

VELOCÍMETRO DE PARTICULAS BASADO EN IMÁGENES DIGITALES

J. D. MARTINEZ-RAMÍREZ*, F. J. GONZÁLEZ**

*INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN COMUNICACIÓN ÓPTICA
AV. KARAKORUM 1470, LOMAS 4TA, 78210, SAN LUIS POTOSI, SLP, MÉXICO
TEL. (444) 8250183, FAX.(444) 8250198.

*davidmartinez@cactus.iico.uaslp.mx,** javier@cactus.iico.uaslp.mx

Abstract

Several methods based on digital image processing have been developed in order to measure the speed of a fluid, Particle Image Velocimetry (PIV) is probably the most widely used. With the introduction and development of computers and CCD cameras this method became better known as DPIV (Digital Particle Image Velocimetry). This method relies on a sheet of light formed with a laser and a concave and cylindrical lenses used to illuminate the fluid where particles had been previously introduced. The sheet of light illuminates the particles and their reflection is captured with a CCD camera. Two pictures are then taken at two different instants and then analyzed by any of the popular DPIV analysis methods (Young's Fringes, correlation or cross-correlation) in order to obtain the speed and direction of the seed particles. In this paper a DPIV system based on the cross-correlation algorithm is built and tested in order to determine the speed and direction of bubbles in a water tank, cross correlation was selected due to the non-existent ambiguity problem regarding the direction of the speed vectors.

KEYWORD: PIV, DPIV, CORRELATION, CROSS CORRELATION.

Resumen

Desde hace algunos años se han desarrollado métodos que permiten medir el campo de velocidad de un fluido utilizando procesamiento digital de imágenes. De estos métodos destaca el de velocimetría de partículas PIV (particle image velocimetry). Con el avance de las computadoras y las cámaras CCD este método se empezó a denominar DPIV (digital particle image velocimetry). Estos métodos se basan en iluminar el plano que se desea medir con un haz láser utilizando una lente cóncava y otra cilíndrica para formar así un abanico de luz 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 CCD formando una imagen. Se toman dos fotografías separadas entre sí por un tiempo conocido y se analizan estas imágenes utilizando alguno de los siguientes métodos: franjas de Young, autocorrelación o correlación cruzada. En este trabajo se presentan los resultados de la fabricación y pruebas de un sistema de velocimetría digital utilizando el método de correlación cruzada para determinar el campo de direcciones y velocidades de un conjunto de burbujas en un tanque de agua. La correlación cruzada fue seleccionada debido a que remueve el problema de la ambigüedad del sentido de los vectores de velocidad.

1. Introducción

El análisis del campo de velocidad de un fluido en movimiento es de fundamental importancia, uno de los métodos más utilizados para medir campos de velocidad es el conocido como velocimetría de partículas PIV (particle image velocimetry) el cual es un método efectivo, instantáneo y no intrusivo. En 1984 R. J. Adrián iluminó un conjunto de partículas sembradas en un fluido utilizando un abanico de luz [1], el plano formado por la intersección del abanico de luz y las partículas individuales al ser fotografiado a altas velocidades puede utilizarse para encontrar la dirección y la velocidad de estas partículas, este método tomó el nombre de velocimetría de imagen de partículas (PIV) para distinguirlo de la velocimetría de punto láser (LSV) [2]. En la velocimetría de imagen de partículas (PIV) el movimiento del fluido es hecho visible agregando partículas pequeñas para el

trazo de líneas, si dos imágenes son obtenidas con un tiempo de separación entre ellas es posible deducir su velocidad en el campo de flujo. La base inicial para una teoría de PIV fue realizada por Adrián en 1988, en donde describe el valor esperado de la función de auto-correlación para una imagen PIV continua de doble-exposición [3]. Esta descripción proporcionó el marco para las reglas experimentales del diseño. Más adelante, la teoría fue generalizada para incluir múltiples exposiciones [4] y análisis de la correlación cruzada [5]. La teoría proporcionó una descripción adecuada para el análisis de las imágenes altamente resueltas de PIV, que era el modo de operación común para un tiempo pequeño de exposición de las imágenes. Sin embargo el PIV es utilizado hoy en día con cámaras digitales para la grabación directa de las imágenes de las partículas [6]. La teoría fue ampliada más a fondo por Westerweel para incluir imágenes digitales de PIV

y la valoración de la dislocación en el nivel de sub-píxel [7].

El término velocimetría de partículas basado en imágenes digitales (DPIV) fue adquirido por la división de mecánica de fluidos del Instituto Tecnológico de Lund en 1998. Las modificaciones al software incluyen la mayoría de las últimas técnicas descritas en la literatura reciente como por ejemplo el artículo de Westerweel y Raffel (1996) [8].

En este trabajo se abordan los aspectos fundamentales del diseño, construcción y análisis de un sistema de DPIV con el objeto de determinar los vectores de velocidad y posición de las partículas sembradas, que en este caso consisten en burbujas dentro de un tanque de agua [9,10,11].

2. Principios del DPIV

La velocimetría de partículas basado en imágenes digitales (DPIV). Se basa en la ecuación

$$velocidad = \frac{dislocación}{tiempo} \quad (1)$$

El principio general de DPIV es iluminar partículas para el trazado de líneas en el campo del flujo de interés con un abanico de luz, y adquirir dos imágenes del campo del flujo con una separación de tiempo conocida. El campo de la dislocación determina el movimiento de las partículas entre las dos imágenes, y dividiendo entre el tiempo se obtiene el campo de la velocidad. Un tamaño típico de estas áreas de interrogación es de 32 x 32 píxeles. Para las imágenes expuestas, la dislocación es determinada en nuestro caso por la correlación cruzada de las áreas de interrogación correspondientes a las primeras y segundas imágenes. La localización del pico más alto de la correlación del plano corresponde a la dislocación más probable de la partícula en el área de interrogación. La velocidad del Sub-píxel de dislocación es obtenida usando una función gaussiana al pico de la correlación, y encontrando la localización máxima exacta.

Para los líquidos generalmente el diámetro de las partículas es $d_p = 10-20 \mu m$. En flujos gaseosos las partículas tienen que ser más pequeñas para seguir el flujo debido a la densidad más baja del gas comparada al líquido. Por otra parte, debido a la mayor diferencia en índice de refracción del gas comparada al líquido una partícula en aire dispersará más luz que en un líquido, así que un tamaño de partícula más pequeña es aceptable. En flujos gaseosos el tamaño de partícula es $d_p = 1-5 \mu m$. La siguiente fórmula determina el

diámetro de la partícula en la imagen d_i [4].

$$d_i = \left(M^2 d_p^2 + d_s^2 \right)^{1/2} \quad (2)$$

donde

$$d_s = 2.44 (1 + M) f^\# I \quad (3)$$

es la anchura en función a la respuesta del punto de difracción de una lente limitada, M es la ampliación de la lente, es decir el tamaño de la imagen dividido por el tamaño del objeto. El número de apertura es $f^\#$, I es la longitud de onda y d_s es el diámetro de la imagen.

3. Proyección de la imagen

En el dominio del plano DPIV una sección transversal del flujo está iluminada con un abanico de luz, y los trazos de las partículas se proyectan sobre un medio de grabación en el plano de imagen de una lente, según lo ilustrado en la Figura 1 [12].

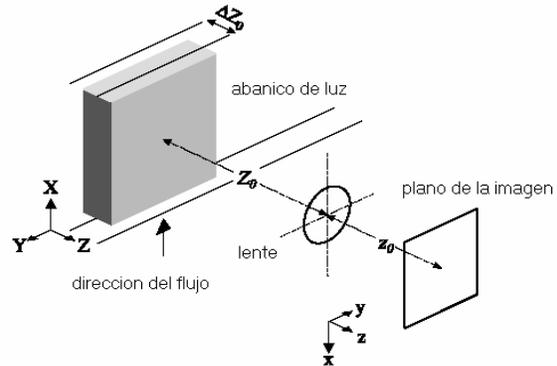


Figura 1. Representación esquemática de la disposición de la proyección de imagen en DPIV.

4. Correlación Cruzada

La correlación cruzada discreta de dos áreas de interrogación $IA_1(i, j)$ e $IA_2(i, j)$ está definida por

$$C(r, s) = \sum_{i=0}^{D_1-1} \sum_{j=0}^{D_1-1} IA_1(i, j) IA_2(i+r, j+s) \quad (4)$$

Donde

$$r, s = D_1 / 2, \dots, D_1 / 2 - 1. \quad (5)$$

Usando el teorema Wiener-Kinchin, se puede calcular la Ec. (4) utilizando transformadas de Fourier como [13][14]:

$$C(r, s) = \text{Re} \left[FFT^{-1} \left\{ FFT^*(IA_1) \cdot FFT(IA_2) \right\} \right] \quad (6)$$

Donde * denota la conjugación compleja. La ventaja de usar la Ec.(6) en vez de la Ec.(4) es que el cómputo con FFTs es más rápido que el cómputo directo. El Uso de la correlación cruzada es debido a que remueve el problema de la ambigüedad del sentido de los vectores de velocidad.

5. Arreglo experimental

Los materiales para la construcción del DPIV son los siguientes: un láser He-Ne, lente plano-cóncavo, lente cilíndrica, un tanque para el fluido, inyector de burbujas, cámara CCD SONY XC-ST50 monocromática como la parte del hardware la cual será manejada por medio de una interfase con la tarjeta NI-1407 de NATIONAL INSTRUMENTS, controlada por drivers con programas de captura y procesado los librerías de VISION del programa LABVIEW 7.1. La Figura 2 muestra la implementación del diseño del DPIV [15-22].

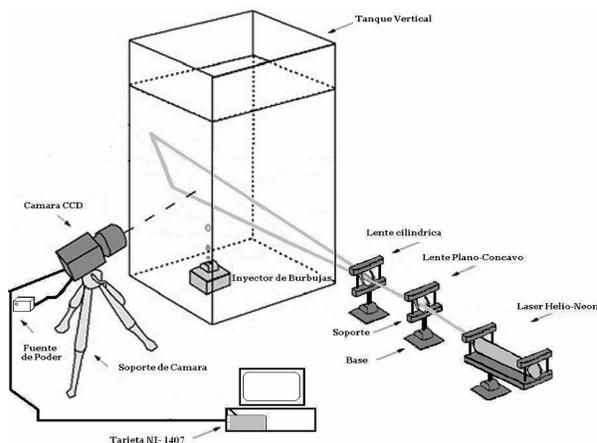


Figura 2. Diagrama físico del DPIV implementado

Para la simulación de las 2 lentes se utilizaron 2 diferentes programas de simulación de lentes OSLO y CODE V, los cuales nos proporcionaron el tipo de lentes mas adecuados que podríamos utilizar para obtener un mejor abanico de luz, además de visualizar las posibles trayectorias del haz láser al cambiar el ángulo de incidencia, entre otro tipo de datos, podemos simular el lente físico en estos 2 programas con todas sus características físicas reales [23-25]. La Figura 3 muestra la implementación realizada en OSLO y la Figura 4 muestra la Implementación realizada en CODE V.

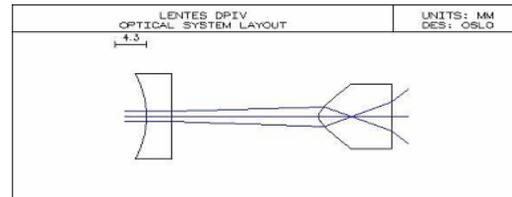


Figura 3. Simulación de las 2 lentes utilizadas en el sistema DPIV.

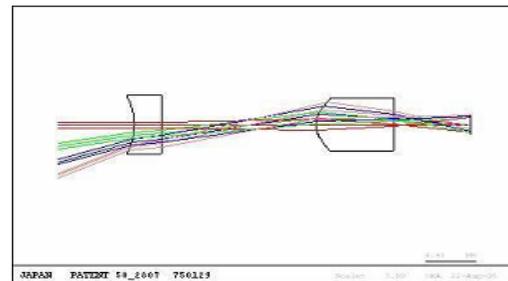


Figura 4. Representación de diferentes tipos de ángulos de incidencia sobre las lentes

6. Resultados

Además de los materiales mencionados en la sección anterior se diseñó un programa de computadora consistente en las siguientes tres partes:

- Captura de imágenes.
- Procesado de imágenes.
- Muestreo de las imágenes correlacionadas.

En la Figura 5 se muestra el sistema DPIV construido, y la Figura 6 muestra la formación del abanico de luz formado por un láser de longitud de onda de 632 nm y una potencia de 15mW.



Figura 5. Implementación física del DPIV



Figura 6. Abanico de luz láser

El tanque de agua del sistema DPIV, contiene una cortina de aire en donde se generan burbujas, las cuales al pasar a través del abanico de luz provocan una reflexión que es capturada por la cámara CCD, ver Figura 7.

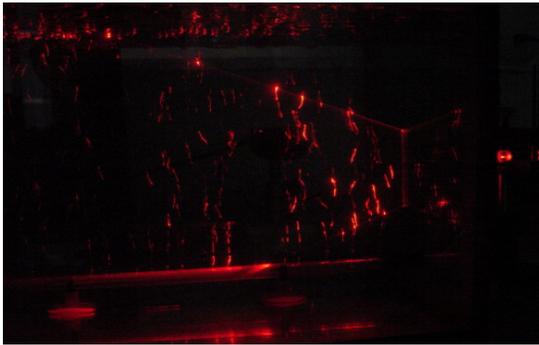
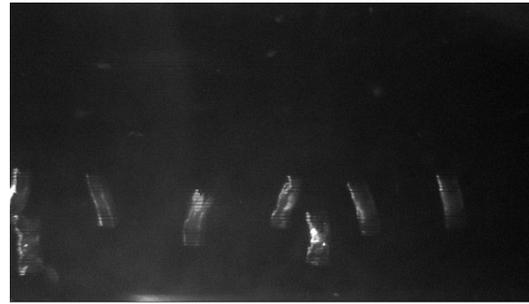
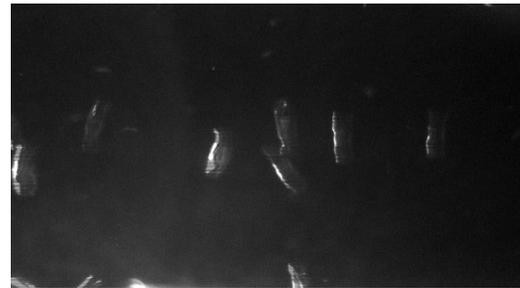


Figura 7. Los puntos rojos son las burbujas que pasan a través del abanico de luz

La cámara monocromática captura las imágenes en forma consecutiva, ver Figura 8. Para ser procesadas posteriormente en un programa en LabVIEW, el cual contiene un algoritmo de correlación cruzada, ver Figura 9.



A



B

Figura 8(A,B). Fotos digitales del movimiento de las burbujas tomadas por la cámara CCD.

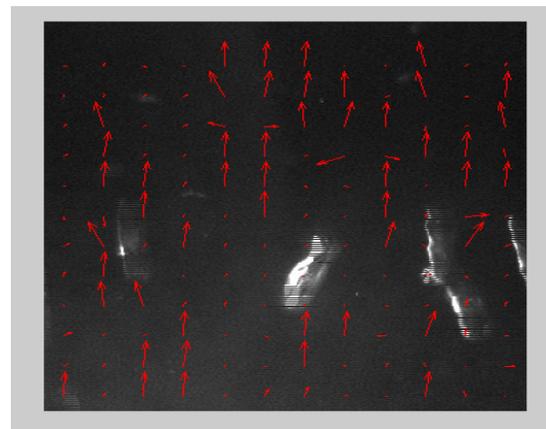


Figura 9. Imágenes correlacionadas, por medio de vectores se representa la velocidad y dirección de las burbujas

7. Conclusiones

En este trabajo se construyó exitosamente un sistema de velocimetría digital de bajo costo que utiliza el método de correlación cruzada para determinar el campo de direcciones y velocidades de un conjunto de burbujas en un tanque de agua. Se utilizaron programas comerciales de diseño óptico para el análisis de la iluminación del sistema de DPIV y se utilizó el programa Labview para realizar el análisis de las imágenes

obtenidas. Sistemas como el construido pueden ser utilizados en aplicaciones tan diversas como la oceanografía para el estudio del comportamiento de las corrientes marinas y el diseño de vehículos para disminuir el consumo de combustible entre otras aplicaciones.

8. Referencias

- [1] Adrian, R.J., "Scattering particle characteristics and their effect on pulsed laser measurements of fluid flow: speckle velocimetry vs. particle image velocimetry", *Appl. Optics* 23, 1984, pp. 1690-91.
- [2] Pickering, C.J.D. & Halliwell, N.A., "Speckle photography in fluid flows: signal recovery with two-step processing", *Appl. Optics* 23, 1984, pp.1128-1129.
- [3] Adrian R J, "Statistical properties of particle image velocimetry measurements in turbulent flow", *Selected Papers 3rd Int. Symp. on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics ed T Asanuma et al (Lisbon: Ladoon)*, 1988, pp 115-290
- [4] Adrian R.J., "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics", *Annu Rev. Fluid Mech.* 23, 1991,pp 261-304.
- [5] Keane, R.D., and Adrian, R.J., "Theory of cross-correlation analysis of PIV images", *Appl. Sci. Res.* 49,1992, pp191-215.
- [6] Willert, C.E. & Gharib, M. "Digital particle image velocimetry." *Exp. Fluids* 10, 1991 ,pp181-193.
- [7] Westerweel J., "Digital Particle Image Velocimetry Theory and Application" (Delft: Delft University Press) ,1993 *Optical diagnostics in fluid and thermal flow* SPIE 2005 624-35
- [8] Raffel M, Westerweel J, Willert C, Gharib M and Kompenhans J , "Analytical and experimental investigations of dual-plane particle image velocimetry", *Opt. Eng.* 35 ,1996,2067-2074
- [9] D. Hoyos, I. De Paul. , "Programa de captura de imágenes, procesamiento y cálculo para medición de velocidades en líquidos." *Actas de la 17a. Reunión de ASADES*, Tomo II ,1994, pp 683-688.
- [10] Pramod K. Rastogi , *Optical Measurement Techniques and Applications*(London-boston :Artech House Publishers),1997.
- [11] Westerweel, J., "Fundamentals of digital particle image velocimetry", *Meas. Sci. Technol.* 8,1997,pp 1379-1392
- [12] Keane R D and Adrian R J , "Optimization of particle image velocimeters. II. Multiple pulsed systems" *Meas. Sci. Technol.* 2,1991,pp 963-974
- [13] Raffel, M., Willert, C., and Kompenhans, J., , *Particle Image Velocimetry - a practica lguide*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg,1998.
- [14] Westerweel, J., Dabiri, D., and Gharib, M., "The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital PIV recordings", *Exp. in Fluids* 23, 1997,pp. 20-28.
- [15] SONY, "CCD B/W VIDEO CAMERA MODULE XC-ST50/50CE", USER'S GUIDE, 1999.
- [16] National Instruments, "IMAQ PCI/PXI-1407 User Manual", 1999.
- [17] National Instruments,"DIGITAL IMAGE PROCESSING",2003.
- [18] National Instruments, "IMAQ Vision Concepts Manual", 2000.
- [19] National Instruments, "NI-IMAQ User Manual", 2000.
- [20] National Instruments. "NI-IMAQ Function Reference Manual", 2000.
- [21] National Instruments. "IMAQ Vision for LabVIEW User Manual", 2000.
- [22] National Instruments, "IMAQ Vision Builder Tutorial", 2000.
- [23] Eugene Hecht and Alfred Zajac , *Optics* (New York : McGraw-Hill),1999.
- [24] LAMBDA RESEARCH CORPORATION, " OSLO OPTICS REFERENCE ",2001.
- [25] OPTICAL RESEARH ASSOCIATES," CODE V INTRODUCTORY USER'S GUIDE",2003.