

Algorytmy do analizy składowych wektora prędkości

MAREK GAWOR, JACEK SOBCZYK, WALDEMAR WODZIAK

Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

Streszczenie

W artykule przedstawiono algorytmy komputerowe zaprojektowane w celu analizy składowych płaskiego pola prędkości. Informacje o składowych wektora prędkości pochodzą z programu Dantec Dynamic Studio lub programu powstałego w Instytucie. Analizowane są wszystkie pliki z wybranego katalogu. Programy te generują płaskie pola prędkości wyznaczone przy pomocy anemometrii cyfrowej (Particle Image Velocimetry – PIV). W programie możemy analizować składowe wektora prędkości wzdłuż linii poziomej i pionowej. Możemy zapisać pliki w celu narysowania trójwymiarowego pola wybranej składowej wektora prędkości lub zmiany składowych w czasie. Istnieje możliwość wyznaczenia sumy, wartości średniej, odchylenia standardowego, czy rotacji wektora prędkości.

Słowa kluczowe: anemometria obrazowa, składowe wektora prędkości, rotacja

1. Uwagi wstępne

W Instytucie Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk od wielu lat tworzone są programy komputerowe, które pozwalają na szybką i dokładną analizę danych pomiarowych. W metodzie anemometrii obrazowej PIV w wyniku pomiaru otrzymujemy setki pól wektorowych, które zawierają tysiące wektorów. Prezentowany program komputerowy, zaprojektowany oraz napisany przez pracowników IMG PAN znacznie ułatwia pracę nad danymi pomiarowymi pochodzącymi z pomiarów PIV.

Informacje o składowych wektora prędkości pochodzą z programu Dantec Dynamic Studio lub programu powstałego w Instytucie. Analizowane są wszystkie pliki z wybranego katalogu (np. D:\Wykres\ dwa_prety). Programy te generują płaskie pola prędkości wyznaczone przy pomocy metody PIV) [Raffel i in., 2017]. W programie możemy analizować składowe wektora prędkości wzdłuż linii poziomej i pionowej. Możemy zapisać pliki w celu narysowania trójwymiarowego pola wybranej składowej wektora prędkości lub zmiany składowych w czasie. oraz wyznaczyć sumę, odchylenie standardowe, wartość średnią czy rotację płaskiego pola prędkości.

Cały program komputerowy składa się z wielu modułów, z których kilka opisano poniżej. W parametrach programu WYKRES (np. temp.par w linii kolumny do wektory PIV podawane są kolumny, które brane są do analizy. Pierwsza wartość podaje ilość kolumn w tabeli. Kolejne wartości dotyczą wartości X, Y, Vx, Vy, IVI, xi, yi, S (Tab. 1).

Tab. 1. Numery kolumn przeznaczonych do analizy

Ilość	X	Y	Vx	Vy	IVI	xi	yi	S	
23	17	18	12	13	14	3	2	19	numery kolumn w programie IMG
12	5	6	9	10	11	1	2	12	numery kolumn w programie Dantec

Program zapisuje tabelę położenia wektorów i składowe V_x i V_y przepływu. Do zewnętrznego pliku konieczne jest skopiowanie trzech pierwszych linii z programu Dantec Dynamic Studio. Ilość wierszy pobierana jest z trzeciego wiersza pliku: I = 142 wektory na osi X i J = 111 wektory na osi. Przykładowa nazwa pliku od_4Hz_3cm_s_.4vajn1lx.000237.dat pochodzącego z programu Dantec Dynamic Studio.

Ostatnie 6 cyfr oznacza numer zdjęcia. Istotne jest, aby nazwa zewnętrznego pliku miała identyczny format, gdyż pliki wynikowe korzystają z tego formatu (np. numer zdjęcia, itp.). Numer zdjęcia wykorzystywany jest do wyznaczenia czasu wykonania zdjęcia.

Po wybraniu katalogu program automatycznie wczytuje ilość plików z pomiarami w danym katalogu i wartości minimalne i maksymalne współrzędnych. U dołu panelu **wektorki** wypisywana jest ilość plików w tym katalogu. np. Plików = 11.

Analizowane są zdjęcia o numerach podanych w okienkach **Od**, **Do**. np. od 30 do 50 włącznie. Analizowane są zdjęcia **co które** podane w okienku **Co który plik analiza**. np. 1 – każde zdjęcie z przedziału 30 do 50. Ilość plików wpisywana jest w oknie **Do** i na dole przekładki (Plików = 11), a wartości współrzędnych, minimalnych i maksymalnych, w oknach **Xp[mm]**, **Xk[mm]**, **Yp[mm]**, **Yk[mm]**.

Analizowane pliki muszą mieć format (3 linie): TITLE="Dynamic Studio Exported Data", VARIABLES="„x” „y” „x (pix)[pix]” „y (pix)[pix]” „x (mm)[mm]” „y (mm)[mm]” „U pix[pix]” „V pix[pix]” „U[m/s]” „V[m/s]” „Length[m/s]” „Status”, ZONE T="DynamicStudio Data" I=142 J=111 F=POINT. Postać dwóch pierwszych linii jest dowolna.

Jeżeli wciśnięty jest przycisk **Wartości bezwzględne** wypisywane są wartości bezwzględne składowych prędkości.

Czas pomiędzy zdjęciami podawany jest w polu **Krok czasowy [sek.]**. W plikach wyjściowych ilość cyfr po przecinku zależna jest od ustawienia w przekładce **Osi**.

2. Poruszający się obiekt – (Dane w linii Y lub X)

Tworzony jest automatycznie katalog „**Wyniki_1**”. Analizowane są wartości składowej prędkości umieszczone w linii **Y** lub **X** w zależności od wyboru w panelu **Linia (X lub Y)**.

Analizowane są wartości z przedziału od **Xp** do **Xk** – linia pionowa lub od **Yp** do **Yk** – linia pozioma. Wartości **Xp**, **Xk**, **Yp**, **Yk** wpisywane są w oknach **Xp[mm]**, **Xk[mm]**, **Yp[mm]**, **Yk[mm]** (dokładniej analizowane są linie – tylko jedna – położone o współrzędnej większej niż podana). W nazwie pliku wypisywany jest czas zdjęcia podany w okienku. **Krok czasowy [sek.]** np. 0.06667.

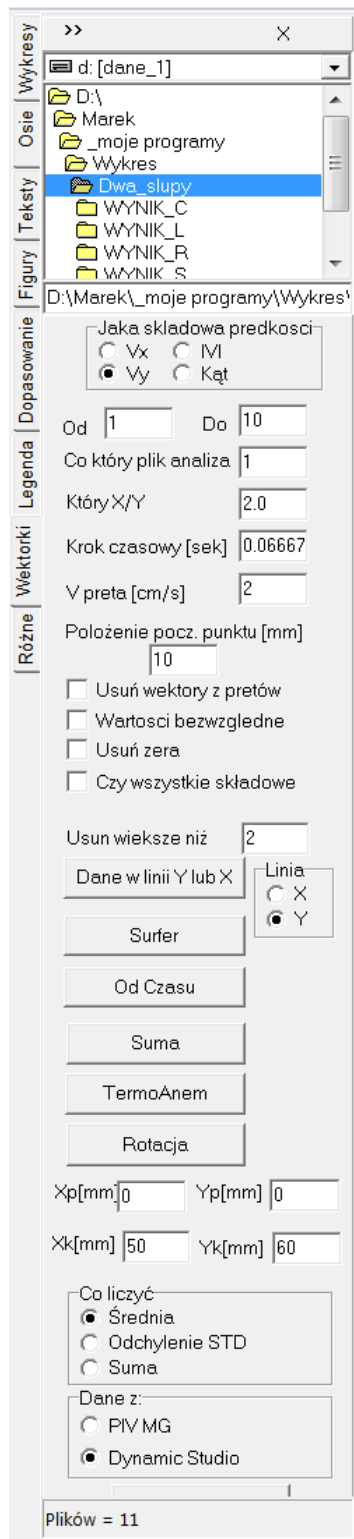
W pliku wypisywane są: położenie **X[mm]** lub **Y[mm]**, wartości składowej wybranej w polu **Jaka składowa prędkości**. np.: **Vx** lub **Vy**. Oprócz dwóch składowych prędkości **Vx** i **Vy** możemy analizować moduł prędkości **IVI** i kąt pomiędzy składowymi prędkościami **kąt**.

Przykładowa nazwa pliku: 0030 do 2Hz 1cm_s t=2.000s Y=22.124mm.dat. Pierwsze 4 cyfry oznaczają numer zdjęcia np. 30. Następnie przepisywany jest fragment oryginalnej nazwy np. do 2Hz 1cm_s. Dalej mamy: czas zdjęcia t=2.000s, położenie analizowanej pionowej linii Y=22.124mm lub poziomej X=21.228 mm. Plik zawiera (Tab. 2):

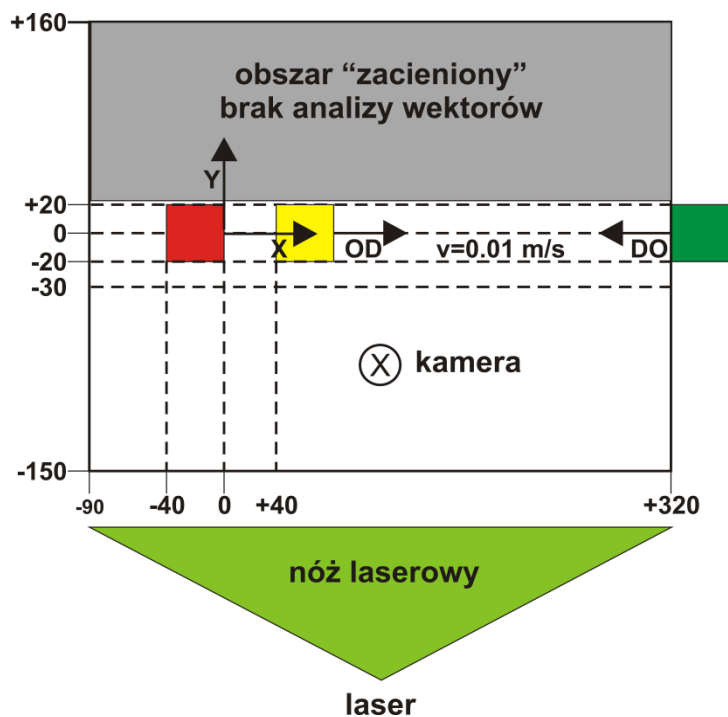
Tab. 2. Widok zawartości pliku po naciśnięciu przycisk **Dane w linii Y lub X**

X [mm]	Vx [m/s]	Vy [m/s]	IVI [m/s]	kąt [°]
0.320	-11.368	8.595	4.470	-37.091
0.640	-11.516	7.245	4.331	-32.176
.....				
3.840	-11.966	-3.514	3.876	16.366
4.160	-11.839	-5.036	4.107	23.044

Opis poszczególnych kolumn znajduje się w pierwszej linii. Jeżeli wybrany jest **Czy wszystkie składowe** to zapisywany jest również plik o nazwie Y = 1.920mm OD 20 DO 30 CO 1 N = 10.dat (Tab. 3). Nazwa



Rys. 1. Widok przekładki do analizy



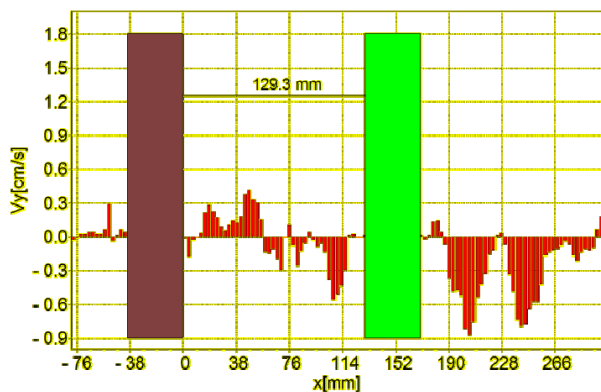
Rys. 2. Schemat eksperymentu z poruszającym się obiektem (przycisk *Dane w linii Y lub X*)

pliku zawiera: położenie analizowanej pionowej linii $Y = 1.920 \text{ mm}$ lub $X = 21.228 \text{ mm}$; od którego zdjęcia należy analizować OD 20; do którego zdjęcia należy analizować DO 30; co ile zdjęć należy analizować CO 1; ilość analizowanych zdjęć (+jedno zdjęcie) N 10 – analizowane jest 11 zdjęć. Plik ten zawiera:

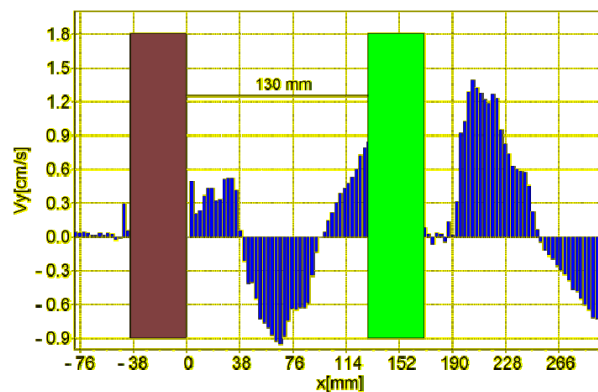
Tab. 3. Widok zawartości pliku po naciśnięciu przycisk *Dane w linii Y lub X* – wszystkie wartości

X [cm]	Vx1 [m/s]	Vy2 [m/s]	Vx2 [m/s]	Vy2[m/s]	Vx3 [m/s]	Vy3 [m/s]
0.320	59.964	39.681	-117.368	82.595	-11.368	8.595
0.640	59.413	37.547	-116.516	70.245	-11.516	7.245
.....						
4.160	59.912	24.754	-115.839	-50.036	-11.839	5.036
4.480	59.757		-116.748	-59.804	-11.748	5.804

Pierwsza kolumna X[mm] lub Y[mm]. Kolejne kolumny wartości V_x i V_y wszystkich analizowanych plików; np. Od 20 do 30; czyli $1+10*2 = 21$ kolumn.



Składowa V_y prędkości w trybie gdy brak jest przepływu pomiędzy prętami – ruch DO



Składowa V_y prędkości w trybie gdy występuje przepływ pomiędzy prętami – ruch DO

Rys. 3. Rozkład składowej V_y podczas ruchu jednego obiektu („słup o przekroju kwadratowym”)

Przykładowe wykresy wykorzystane dane od składowej V_y wzdłuż linii X położonej w pobliżu środka zdjęcia. W zależności od wzajemnej odległości pomiędzy prętami mamy dwa mody: układ zachowuje się jak jedno ciało (brak przepływu pomiędzy prętami) lub jak dwa opływane ciała (występuje przepływ pomiędzy prętami).

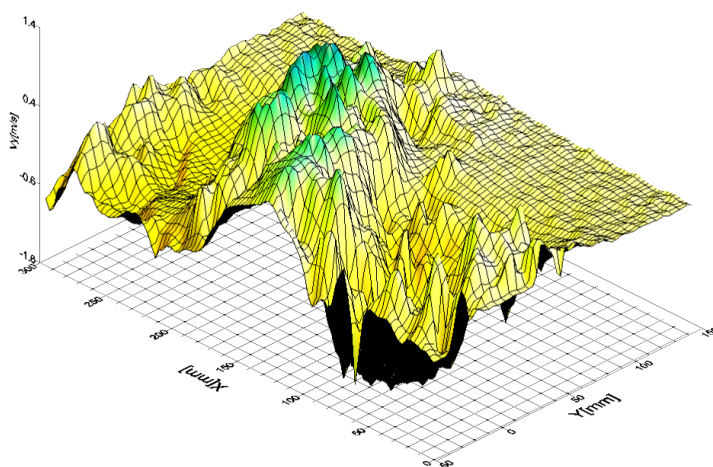
3. Trójwymiarowe obrazowanie składowej przepływu – (Surfer)

Tworzony jest automatycznie katalog „*Wyniki_s*”. Wybranie tej opcji generuje pliki, które umożliwiają wykonanie trójwymiarowych wykresów składowej wektora w funkcji X , Y . Wykresy można wykonać przy pomocy programu *SURFER* (Golden Software) lub *3D* (program wykonany w IMG). Wartości wyliczane są dla składowych, które położone są w prostokącie podanym przez dwa punkty o współrzędnych (X_p, Y_p) i (X_k, Y_k) . Współrzędne punktów podajemy w milimetrach; np. (0,300); (-50,150).

Nazwy plików 000019od_4Hz_3cm_s_4 16.60083_S.dat. Pierwsze 6 cyfr oznacza numer zdjęcia następnie opis eksperymentu (nadany przez eksperymentatora „od_4Hz_3cm_s_4”). Kolejne cyfry oznaczają czas wykonania zdjęcia np. $19 \cdot 0.06667 = 1.26673$ [sek.]. Status oznacza czy dany wektor został usunięty czy nie. W kolejnych kolumnach w plikach znajdują się:

Tab. 4. Zawartość pliku do wykonania wykresów trójwymiarowych

X [mm]	Y [mm]	Vx [m/s]	Vy [m/s]	IVI [m/s]	kąt [stopnie]	Status
52.398	-1.702	1.780	-0.328	1.810	-10.452	0.000
-52.398	1.164	1.775	-0.289	1.799	-9.248	0.000
-52.398	4.031	1.768	-0.237	1.784	-7.632	0.000
-52.398	6.897	1.756	-0.255	1.774	-8.249	0.000



Rys. 4. Przestrzenny rozkład składowej V_y prędkości

4. Wartości składowych zależne od czasu – (Od Czasu)

Wyniki obliczeń zapisywane są w katalogu „*Wyniki_c*”. Czas wykonania pobierany jest z numeru zdjęcia przemnożonego przez odstęp czasu pomiędzy zdjęciami np. $30 \cdot 0.06667 = 2.000$ sek. (trzydzieste zdjęcie czas pomiędzy zdjęciami 0.06667 sek.). Położenie ruchomego obiektu wyliczane z wzoru $X = V_{pr} \cdot dt \cdot (Nr - 1) \cdot 10 + X_0$ [mm]; gdzie poszczególne symbole opisano w tabeli 5:

Tab. 5. Znaczenie zmiennych w wyliczaniu położenia ruchomego obiektu

V_{pr}	stała prędkość obiektu [cm/s]	np.: 2 cm/sek.
dt	czas pomiędzy zdjęciami	np.: 0.06667 sek.
Nr	numer zdjęcia	np. 4
X_0	początkowe położenie obiektu	np. 30 mm

Tak więc w naszym przypadku mamy: $X = 2 * 0.06667 * (4 - 1) * 10 + 30 = 60.13$ mm. Plik wynikowy ma postać (Tab. 6):

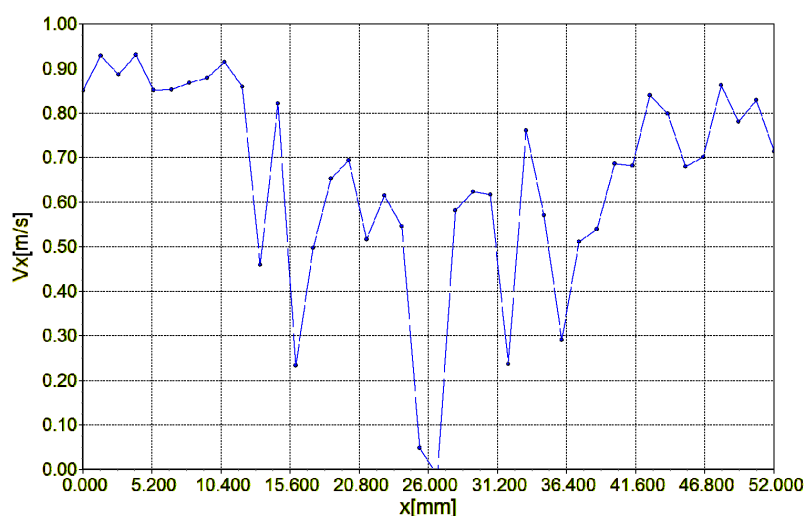
Tab. 6. zawartość pliku określającego składowe prędkości od czasu

t [s]	x [mm]	Vx [m/s]	Vy [m/s]	IVI [m/s]	kąt
0.0000000	0.0000000	0.8510148	-0.0316949	0.8516048	-2.1329191
0.0666700	1.3334000	0.9287323	0.0018510	0.9287342	0.1141931
0.1333400	2.6668000	0.8864855	-0.0235386	0.8867979	-1.5209992
0.2000100	4.0002003	0.9306470	-0.0173953	0.9308096	-1.0708243
.....					
2.4001200	48.0023994	0.8625932	0.0130958	0.8626926	0.8697913
2.4667900	49.3358002	0.7808722	-0.0243927	0.7812531	-1.7892067
2.5334601	50.6692009	0.8287013	-0.0870939	0.8332654	-5.9995804
2.6001301	52.0026016	0.7134342	-0.0988566	0.7202506	-7.8889203

Wyniki zapisywane są w pliku o nazwie np. OdZd30DoZd50_do 2Hz 1cm_s_Y = 30.72_T.dat. Kolejne elementy nazwy pliku oznaczają:

- OdZd30DoZd50 – oznacza, że analizowane są zdjęcia od 30 do 50-tego;
- część oryginalnej nazwy pliku (nadawanej przez wykonującego pomiar);
- Y = 30.72 oznacza, że dane są analizowane w poziomej linii położonej o wypisanej współrzędnej;
- jeżeli w polu „Linia” wciśnięto „X” analizowana jest pionowa linia o współrzędnej podanej w polu „Xp[mm]”.

Wtedy w nazwie pliku mamy: $-X = 21.23$. Litera T na końcu nazwy pliku oznacza jego typ (wyliczenia po wciśnięciu przycisku „Od Czasu”).



Rys. 5. Wartości składowej V_x zależne od współrzędnej X

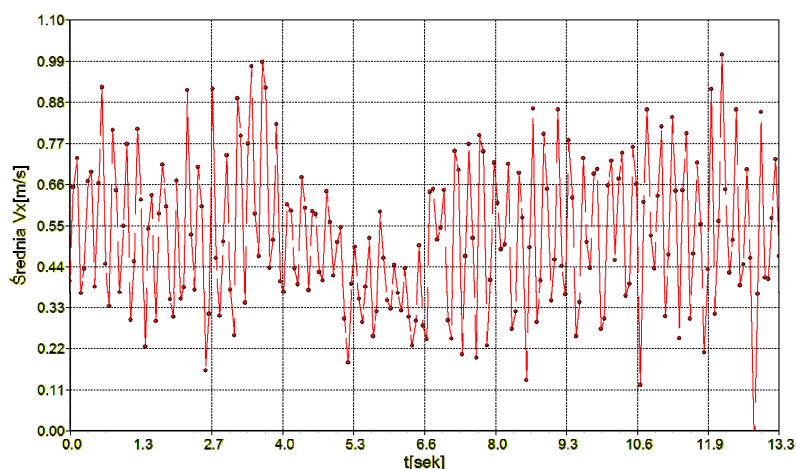
5. Obliczenia matematyczne (SUMA)

To opcja umożliwia wyliczenie: wartości średniej, odchylenia standardowego, sumy składowych wektora prędkości. Tworzony jest katalog „Wynik_xy”. Wartości „średnie” wyliczane są dla składowych, które położone są w prostokącie podanym przez dwa punkty o współrzędnych (X_p, Y_p) i (X_k, Y_k) . Współrzędne punktów podajemy w milimetrach; np. (0,20); (20,80). W katalogu tworzone są pliki: Srednia_(Xp_0_Yp_20)_(Xk_40_Yk_50)_Od_30_Do_40.dat. Kolejno oznaczono: Srednia – oznacza, że z określonego pola wyliczana jest średnia wartość; może być – Odchylenie standardowe lub Suma. Następnie wypisywany jest punkt początkowy prostokąta, z którego wyliczane są wartości „średnie” $(Xp_0_Yp_20)$ i końcowe $(Xk_40_Yk_50)$. Kolejne wartości Od_30_Do_40 oznaczają numery zdjęć od którego (30) i do którego (40) będzie dokonywana analiza „średniej” wartości w wybranym prostokącie.

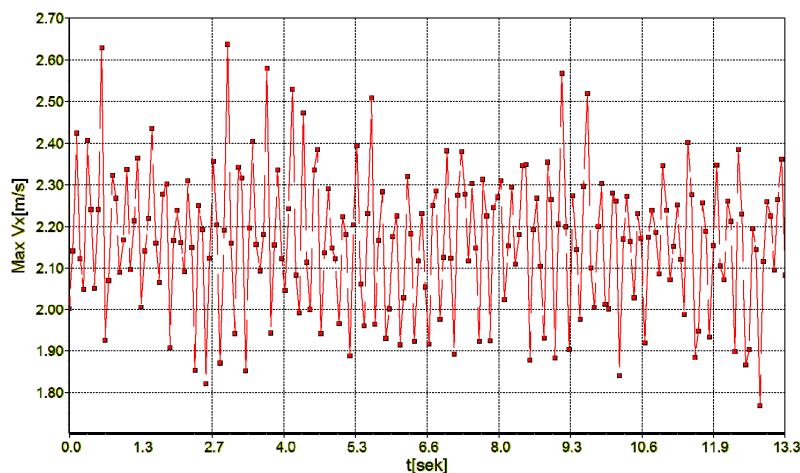
Zawartość pliku *Srednia_(Xp_0_Yp_20)_Xk_40_Yk_50)_Od_30_Do_40.dat* zawiera: położenie ruchomego obiektu, – czas wykonania zdjęcia, wartość „Średniej” wartości dla V_x , V_y , IVI , α (kąt), wartość minimalna składowej $V_x - V_{xmin}$, wartość maksymalna, V_{xmax} , wartość minimalna składowej $V_y - V_{ymin}$, wartość maksymalna V_{ymax} .

Tab. 7. Wartość „sumy” dla składowych wektora prędkości

x	t	V_x	V_y	IVI	alfa	V_{xmin}	V_{xmax}	V_{ymin}	V_{ymax}
0.000	0.00000	0.402	0.121	0.699	44.821	-0.632	2.002	-0.826	1.277
1.333	0.06667	0.653	-0.352	0.954	45.121	-0.476	2.142	-1.744	0.263
2.667	0.13334	0.730	0.160	1.136	45.012	-0.858	2.424	-0.943	1.087
4.000	0.20001	0.369	0.410	0.788	44.750	-0.875	2.123	-0.394	1.767
5.334	0.26668	0.433	-0.202	0.844	45.127	-0.993	2.049	-1.036	0.629
6.667	0.33335	0.669	-0.096	1.086	44.929	-1.209	2.406	-2.263	0.756



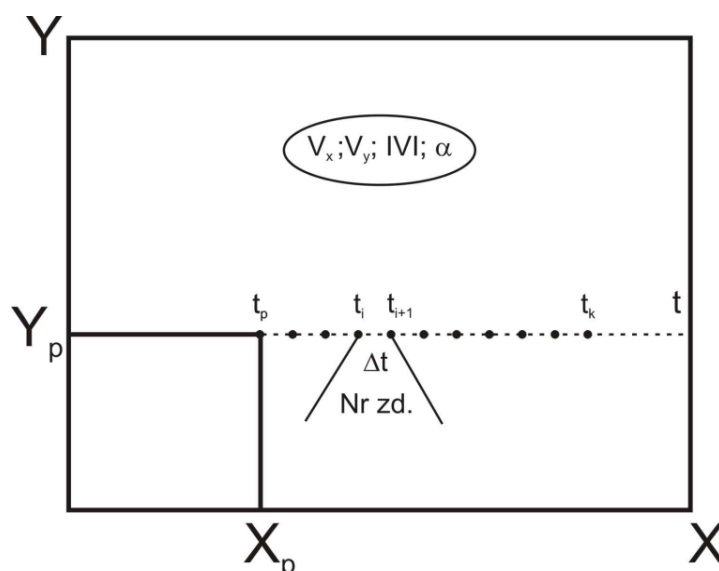
Rys. 6. Średnia wartość współrzędnej V_x zależna od czasu



Rys. 7. Maksymalna wartość współrzędnej V_x zależna od czasu

6. Poruszający się anemometr (Anemometr)

Po wyborze tego przycisku tworzony jest katalog „*Wynik_t*”. Obliczane są składowe wektora prędkości w linii poziomej rozpoczynającej się od punkt o współrzędnych w okienkach $Xp[mm]$, $Yp[mm]$ np. *20_10.dat*. Wyliczany jest czas pochodzący z numeru zdjęcia (znajduje się w nazwie pliku) i odstępu czasu pomiędzy zdjęciami podanego w oknie *Krok czasowy [sek.]*. Operacja jest podobna do wyznaczania prędkości, w czasie, poprzez poruszający się anemometr (Rys. 8).



Rys. 8. Schemat wyznaczenia składowych prędkości poprzez „poruszający się anemometr”

W pliku (Tab. 7) wypisywane są: liczba porządkowa, czas, V_x , V_y , $|V|$, kąt pomiędzy składową V_x i V_y . Utworzony plik ma nazwę związaną z położeniem punktu od którego rozpoczyna się analiza linii np. 20_10.dat.

Tab. 7. Zależność składowych wektora prędkości od czasu wykonania zdjęcia

Nr	t	Vx	Vy	V	alfa
1	0.000	1.406	0.132	1.412	5.373
2	0.067	1.382	0.140	1.389	5.779
3	0.133	1.419	0.181	1.430	7.263
4	0.200	1.386	0.212	1.402	8.710
5	0.267	1.463	0.275	1.489	10.643
6	0.333	1.393	0.093	1.396	3.829
7	0.400	1.428	0.222	1.445	8.853
8	0.467	1.370	0.109	1.374	4.550
9	0.533	1.447	0.156	1.456	6.134
10	0.600	1.384	0.110	1.389	4.523

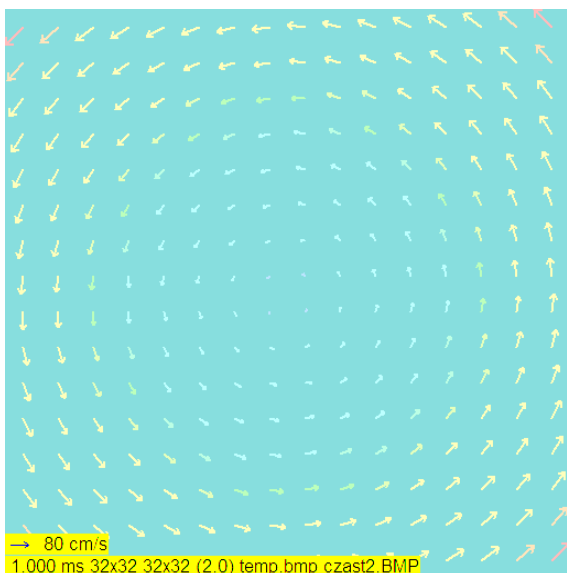
7. Rotacja – (Rot)

Tworzony jest automatycznie katalog *Wyniki_r*. Obliczana jest rotacja płaskiego pola wektorowego zgodnie ze wzorem

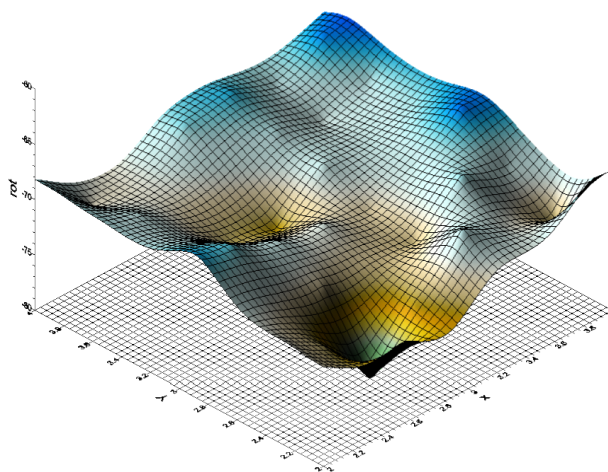
- $\frac{V_y}{\partial x} - \frac{V_x}{\partial y}$: co w sytuacji numerycznej przekłada się na wzór:

TababRot[i,j]: = ((TabVy[j,i+1]-TabVy[j,i-1]))/(2*Dx)-((TabVx[j+1,i]-TabVx[j-1,i]))/(2*Dy): Dodatkowo obliczane i zapisywane są naprężenie styczne i normalne. Wzory do obliczeń są następujące:

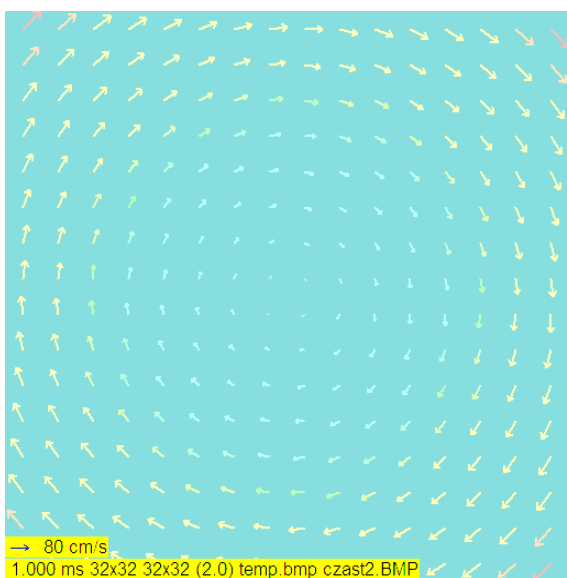
- naprężenie normalne $-\frac{V_y}{\partial x} + \frac{V_x}{\partial y}$ w sytuacji numerycznej przekłada się na wzór: siN[i,j]: = ((TabVy[j,i+1]-TabVy[j,i-1]))/(2*Dx)+((TabVx[j+1,i]-TabVx[j-1,i]))/(2*Dy)- dywergencja płaskiego wektora V .
- naprężenie styczne $-\frac{V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{\partial y}$ w sytuacji numerycznej przekłada się na wzór: siS[i,j]: = ((TabVx[j,i+1]-TabVx[j,i-1]))/(2*Dx)+((TabVy[j+1,i]-TabVy[j-1,i]))/(2*Dy).



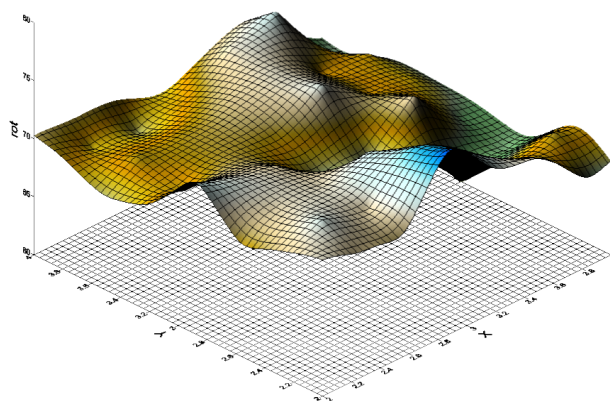
Obracający się przepływ w lewo



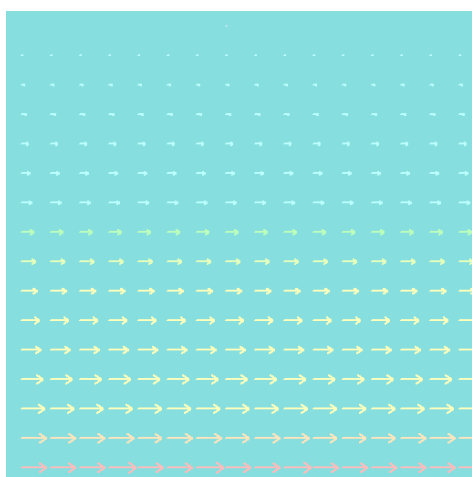
Rotacja wirującego przepływu w lewo



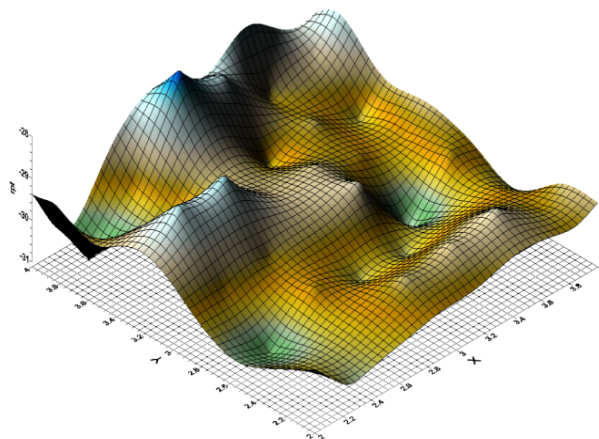
Obracający się przepływ w prawo



Rotacja wirującego przepływu w prawo



Przepływ z lewej do prawej



Rotacja przepływu z lewej do prawej

Rys. 9. Przykładowe pola wektorowe oraz wartości rotacji tych pól

W katalogu *Wyniki_r* zapisywane są pliki o nazwie 000030do 2Hz 1cm_s_5 2.00010_R.dat. Pierwsze 6 cyfr oznacza numer zdjęcia (proporcjonalny do czasu wykonania). Następne 11 znaków pochodzi z nazwy oryginalnego pliku. Kolejne znaki to czas wykonania zdjęcia. Na końcu nazwy pliku znajduje się znak R oznaczający, że liczona jest rotacja. W plikach tych zapisywane są (Tab. 9):

Na rysunku 9 przedstawiono przykładowe pola wektorowe oraz obliczone wartości rotacji

Tab. 9. Tensor gradientów dla prędkości

X	Y	Rot	siN	siS
0.320	0.320	0.000	0.001	0.001
0.640	0.320	0.000	0.000	0.000
0.960	0.320	0.000	0.000	0.000
1.280	0.320	10.324	-10.324	-10.901
1.600	0.320	96.791	-89.175	60.910
1.920	0.320	93.545	-92.643	43.690
.....				
4.480	4.800	0.185	-0.189	0.154
4.800	4.800	-0.432	0.434	0.743

8. Podsumowanie

W artykule przedstawiono program komputerowy służący do analizy danych pochodzących z pomiarów PIV. Na przykładach przedstawiono opcje programu pozwalające na analizę pól prędkości oraz obliczenia niektórych parametrów statystycznych. Szczególnie cenne są opcje pozwalające na analizę przepływu wokół obiektu poruszającego się w płynie oraz możliwość obliczenia rotacji pola wektorowego. Dzięki prostocie oraz szybkości program ten znacznie ułatwia pracę naukowcom oraz inżynierom zajmującymi się obróbką danych PIV.

Praca została wykonana w roku 2019 w ramach prac statutowych realizowanych w Instytucie Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Literatura

- Sobczyk J., Wodziak W., Gnatowska R., Stempka J., Niegodajew P., 2018: *Impact of the downstream cylinder displacement speed on the hysteresis limits in a flow around two rectangular objects in tandem – PIV study of the process*, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics **179**, 184-189.
- Gawor M., Sobczyk J., Wodziak W., Gnatowska R., 2018: *Możliwości zastosowania metody cyfrowej anemometrii obrazowej do badania opływu ruchomych obiektów w przewodzie zamkniętym*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Vol. **20**, No. 3.
- Raffel M., Willer Ch.E., Scorano F., Kahler Ch.J., Werelej S.T., Kompenhans J., 2017: *Particle Image Velocimetry*. Wyd. Springer.

Algorithms for velocity components analysis

Abstract

Algorithms used to analyze velocity of vector components are presented in the paper. Information about velocity components come from Dantec Dynamic Studio Program or program designed by the authors. All of the files from the selected catalogue are analyzed. As a result 2D velocity fields are generated from the PIV data. The authored computer program allows to analyze velocity vector components along horizontal and vertical lines. Files saved are used to draw a three dimensional velocity fields or to visualize variations of the components of velocity vectors in time. Statistical parameters such as: sum, mean, standard deviation or rotation of the velocity vector are routinely computed.

Keywords: particle image velocimetry, velocity vector components, rotation