

PROGRAMA PARA MEDICIÓN DE CAMPOS DE VELOCIDADES EN FLUIDOS UTILIZANDO VELOCIMETRÍA DE PARTÍCULAS

Daniel Hoyos, Elena Hoyos, Irene De Paul
INENCO (CONICET) - C.I.U.N.Sa.
Tel. 0387-4255424 - Fax 0387-4255489 e-mail: hoyosd@unsa.edu.ar

RESUMEN El presente trabajo tiene por objeto desarrollar un método computacional que permita analizar imágenes de fluidos en movimiento que se encuentran en prototipos de sistemas solares, para calcular el campo de velocidad y analizar la presencia de estructuras en el mismo. Se utilizará con este fin el método DPIV (digital particle image velocimetry) velocimetría de partículas utilizando el algoritmo de correlación cruzada. Se desarrolló un programa basado en Octave. La visualización se realiza a través del software VTK.

Palabras clave: energía solar, fluidos, instrumentación, computación, imágenes, velocimetría, PIV

INTRODUCCIÓN

El análisis del campo de velocidad de un fluido en movimiento es de fundamental importancia para el diseño de sistemas que funcionan con energía solar, debido a que en muchos casos la transferencia de energía la realiza el fluido. Desde hace algunos años se están desarrollando métodos que permiten medir el campo de velocidad del fluido utilizando el procesamiento digital de imágenes. De estos métodos se destaca el de velocimetría de partículas PIV (particle image velocimetry) el cual es un método efectivo, instantáneo y no intrusivo, que fue desarrollado hace mucho tiempo y perfeccionado por distintos autores [Adrian, 1998]. El método consiste en iluminar el plano que se desea medir con un haz laser, e introducir en el campo partículas de igual densidad que el fluido para que la luz se refleje sobre ellas e incida sobre la cámara formando una imagen. Se toman dos fotografías separadas entre sí por un tiempo conocido y se analizan estas imágenes, una descripción completa del procedimiento experimental se puede estudiar en [De Paul et al, 1996]. Generalmente los métodos PIV se basan en registrar las imágenes consecutivas del fluido y posteriormente analizar las mismas.

Con la aparición de la tecnología de la computadora y las cámaras CCD este método se empezó a denominar DPIV (digital particle image velocimetry) y alcanzó un gran desarrollo. Se utilizan principalmente tres métodos PIV: franjas de Young [Backer Fourney, 1977], autocorrelación [Adrian, 1989] y correlación cruzada [Utami y Blackwelder 1991, Willert y Gharib 1991]. Este último es el que utilizaremos debido a que remueve el problema de la ambigüedad del sentido de los vectores de velocidad.

Existen diversos equipos comerciales que miden los campos de velocidades de fluidos por el método PIV pero su alto costo y la peculiaridad del tipo de campo de velocidades del fluido, justifica desarrollar estos programas. En energías no convencionales habitualmente el fluido que se desea medir es el aire o el agua. La velocidad con la que se desplaza es pequeña. Por lo tanto no se necesitan cámaras que tomen imágenes a velocidades muy altas. Tampoco es indispensable disponer de altas resoluciones. Lo que permite que una cámara CCD común pueda ser utilizada en estas experiencias.

Por todo lo expuesto se seleccionó Octave que es un programa de cálculo numérico que se encuentra bajo la licencia GNU como plataforma adecuada para desarrollar este programa y se desarrollaron librerías que permiten realizar lo anteriormente mencionado.

MÉTODO DE LA CORRELACIÓN CRUZADA

El método de velocimetría de partículas consta de dos partes; la primera consiste en preparar el prototipo para poder observar el fluido y obtener las imágenes para lo cual se eligen los componentes del experimento dentro del cual es importante seleccionar las partículas en suspensión y su densidad. En la segunda parte se procesan las imágenes obtenidas.

Las imágenes obtenidas son similares a las mostradas en la figura 1 y su representación matemática es una matriz, cada uno de cuyos elementos representa la intensidad de iluminación en un pixel de la imagen. Las mismas corresponden al "PIV Standar Project" el cual es un proyecto que suministra imágenes estándares para probar los métodos PIV [Hu H. et al, 1998]. (Todas las imágenes están invertidas en color para mejorar su presentación)

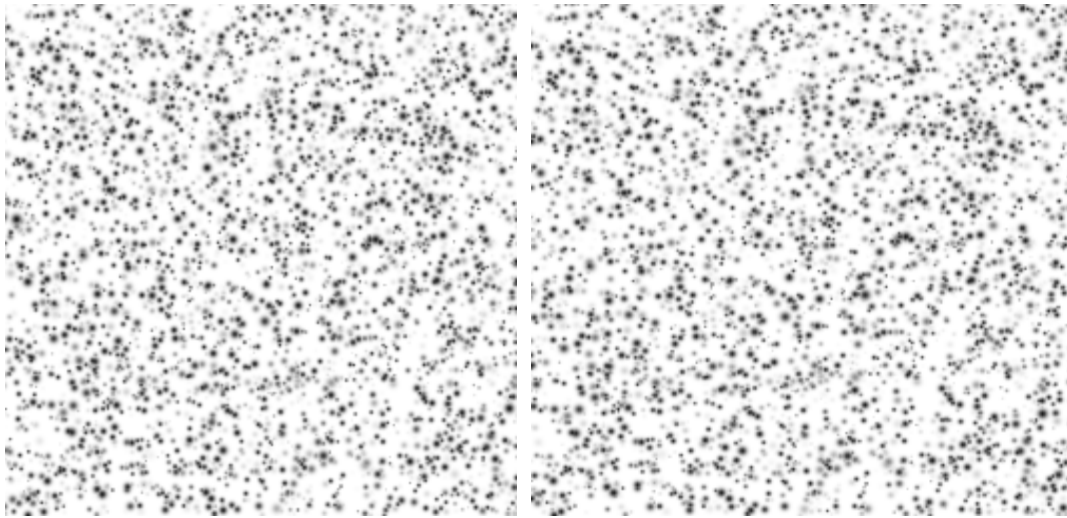


Figura 1: Imágenes de campos de velocidades en fluidos

El método de la correlación cruzada se basa en la hipótesis que dentro de una dada región, un pequeño desplazamiento del fluido se realiza sin deformarse ni rotar. Por lo tanto si realizamos la correlación entre ambas imágenes la ubicación del máximo de la misma indicará el desplazamiento del fluido respecto de la posición inicial. Con este fin se divide las imágenes en pequeñas ventanas de observación, en este caso 32x32 píxeles cada una y para las ventanas ubicadas en la misma posición se calcula la correlación entre ambas imágenes.

El método operacional para calcular la correlación cruzada consiste en: calcular la transformada de Fourier de cada una de las imágenes, obtener la conjugada de la segunda y multiplicar punto a punto ambas matrices (que contiene la información de las imágenes de las partículas en el fluido). Posteriormente se calcula la antitransformada de las matrices. La posición del máximo de esta función respecto del extremo superior izquierdo determina el desplazamiento del fluido respecto de su posición inicial la cual es el centro de la ventana de interrogación.

Análisis del algoritmo correlación cruzada

Para analizar el algoritmo se generó un programa denominado *simula_piv* que crea dos imágenes con partículas distribuidas al azar y simula un fluido en movimiento; como se observa en la figura 2. Este programa genera un patrón de partículas y las guarda en la imagen 2-a. La imagen 2-b se genera desplazando las partículas iniciales según las direcciones horizontal y vertical predeterminadas.

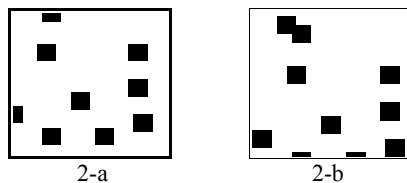


Figura 2: Imágenes del fluido con partículas en dos instantes de tiempo

La figura 3 muestra las imágenes 2-a y 2-b superpuestas para distintos desplazamientos y su correlación cruzada. En la figura 3-a la segunda imagen se encuentra desplazada con respecto a la primera una distancia de 2 píxeles en el eje horizontal y 5 en el vertical. En la imagen de la función correlación cruzada se puede observar que el máximo se encuentra en los píxeles 2 horizontal y 5 vertical (el máximo es el área mas oscura de la imagen). La ubicación del máximo representa el desplazamiento del fluido en movimiento.

Analizando el caso que el fluido se mueve en la dirección horizontal 2 píxeles pero en sentido negativo y cinco píxeles en sentido positivo figura 3-b. Se puede observar que el máximo de la correlación cruzada se encuentra en el extremo superior derecho. En la figura 3-c el fluido se mueve en la dirección horizontal 2 píxeles y vertical 5 píxeles pero en sentido negativo, se observa el máximo de correlación en el extremo inferior derecho.

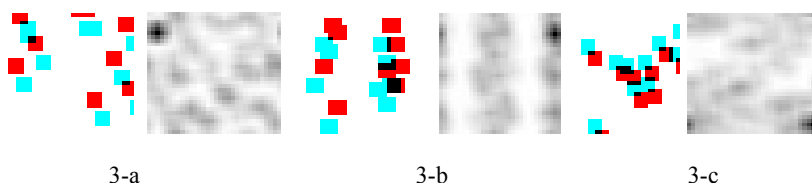


Figura 3: Superposición de las figuras 2-a y 2-b, según diferentes desplazamiento y su correlación cruzada
3-a 2 pixeles en sentido horizontal y 5 en sentido vertical **3-b** 2 pixeles en sentido horizontal negativo y 5 en sentido vertical
3-c 2 pixeles en sentido horizontal negativo y 5 en sentido vertical negativo

Podemos concluir que si el máximo de la correlación se encuentra a una distancia mayor que la mitad de la ventana, el movimiento del fluido es negativo y la expresión que define el desplazamiento entre ambos grupos de manchas tiene la forma mostrada en las siguientes expresiones.

Definiendo:

M_x =máximo en x

M_y =máximo en y

L =ancho de la ventana

$$\begin{aligned} \text{si } L/2 > M_x \text{ y } L/2 > M_y \quad \delta x &= M_x, \quad \delta y = M_y \\ \text{si } L/2 < M_x \text{ y } L/2 > M_y \quad \delta x &= M_x - L, \quad \delta y = M_y \\ \text{si } L/2 > M_x \text{ y } L/2 < M_y \quad \delta x &= L, \quad \delta y = M_y - L \\ \text{si } L/2 < M_x \text{ y } L/2 < M_y \quad \delta x &= M_x - L, \quad \delta y = M_y - L \end{aligned}$$

En la figura 4 se puede observar el resultado de aplicar el método de correlación cruzada a las imágenes de la figura 1.

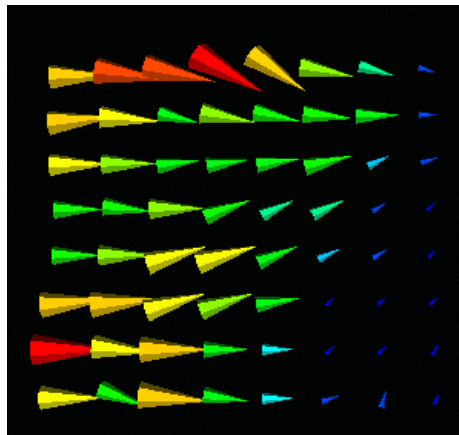


Figura 4: Campos de velocidades del fluido calculadas por el método de correlación cruzada

ANÁLISIS DE LA PRECISIÓN DEL MÉTODO

Para evaluar la precisión y exactitud del método según [Hu H. et al, 1998] se utilizan tres índices de precisión CR-U, CR-V coeficientes de correlación en las direcciones X e Y respectivamente y Err es el error de la medida.

$$CR-U = \frac{\sum_{i=1}^M (U_i - \bar{U})(U_i^* - \bar{U}^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (U_i - \bar{U})^2 \sum_{i=1}^M (U_i^* - \bar{U}^*)^2}} \quad CR-V = \frac{\sum_{i=1}^M (V_i - \bar{V})(V_i^* - \bar{V}^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (V_i - \bar{V})^2 \sum_{i=1}^M (V_i^* - \bar{V}^*)^2}}$$

$$Err_i = \frac{\sqrt{(U_i - U_i^*)^2 + (V_i - V_i^*)^2}}{\sqrt{U_i^2 + V_i^2}}$$

donde

U_i, V_i son las velocidades en x e y

U_i^*, V_i^* son las velocidades reales del campo

U, V, \bar{U}, \bar{V} con raya son los promedios

Analizando distintas imágenes [Hu. H et al,1998] encuentra que las fuentes de error del algoritmo son: el tamaño de la ventana, el número y diámetro de las partículas, la velocidad fuera del plano del fluido y el intervalo de tiempo entre dos imágenes. En una determinada experiencia se debe encontrar la configuración óptima de tamaño de ventana e intervalo de tiempo entre dos imágenes. Con este fin se diseñó una librería que calcula estos coeficiente y el programa `simula_piv` que simula la experiencia. Si se desea refinar el calculo se puede utilizar las imágenes provistas por el *PIV Standar Project*.

INTERPOLACION DE SUBPIXEL

Para mejorar la precisión del método se puede realizar una interpolación dentro del pixel. El máximo de la función correlación cruzada, que se encuentra corresponde a un valor discreto, que no es precisamente el máximo de la función. Si se interpola una función similar a la correlación con los datos discretos de ella, se puede encontrar el máximo de la función. La función de interpolación que mejor aproxima los puntos de la correlación es la función cuadrática en tres dimensiones. Se trabajó con el método de cuadrados mínimos para hacer la interpolación.

Expresión utilizada

$$z = a.x^2 + b.y^2 + c.x.y + d.x + e.y + f$$

Matriz de cálculo de los coeficientes de interpolación:

$$\begin{pmatrix} ?x_i^4 & ?x_i^2 Y_i^2 & ?x_i Y_i & ?x_i^3 & ?x_i^2 Y_i & ?x_i^2 \\ ?x_i^2 Y_i^2 & ?Y_i^4 & ?x_i Y_i^3 & ?x_i Y_i^2 & ?Y_i^3 & ?Y_i^2 \\ ?x_i^3 Y_i & ?x_i Y_i^3 & ?x_i^2 Y_i^2 & ?x_i^2 Y_i & ?x_i Y_i^2 & ?x_i Y_i \\ ?x_i^3 & ?x_i Y_i^2 & ?x_i Y_i & ?x_i^2 & ?x_i Y_i & ?x_i \\ ?x_i^2 Y_i & ?Y_i^3 & ?x_i Y_i^2 & ?x_i Y_i & ?Y_i^2 & ?Y_i \\ ?x_i^2 & ?Y_i^2 & ?x_i Y_i & ?x_i & ?Y_i & N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ?x_i^2 z_i \\ ?z_i Y_i^2 \\ ?x_i Y_i z_i \\ ?x_i z_i \\ ?z_i Y_i \\ ?z_i \end{pmatrix}$$

La rutina `c_cuad_min` se encarga de calcular los coeficientes y la rutina `cuad_min` se encarga de encontrar la ubicación del máximo de la función de interpolación que se puede calcular de la expresión:

$$\begin{aligned} 2ax + cy &= -d \\ cx + 2by &= -e \end{aligned}$$

ANÁLISIS DEL CAMPO DE VELOCIDADES EN FLUIDOS TURBULENTOS

El análisis de los campos de velocidades obtenidos al aplicar el método de velocimetría de partículas por imágenes digitales (DPIV) permite reconocer las estructuras presentes en el fluido como ser remolinos. Existen diversos métodos para analizar el campo de velocidades del fluido [Adrian et al, 1998]. Se desarrolló una librería que permite realizar el método denominado *Time based fluctuation* [Mika et al].

Se construyó una subrutina que simula campos vectoriales con zonas con turbulencia y zonas sin ella. En la figura se puede observar un campo simulado por este programa.

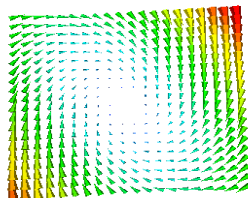


Figura 5: Campo simulado por programa vórtice y visualizada utilizando `vtk`

La información generada por el programa, que tiene el mismo formato que la información entregada por el algoritmo de la correlación cruzada, se almacena en dos matrices, la matriz `Vx` con las velocidades en el sentido de las X y `Vy` con las velocidades en el sentido de las Y.

El método *Time based fluctuation* para detectar remolinos y estructuras consiste en analizar los autovalores de la matriz gradiente de velocidades.

$$\begin{bmatrix} dVx/dx & dVx/dy \\ dVy/dx & dVy/dy \end{bmatrix}$$

Matriz gradiente

Si los autovalores, son un par de complejos conjugados entonces la vorticidad en ese lugar particular es el cuadrado de la parte imaginaria [Mika et al]. Se puede interpretar que los autovalores imaginarios detectan que existe variación de la velocidad en la dirección perpendicular al movimiento.

Descripción Operativa del Método

Para calcular la matriz gradiente de velocidades se deben derivar el campo de velocidades según las direcciones x e y. El campo de velocidades del fluido en movimiento consiste en dos matrices una que describe la velocidad según el eje x y la otra según el eje Y. De manera que el cálculo de la matriz gradiente de velocidad consiste en la derivación de estas matrices.

$$d/dx = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad d/dy = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Núcleos para calcular las derivadas parciales

Con este fin se generaron los siguientes núcleos que realizan la derivación parcial al convolucionarlos con las matrices del campo vectorial [Gonzalez et al, 1992]. Se encuentra la matriz gradiente en cada punto del campo de velocidades, operativamente son cuatro matrices de la misma dimensión del campo.

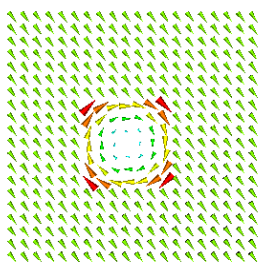


Figura 6: Campo vectorial

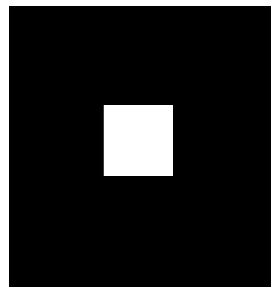


Figura 7: vorticidad

Luego se calculan los autovalores estos son números complejos, la vorticidad se calcula con el cuadrado de la parte imaginaria. Si el campo de velocidades es constante los autovalores no tienen parte imaginaria. En la figura 6 se muestra el campo simulado y en la figura 7 la vorticidad resultado de aplicar este algoritmo, se observa con blanco los valores no nulos y con negro, los ceros de la parte imaginaria de los autovalores.

PROGRAMA

Para poder realizar este estudio se generó una librería denominada *octave_pro* que permite al programa de cálculo *octave* realizar procesamiento digital de imágenes. Una imagen se observa en el *octave*, gracias a esta librería como si fueran tres matrices. Una matriz de color rojo, verde y azul. Las librerías que se agregaron a *Octave* son

Imágenes:

encargada de leer distintos tipos de archivos gráficos y grabar la información de *Octave* a distintos archivos.

Procesamientos de Punto:

Realiza distintos procesamientos de señales en los cuales se modifica el píxel independientemente de sus vecinos.

Procesamiento de Ventana:

Modifica los píxeles teniendo en cuenta sus vecinos. Por ejemplo Filtros de valor medio y derivadas

Procesamiento utilizando transformada de Fourier:

Realiza distintos filtrados utilizando transformada de Fourier.

Visualización en 3 Dimensiones:

Es una interfase entre el *Octave* y el software para visualización VTK.

Esta librería *octave_pro* permite analizar las imágenes, uniformizar el brillo y poder aplicar el método que estamos describiendo.

CONCLUSION

En este trabajo se desarrolló una librería para el programa de cálculo *Octave*, que permite procesar imágenes para medir velocidades en fluidos. Con este software se desarrolló un método de medida basado en velocimetría de imágenes digitales de partículas que permite calcular campos de velocidades en fluidos en movimiento, utilizando el algoritmo de la correlación cruzada. Se diseñaron rutinas para estimar el error del método. También se avanzó en el tratamiento de flujos turbulentos, poniendo a punto el método "Time base fluctuation" de reconocimiento de estructuras y remolinos.

REFERENCIAS

- Adrian R.J Particle -Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics Ann Rev Fluid Mech Vol 23(1991) pp 261-304
 W. Weng G. Liao W. Fan (1995). An improved cross-correlation method for (digital) particle image velocimetry.
 Hu. H, Saga. T, Kobayashi. T, Okamoto. K, Taniguchi, N(1998) Evaluation of the cross correlation Method by Using PIV standard Images
 De Paul I, Hoyos, D. Saravia L Medida de velocidad del vapor de agua en el interior de un destilador solar tipo batea Actas 19 Reunion Asades Vol2(1996) p 07.13
 Adrian, R.J. Christensen K.T. Soloff, S.M. Meinhart, C.D Liu Z.C (1998) Descomposition of turbulent field and visualization of vortices 9th symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics Portugal

Mika Piirto, Hannu Eloranta, Pentti, Saareninne Interactive software for turbulence Analysis from PIV vector Data

Gonzalez R Woods R. Digital Image Processing (1992) Addison Wesley

ABSTRACT

In this paper we made a computational method for analyze fluids using the PIV cross correlation method and analyze turbulent fluid with time based fluctuation method. This library is for Octave program and the visualization from VTK software.

Keywords: solar energy, fluids, instrumentation, image