi poprawę wyników. Profil paraboliczny, odpowiadający rzeczywistemu przepływowi, widoczny jest dopiero po wyznaczeniu korelacji pomiędzy około 20 klatkami. Uzyskany profil nie jest symetryczny w związku ze złą jakością danych w dolnej części obrazu. Wykres na rysunku 14 przedstawia porównanie rzeczywistych prędkości maksymalnych przepływu w rurce z wyznaczonymi za pomocą własnego algorytmu dla przypadków różnych prędkości. Widzimy bardzo dobrą korelację wyników  $r = 0,997$  potwierdzającą prawidłowe wyznaczenie prędkości dla różnych jej wartości.

## 5. PODSUMOWANIE

Wyniki działania własnego algorytmu wykazują zadowalające podobieństwo z wynikami działania komercyjnego oprogramowania. Zastosowana metoda Szybkiej Znormalizowanej Korelacji przeprowadzona za pomocą funkcji Matlab `normxcorr2` okazała się skuteczna i przydatna do zastosowania w algorytmach anemometrii obrazowej. Korelacja w domenie przestrzennej charakteryzuje się dłuższym czasem obliczeń od korelacji w domenie częstotliwości. Zastosowane metody polepszenia jakości sygnału korelacji przyniosły poprawę jakości uzyskiwanych wyników. Metoda wyznaczania przemieszczeń ze średniej płaszczyzny korelacji jest szczególnie przydatna w przypadku badania przepływu ustalonego z danych o słabej rozdzielczości.

Zastosowanie dwustopniowego algorytmu przynosi poprawę jakości wyników poprzez zmniejszenie ilości wektorów skrajnych. W tym przypadku jednakże trzeba brać pod uwagę zwiększony czas dokonywania obliczeń. Metoda nakładania się okien, pomimo iż nie przynosi poprawy jakości danych, pozwala na lepszą wizualizację przepływu poprzez zwiększenie rozdzielczości uzyskanego pola wektorowego.

Jest to szczególnie przydatne, gdy optymalna wielkość okien nie zapewnia dostatecznej rozdzielczości pola wektorowego. Prawidłowe działanie algorytmu potwierdza zgodność prędkości wyznaczanych z wartościami rzeczywistymi badanego przepływu. Zastosowany post-processing działa bardzo dobrze, pozwalając na uzyskanie wiarygodnego obrazu przepływu nawet przy danych wejściowych o słabej jakości.

Uzyskane wyniki potwierdzają skuteczność zaproponowanych rozwiązań w pracy z danymi o słabej rozdzielczości.

## LITERATURA

- [1] Raffel M., Willert C.E., Wereley S.T., Kompenhans J., *Particle Image Velocimetry – A practical Guide*, 2nd ed., 2007.
- [2] Pust O., PIV: Direct Cross-Correlation compared with FFT-based Cross-Correlation, *Proceedings of 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon, 2000.
- [3] Lewis J.P., *Fast Normalized Cross-Correlation*, Industrial Light & Magic.
- [4] Garcia D., A fast all-in-one method for automated post-processing of PIV data, *Exp Fluids*, September 2010.
- [5] Kim H.B., Hertzberg J.R., Shands R., Development and validation of echo PIV, *Experiments in Fluids*, 36, 2004.
- [6] Adrian R.J., Twenty years of particle image velocimetry, *Experiments in Fluids*, 39, 2005.
- [7] Beulen B., van de Vosse F., Perpendicular ultrasound velocity measurements by 2D cross correlation of RF data. Part A: validation in straight tube., *Exp Fluids*, 2010.

## Development of Particle Image Velocimetry Algorithm

Wit STRY CZNIEWICZ

**Abstract.** In current work the Particle Image Velocimetry method is being described. The aim of research was to improve the performance of PIV algorithm while working with poor quality input data. Alternative method of displacement estimation and signal enhancement methods was tested by own algorithm developed in MATLAB. Performance of proposed methods was compared with performance of commercial program. This investigation is initial stage of research on developing and validating a vector flow imaging system based on Particle Image Velocimetry by fast ultrasound.

**Keywords:** experimental fluid dynamics, PIV, vector flow imaging