

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ

Δημήτριος Ε. Λιαροκάπης και Γρηγόριος Γ. Γρηγορόπουλος

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Εργαστήριο Ναυτικής & Θαλάσσιας Υδροδυναμικής
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Ζωγράφου, Αθήνα
dliaro@central.ntua.gr

Περίληψη

Η αποτύπωση του πεδίου ροής γύρω από κινούμενα σώματα αποτελεί μια πολύπλοκη πειραματική διαδικασία στη μηχανική των ρευστών. Η ακρίβεια με την οποία προσδιορίζεται το πεδίο ταχυτήτων παίζει σημαντικό ρόλο στη σχεδιάσή τους και στην ανάπτυξη νέων αριθμητικών μοντέλων, όπως επίσης και στον προσδιορισμό των οριακών συνθηκών. Στις μέρες μας, η ευρύτερα διαδεδομένη μέθοδος μετρήσεως πεδίου ροής είναι η μέτρηση ταχυτήτων ρευστού μέσω ψηφιακής ανάλυσης εικόνων, γνωστή ως Particle Image Velocimetry (PIV).

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η λεπτομερής παρουσίαση τεχνικών για την επέκταση των δυνατοτήτων ενός υπάρχοντος συστήματος PIV που χρησιμοποιείται στο Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής (ΕΝΘΥ) του ΕΜΠ. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε ένα σύστημα με οπτικά μέσα που μεταφέρουν το ίδιο οπτικό πεδίο σε δύο κάμερες. Οι κάμερες αυτές, μέσω μιας ηλεκτρονικής ιδιοκατασκευής που εισάγει οποιαδήποτε επιθυμητή χρονική υστέρηση μεταξύ τους, επιτρέπουν τη λήψη διαδοχικών πεδίων με πολύ μικρή χρονική διαφορά. Έτσι επιτυγχάνεται αποτέλεσμα ισοδύναμο με μια κάμερα πολύ υψηλής ταχύτητας, με πολύ περιορισμένο κόστος. Επίσης, αναπτύχθηκε λογισμικό οδήγησης των καμερών το οποίο έχει τη δυνατότητα να διαχειρίζεται έως τέσσερις κάμερες ταυτόχρονα. Τόσον η μεθοδολογία όσον και συγκριτικά αποτελέσματα για την αξιολόγηση των δύο συστημάτων παρουσιάζονται λεπτομερώς.

Λέξεις-κλειδιά: PIV, Κάμερα Υψηλής Ταχύτητας, Μετρήσεις Ροών

Abstract

The recording of the flow field around a moving body requires a complicated experimental procedure in fluid mechanics. The accuracy from the experimental measurements reflects on the design and the development of new analytical models that can predict the boundary conditions. Particle Induced Velocimetry (PIV) measurements, is nowadays a powerful tool for studying the flow field around ship models in the towing tank.

The main objective of this paper is to demonstrate techniques for expanding the capabilities of an existing 2D PIV system used in the Laboratory of Ship and Marine Hydrodynamics at NTUA. More specifically, an optical configuration was devised to translate the same flow field into two CCD cameras. By controlling the synchronization pulse via an electronic device, the two cameras capture the same field with an adjustable

Δημήτριος Ε. Λιαροκάπης, Γρηγόριος Γ. Γρηγορόπουλος, ΕΜΠ
Τεχνικές για την Επέκταση Δυνατοτήτων Συστήματος Καταγραφής Πεδίου Ροής

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

time difference (delay). This is a cheap and efficient way to transform low speed CCD cameras to a high speed camera. Furthermore, software to control and synchronize up to four cameras simultaneously was developed. The methodology used as well as comparative results for the evaluation of the two systems are presented in detail and discussed.

Key-Words: PIV, High Speed Cameras, Flow Measurements

1. Εισαγωγή

Ένα από σημαντικά προβλήματα στην επιστήμη του μηχανικού, είναι οι μετρήσεις των ταχυτήτων κινούμενων ρευστών που διαμορφώνουν ένα συγκεκριμένο πεδίο ροής. Οι μετρήσεις αυτές δίνουν πληροφορίες για τη δυναμική συμπεριφορά των ρευστών κατά την κίνηση τους, πληροφορίες που είναι απαραίτητες για περαιτέρω μελέτες και εφαρμογές καθώς επίσης και ως μέσο επιβεβαίωσης της ακρίβειας αριθμητικών μεθόδων. Είναι επομένως αναμενόμενο, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις αυτές να παρουσιάζουν ιδιαίτερο τεχνολογικό ενδιαφέρον και να υπάρχει η ανάγκη για συνεχή βελτίωση και εξέλιξη. Η ανάγκη αυτή μάλιστα είναι σήμερα πιο επιτακτική εξαιτίας των μεγάλων και συνεχών αλμάτων της τεχνολογίας που οδηγούν σε εφαρμογές στις οποίες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν κλασικές μέθοδοι μέτρησης ταχυτήτων. Συγκεκριμένα, σε περιοχές γύρω από τη γάστρα των πρότυπων πλοίων, όπου η ροή αλληλεπιδρά με την επιφάνεια της γάστρας, όπως και σε περιπτώσεις τύρβης στον ομόρου του πλοίου, το ενδιαφέρον είναι ακόμα πιο έντονο.

2. Ιστορική Αναδρομή

Οι πρώτες μέθοδοι μέτρησης του πεδίου ροής, έγιναν με τη χρήση διαφόρων σωλήνων όπως για παράδειγμα ο σωλήνας Pitot ή ο σωλήνας Prandtl, οι οποίοι μετρούν διαφορά πίεσης και έτσι εκτιμούν την ταχύτητα του ρευστού με βάση την εξίσωση Bernoulli [Zilliac (1993)]. Σήμερα, οι πιο εξελιγμένοι σωλήνες με 5 ή 7 οπές δύνανται να υπολογίσουν και το διάνυσμα της ταχύτητας με την κατάλληλη διαδικασία βαθμονόμησης διαφέροντας κυρίως στο εύρος της γωνίας. Τα παραπάνω όργανα θεωρούνται ακριβείας και χαμηλού κόστους αλλά είναι παρεισφρητικά και μπορούν να μετρήσουν μόνο στο σημείο που τοποθετούνται.

Αργότερα εμφανίστηκαν τα ανεμόμετρα θερμού νήματος (Hot Wire Anemometry) και θερμού φιλμ (Hot Film Anemometers) τα οποία μετρούν την πτώση θερμοκρασίας σε μια θερμαινόμενη αντίσταση που περιρρέεται από το ρευστό και έτσι εκτιμούν την ταχύτητά του. Και οι δύο παραπάνω μέθοδοι είναι απλές στη λειτουργία και συγκριτικά με άλλες μεθόδους οικονομικές, όμως επηρεάζουν την ροή αφού τα όργανα μέτρησης παρεμβάλλονται σε αυτή. Επίσης, ένα ακόμα μειονέκτημα είναι ότι δεν μπορούν να προβλέψουν τη διεύθυνση του διανύσματος της ταχύτητας.

Η μέθοδος Laser Doppler Velocimetry (L.D.V.) ως μη παρεμβατική έδωσε λύση στο πρόβλημα και κάλυψε ένα μεγάλο πεδίο εφαρμογών, είναι όμως υπερβολικά ακριβή τόσο στη εφαρμογή όσον και στην απόκτηση των οργάνων και στη χρήση τους. Παρά την εξέλιξη οι παραπάνω τεχνικές είναι τεχνικές ενός σημείου, δίνουν δηλαδή μέτρηση για

Δημήτριος Ε. Λιαροκάπης, Γρηγόριος Γ. Γρηγορόπουλος, ΕΜΠ
Τεχνικές για την Επέκταση Δυνατοτήτων Συστήματος Καταγραφής Πεδίου Ροής

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

ένα μόνο σημείο του πεδίου ροής, το σημείο που είναι τοποθετημένο το όργανο ή από το οποίο περνάει η ακτίνα Laser.

2.1. Μέθοδος PIV

Η μέθοδος Particle Image Velocimetry, PIV (μέτρηση ταχυτήτων ρευστού μέσω ψηφιακής εικόνας) είναι μια σχετικά καινούργια μέθοδος η οποία έρχεται να δώσει λύση με αρκετά καλές προοπτικές στην παραπάνω ανάγκη καθώς είναι ικανή να παρέχει δεδομένα για τα σημεία στο επίπεδο μέτρησης, χωρίς να επηρεάζει την ροή. Η εφαρμογή της μεθόδου PIV άρχισε στη δεκαετία του 80 αλλά βρήκε μεγάλη απήχηση στην επιστημονική κοινότητα στη δεκαετία του 90, ιδίως με τη βελτίωση και τη μείωση του κόστους των μέσων καταγραφής και μεταφοράς εικόνας.

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη στατιστική ανάλυση της μετατόπισης σωματιδίων που ευρίσκονται στο πεδίο ροής. Συγκεκριμένα εάν μια ομάδα σωματιδίων μετατοπιστεί κατά μια κατεύθυνση εντός ενός χρονικού διαστήματος, η μετατόπιση αυτή μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τις δύο εικόνες που αντιστοιχούν στην αρχή και στο τέλος του διαστήματος αυτού. Υπολογίζοντας τη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης των συναρτήσεων φωτεινότητας των δύο εικόνων, η θέση του μεγίστου της συνάρτησης αποτελεί τη μέση στατιστικώς μετατόπιση. Διαιρώντας τη μετατόπιση με το χρονικό διάστημα, υπολογίζεται η μέση ταχύτητα των σωματιδίων.

Επειδή η μάζα των σωματιδίων που χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό θεωρείται αμελητέα μπορούμε να κατατάξουμε τη συγκεκριμένη μέθοδο στις μη παρεμβατικές μεθόδους. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η ταυτόχρονη καταγραφή ενός πεδίου ροής. Αρχικά οι εφαρμογές αφορούσαν διδιάστατα πεδία αν και τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί τρισδιάστατα [Fabry (1998)], [Liu, Adrian, Meinhart and Lai (1996)], [Prasad and Adrian R.J (1993)] συστήματα καταγραφής με ικανοποιητική ακρίβεια. Ανάμεσα στα τελευταία βρίσκεται το stereoscopic PIV, το holographic PIV και το dual-plane PIV. Αν και τα βασικά συστήματα PIV είναι σχετικά μικρού κόστους, η προσαρμογή τους στο εργαστηριακό περιβάλλον είναι χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους.

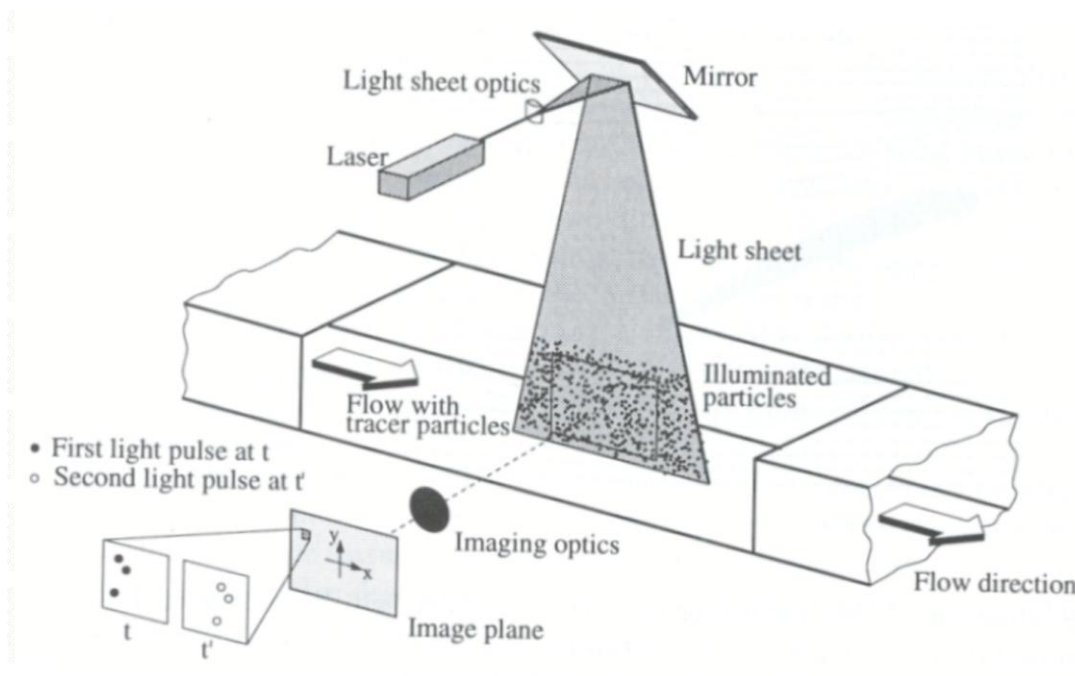
Βασικός παράγοντας στον εξοπλισμό ενός συστήματος PIV είναι η συχνότητα δειγματοληψίας της κάμερας. Η παραπάνω συχνότητα προδιορίζει και τη μέγιστη θεωρητικά μετρούμενη ταχύτητα του ρευστού. Στην εργασία αυτή, αναλύουμε τον τρόπο με τον οποίο μπορούμε να αυξήσουμε την συχνότητα δειγματοληψίας μιας τυπικής CCD κάμερας για μετρήσεις διδιαστάτων πεδίων ροής.

3. Βασικές αρχές της προτεινόμενης μεθοδολογίας

Η μέθοδος PIV βασίζεται στην οπτικοποίηση της ροής. Πιο αναλυτικά, κατά την συγκεκριμένη μεθοδολογία σωματίδια πολύ μικρής διαμέτρου (πχ. 10 μm) εισάγονται στο νερό και ακολουθούν την κίνηση του δίνοντας έτσι μια οπτική απεικόνιση της ροής. Το πεδίο ροής που εξετάζεται φωτίζεται από ένα φύλλο φωτός το οποίο δημιουργείται από μια κατάλληλη φωτεινή πηγή (Laser). Κάθετα στο φύλλο φωτός τοποθετείται η συσκευή (φωτογραφική κάμερα) με την οποία καταγράφονται οι εικόνες της ροής. Στη συνέχεια,

Δημήτριος Ε. Λιαροκάπης, Γρηγόριος Γ. Γρηγορόπουλος, ΕΜΠ
Τεχνικές για την Επέκταση Δυνατοτήτων Συστήματος Καταγραφής Πεδίου Ροής

με κατάλληλη επεξεργασία των εικόνων, υπολογίζονται οι μετατοπίσεις των σωματιδίων, και εφόσον γνωρίζουμε το χρόνο των μετατοπίσεων καθορίζεται η ταχύτητα του ρευστού. Διαφορές μεταξύ των συστημάτων PIV, διακρίνονται στην θέση του φύλλου φωτός, στα χαρακτηριστικά του laser όπως και στην ανάλυση των εικόνων [Adrian (1990)], [Bjorkquist and Fingerson (1992)], [Raffel, Willert and Kompenhans (1998)]. Στο σχήμα 1, παρουσιάζεται η βασική αρχή της μεθόδου.



Σχήμα 1: Βασική αρχή της μεθόδου μέτρησης ταχυτήτων ρευστού μέσω ψηφιακής ανάλυσης εικόνας

Η μεθοδολογία μπορεί να χωριστεί σε τρεις επιμέρους δραστηριότητες με την ίδια συνεισφορά στην επιτυχή υλοποίησή της. Την οπτικοποίηση της ροής, τη λήψη των εικόνων και την επεξεργασία των εικόνων.

Η οπτικοποίηση της ροής συνίσταται από δύο παράγοντες, μια κατάλληλη πηγή φωτός και κατάλληλα σωματίδια τα οποία εισαγόμενα στο ρευστό ακολουθούν τη ροή και διαχέοντας το φως της πηγής δίνουν οπτική απεικόνιση της ροής. Ο μηχανισμός τροφοδοσίας σωματιδίων σχεδιάστηκε έτσι ώστε επαρκής αριθμός σωματιδίων να κατανέμεται ομοιόμορφα στις μετρούμενες περιοχές χωρίς να επηρεάζει τη ροή.

Τα σωματίδια που θα εισαχθούν στο ρευστό πρέπει να καλύπτουν τρεις βασικές προϋποθέσεις. Αρχικά πρέπει το μέγεθος τους να είναι αρκετά μικρό ώστε να ακολουθούν πιστά τη ροή σαν να είναι μόρια του ρευστού και ταυτόχρονα το μέγεθος πρέπει να είναι ικανοποιητικό ώστε η ανάκλαση του φωτός που δημιουργούν να είναι αρκετά ισχυρή για να μπορεί να επηρεάσει τα φωτοευαίσθητα στοιχεία της κάμερας [Raffel, Willert and Kompenhans (1998)]. Σύμφωνα με το φαινόμενο Rayleigh scattering, το σκεδαζόμενο φως είναι ανάλογο με το τετράγωνο της διαμέτρου του σωματιδίου.

Δημήτριος Ε. Λιαροκάπης, Γρηγόριος Γ. Γρηγορόπουλος, ΕΜΠ
Τεχνικές για την Επέκταση Δυνατοτήτων Συστήματος Καταγραφής Πεδίου Ροής

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

Επιπλέον, η πυκνότητα των σωματιδίων πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην εμφανίζονται φαινόμενα άνωσης ή σημαντικής συγκέντρωσης και επηρεάζουν έτσι αρνητικά τη ροή. Για το λόγο αυτό επιλέγεται συνήθως πυκνότητα σωματιδίων κοντά σε αυτή του ρευστού. Ανάλογα με το ρευστό και το είδος της ροής (ταχύτητα, τύρβη, πολυπλοκότητα) επιλέγεται το είδος και το μέγεθος των σωματιδίων που θα χρησιμοποιηθούν. Για μετρήσεις σε νερό, συνήθως χρησιμοποιούνται γυάλινα σφαιρίδια, σωματίδια αλουμινίου ή πολυστυρενίου με τυπική διάμετρο από 10 με 100 μικρόμετρα.

Σχετικά με το φωτισμό του πεδίου ροής, χρησιμοποιείται πηγή laser η οποία έχει αποδειχθεί ότι είναι η πιο αποτελεσματική. Η στενή και έντονη δέσμη φωτός που παράγει το laser είναι ιδανική για φωτιστεί ικανοποιητικά το πεδίο ενδιαφέροντος. Γενικά, όσο αυξάνει η ταχύτητα του ρευστού απαιτείται δέσμη υψηλότερης έντασης, γιατί τα σωματίδια εκτίθενται μικρότερο χρονικό διάστημα στο φως της πηγής με αποτέλεσμα η σκεδαζόμενη ενέργεια να είναι μικρότερη και να δυσκολεύεται το έργο της καταγραφής.

Η λήψη των εικόνων μπορεί να γίνει με δύο μεθόδους: τη φωτογραφική μέθοδο και τη μέθοδο με βίντεο. Σύμφωνα με την πρώτη μέθοδο η λήψη των εικόνων γίνεται με φωτογραφική μηχανή, η οποία τοποθετείται κάθετα στο εξεταζόμενο πεδίο ροής. Το laser που χρησιμοποιείται σε αυτές της περιπτώσεις πρέπει να είναι παλμικό και το διάφραγμα της μηχανής μένει ανοιχτό για δύο παλμούς. Για να εκτιμηθούν βέβαια τα αποτελέσματα και οι ρυθμίσεις θα πρέπει να εμφανιστεί το φιλμ, που είναι χρονοβόρα διαδικασία και αποτελεί βασικό μειονέκτημα της μεθόδου.

Με τη μέθοδο βίντεο, η λήψη εικόνων γίνεται με κοινή βιντεοκάμερα ή με CCD κάμερες. Οι τελευταίες αποτελούνται από συστοιχίες πυκνωτών όπου ο καθένας αντιστοιχεί σε ένα pixel της εικόνας και έχουν τη δυνατότητα σύνδεσης με Η/Υ μέσω ειδικών καρτών. Με τη μέθοδο αυτή οι εικόνες μεταφέρονται απευθείας στον Η/Υ όπου ψηφιοποιούνται και αποθηκεύονται. Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι έχουμε απευθείας την εικόνα της ροής και έτσι οι οποίες ρυθμίσεις μπορούν να γίνουν σε πολύ λίγο χρόνο. Επιπλέον, η άμεση καταγραφή των εικόνων στον Η/Υ επιτρέπει την επεξεργασία τους και τη γρήγορη παραγωγή αποτελεσμάτων.

Η επεξεργασία των εικόνων έχει σαν σκοπό την εύρεση των διανυσμάτων της ταχύτητας του ρευστού. Σε κάθε εικόνα απεικονίζεται το πεδίο ροής, είτε σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή είτε σε δύο διαφορετικές που απέχουν χρονικό διάστημα Δt . Η κάθε εικόνα χωρίζεται σε μικρότερες περιοχές, το μέγεθος των οποίων καθορίζεται από το είδος της ροής και τη συγκέντρωση των σωματιδίων. Βρίσκοντας τη μετατόπιση Δs των σωματιδίων για την κάθε περιοχή και γνωρίζοντας και το χρονικό διάστημα Δt , μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα από τη σχέση $U = \Delta s / \Delta t$.

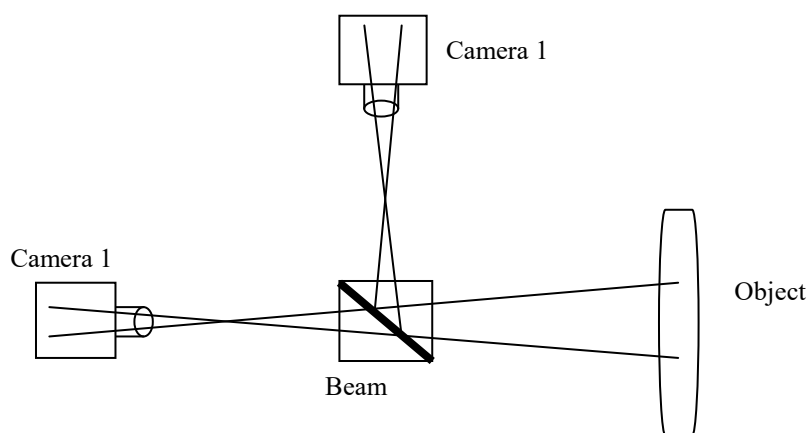
4. Εφαρμογές στην πειραματική δεξαμενή

Οι ταχύτητες μέτρησης προτύπων πλοίων που αντιστοιχούν στην ταχύτητα υπηρεσίας σύγχρονων πλοίων είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από τις ικανότητες ενός βασικού συστήματος PIV. Από τα αποτελέσματα που πήραμε από την ανάλυση των δεδομένων είδαμε ότι οι δυνατότητες του συστήματος δεν ήταν ικανοποιητικές για τις ταχύτητες που συνήθως συναντάμε στην πειραματική δεξαμενή προτύπων ($1 \div 5$ m/s). Η συχνότητα

Δημήτριος Ε. Λιαροκάπης, Γρηγόριος Γ. Γρηγορόπουλος, ΕΜΠ
Τεχνικές για την Επέκταση Δυνατοτήτων Συστήματος Καταγραφής Πεδίου Ροής

δειγματοληψίας της υπάρχουσας CCD κάμερας (60 frames/sec) μπορεί να καταγράψει ροές της τάξεως του 0.2 m/s. Για να αυξήσουμε το πλήθος των εφαρμογών και την ολική ταχύτητα του συστήματος σχεδιάσαμε και κατασκευάσαμε ένα δεύτερο σύστημα το οποίο αυξάνει θεαματικά τη συχνότητα δειγματοληψίας των καμερών χωρίς να θυσιάζουμε τη συνολική ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η προτεινόμενη τεχνική επιτρέπει μετρήσεις γρήγορων ροών χρησιμοποιώντας τυπικές (standard) κάμερες χαμηλού κόστους.

Η βασική ιδέα είναι να χρησιμοποιήσουμε δύο κάμερες οι οποίες θα στοχεύουν στο ίδιο πεδίο ροής μέσω ενός διαιρέτη δέσμης [Desaubry and Gervais (2000)], [Desaubry and Gervais (2000)], [Jensen, Sveen, Grue, Richon and Gray (2001)] (Σχήμα 2). Δίνοντας παλμό λήψης στις κάμερες μέσω ενός delay παίρνουμε 60 ζεύγη εικόνων το δευτερόλεπτο. Ρυθμίζοντας το delay μεταξύ των δύο καμερών ανάλογα με την ταχύτητα της ροής θα μπορούμε να μετράμε ταχύτητες ροής πάνω από 1 m/s.



Σχήμα. 2 – Η σχηματική διάταξη του συστήματος διαιρέτη ακτίνας

5. Εισαγωγή του συστήματος PIV στη πειραματική δεξαμενή

Η διάταξη του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε από το Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής (ΕΝΘΥ) του ΕΜΠ αποτελείται από τα παρακάτω:

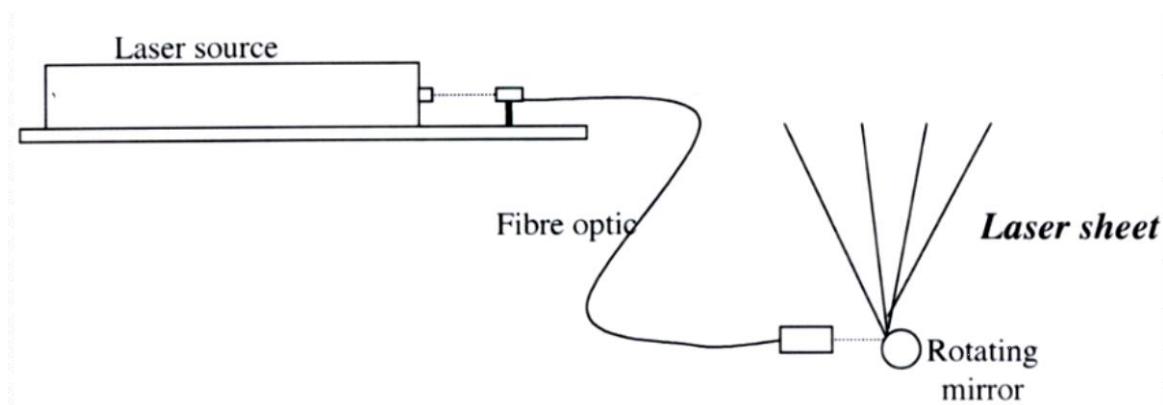
1. Πηγή φωτός (laser)
2. Κατάλληλα οπτικά για τη μετατροπή της ακτίνας του laser σε φύλλο φωτός
3. Δύο κάμερες CCD
4. Διάταξη διαιρέτη δέσμης
5. Αδιάβροχο κουτί τοποθέτησης των καμερών και του πλαισίου στήριξης
6. Σωματίδια
7. Συσκευή καθυστέρησης παλμών συγχρονισμού
8. Λογισμικό για την ανάλυση

Το πειραματικό σύστημα PIV συνίσταται από μια πηγή φωτός, μια κάμερα CCD καθώς και τα κατάλληλα οπτικά. Σαν πηγή φωτός χρησιμοποιούμε έναν συνεχές laser αργού

Δημήτριος Ε. Λιαροκάπης, Γρηγόριος Γ. Γρηγορόπουλος, ΕΜΠ
Τεχνικές για την Επέκταση Δυνατοτήτων Συστήματος Καταγραφής Πεδίου Ροής

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

μέγιστης εντάσεως 7W. Η ακτίνα του laser οδηγείται σε ένα παλλόμενο κάτοπτρο μέσω μιας οπτικής ίνας οπότε και δημιουργείται το επιθυμητό φύλλο φωτός (laser sheet). Το παλλόμενο κάτοπτρο ρυθμίζεται ως προς τη συχνότητα και το πλάτος της ταλάντωσης (άνοιγμα της δέσμης) μέσω μιας γεννήτριας σήματος. Για τη δημιουργία εικόνων με ομοιόμορφη φωτεινότητα, η συχνότητα ταλάντωσης του κατόπτρου προτείνεται να είναι μεγαλύτερη της συχνότητας δειγματοληψίας της κάμερας. Πριν το κάτοπτρο, που βρίσκεται στον πυθμένα της πειραματικής δεξαμενής εντός στεγανού κιβωτίου, η δέσμη διέρχεται από οπτικό σύστημα ρύθμισης της θέσης του.



Σχήμα. 3 – Η σχηματική διάταξη του συστήματος δημιουργίας δέσμης

Η ευθυγράμμιση της δέσμης κρίνεται αναγκαία λόγω του επιτρεπόμενου ορίου απόκλισης της δέσμης του laser (0.5 mrad) για το βάθος της δεξαμενής του ΕΝΘΥ ($d = 3.00$ m). Η ποιότητα και η ομοιογένεια της δέσμης επηρεάζει καθοριστικά τη διαδικασία ανάλυσης της εικόνας και τελικός την αποτελεσματικότητα του συστήματος. Η διάταξη για τη δημιουργία της δέσμης του Laser παρουσιάζεται στο σχήμα 3.

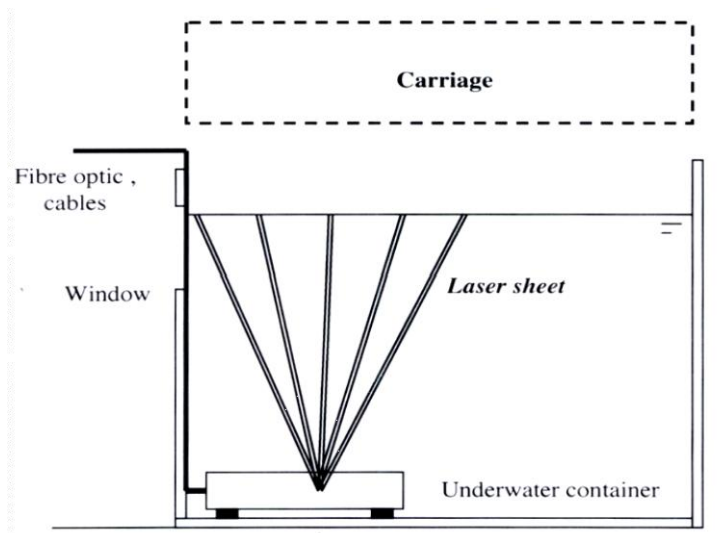
Η λήψη των εικόνων γίνεται με τη βοήθεια δύο (2) CCD καμερών και του διαιρέτη δέσμης. Η θέση του διαιρέτη δέσμης ρυθμίζεται έτσι ώστε οι δύο κάμερες να εστιάζουν και να καταγράφουν το ίδιο πεδίο. Για την αποφυγή προβλημάτων διάθλασης στις δυο εικόνες, ο διαχωριστής επιλέχθηκε να έχει επιπεδότητα $\lambda/10$, όπου λ είναι το μήκος κύματος της ακτίνας του Laser που χρησιμοποιούμε. Επίσης ο δείκτης διάθλασης επιλέχθηκε στο 50% ώστε οι εικόνες από τις δύο κάμερες να είναι ομοιόμορφες ως προς την φωτεινότητα. Δύναται η μελλοντική επέκταση του συστήματος με τέσσερις κάμερες και τρεις διαιρέτες δέσμης.

Οι CCD κάμερες τοποθετήθηκαν σε αδιάβροχο κουτί το οποίο στηρίζεται σε ρυθμιζόμενο πλαίσιο τοποθετημένο μπροστά από το πεδίο ροής. Το κουτί έχει τη δυνατότητα πρόσβασης στις κάμερες από το επάνω μέρος του για τη ρύθμιση της φωτεινότητας και της εστιακής απόστασης του φακού. Το αδιάβροχο κουτί κατασκευάστηκε από Fiber Glass πάχους 1 εκατοστού και στηρίζεται σε αλουμινένιο πλαίσιο που έχει τοποθετηθεί στο τοιχίο της δεξαμενής. Το πλαίσιο έχει τη δυνατότητα ρύθμισης του βάθους βύθισης των καμερών όπως επίσης και της οπτικής γωνίας των καμερών με το πεδίο ροής.

Δημήτριος Ε. Λιαροκάπης, Γρηγόριος Γ. Γρηγορόπουλος, ΕΜΠ
Τεχνικές για την Επέκταση Δυνατοτήτων Συστήματος Καταγραφής Πεδίου Ροής

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

Η κάθε κάμερα λαμβάνει 60 φωτογραφίες ανά δευτερόλεπτο με ανάλυση 692*504 pixels και έχει ρυθμιστή έτσι ώστε να καλύπτει ένα οπτικό πεδίο της τάξεως των 20 cm². Λόγω της υψηλής συχνότητας δειγματοληψίας, η ανάλυση σε φυσικό χρόνο είναι αδύνατη. Οι εικόνες από τις κάμερες μεταφέρονται στον υπολογιστή όπου και αποθηκεύονται, μέσω ενός “frame grabber”. Ένα σχηματικό διάγραμμα της τελικής μορφής της πειραματικής διάταξης φαίνεται στο σχήμα 4.



Σχήμα. 4 – Διαμήκης τομή της πειραματικής δεξαμενής

Στην περιοχή μέτρησης η οποία φωτίζεται από το φύλλο φως εισάγονται κούφια σφαιρικά σωματίδια (hollow glass spheres) τα οποία αντανακλούν το φως του laser. Το μέγεθος των σωματιδίων είναι περίπου 10 μm [Borleteau (2000)]. Τα σωματίδια ανακατεύονται με το ρευστό (νερό) πριν τη διαδικασία των πειραμάτων και εισάγονται σε μορφή ομοιόμορφου νέφους στο πεδίο ενδιαφέροντος πριν από τη μέτρηση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται πριν από κάθε μέτρηση.

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως για την αύξηση της ταχύτητας καταγραφής του συστήματος δημιουργήθηκε συσκευή καθυστέρησης του παλμού συγχρονισμού των δύο καμερών. Αναλυτικότερα, για να μπορέσουμε να μετρήσουμε ταχύτητες της τάξης του 1 m/s χρειαζόμαστε ζευγάρια εικόνων τα οποία να έχουν ληφθεί σε χρονικό διάστημα 1-8 ms. Για να το επιτύχουμε αυτό σχεσιάσαμε και κατασκευάσαμε μια συσκευή η οποία λαμβάνει τον παλμό συγχρονισμού που πηγαίνει στην πρώτη κάμερα και μέσω ενός μικρο-υπολογιστή, στέλνει τον παλμό στη δεύτερη κάμερα με χρονική υστέρηση της τάξεως του 0.2-8 ms. Το ηλεκτρονικό αυτό σύστημα έχει τη δυνατότητα επικοινωνίας με Η/Υ μέσω σειριακής πόρτας.

Η διαδικασία της ανάλυσης αποτελείται από δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο με τη βοήθεια κάποιων φίλτρων και προγραμμάτων του Η/Υ προσπαθούμε να βελτιώσουμε την ποιότητα των εικόνων. Στο δεύτερο στάδιο χρησιμοποιώντας στατιστικές τεχνικές συσχέτισης υπολογίζουμε τα διανύσματα της ταχύτητας του νερού. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη στατιστική ανάλυση της μετατόπισης σωματιδίων που ευρίσκονται στο

Δημήτριος Ε. Λιαροκάπης, Γρηγόριος Γ. Γρηγορόπουλος, ΕΜΠ
Τεχνικές για την Επέκταση Δυνατοτήτων Συστήματος Καταγραφής Πεδίου Ροής

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

πεδίο ροής. Η διαδικασία της επεξεργασίας περιλαμβάνει τη λήψη των εικόνων, το διαχωρισμό τους σε μικρές περιοχές, τον εντοπισμό των σωματιδίων και τον συσχετισμό των εικόνων. Δυστυχώς λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων η επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο είναι αδύνατη.

6. Δοκιμή του συστήματος και σχολιασμός

Κατά τη δοκιμή του συστήματος αντιληφθήκαμε ότι η ακρίβεια με την οποία ο frame grabber λαμβάνει τις εικόνες από την CCD κάμερα δεν ήταν η αναμενόμενη. Πιο συγκεκριμένα, ο frame grabber δεν λαμβάνει εικόνες κάθε 16,667 ms ακριβώς (όπως ορίζει ο κατασκευαστής), αλλά έχει μία διακύμανση της τάξεως των 1 ms. Το σφάλμα αυτό, αν και δεν επηρέαζε σημαντικά τη λειτουργία της καθεμίας από τις κάμερες, στην περίπτωση μας ήταν απαγορευτικό. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος δημιουργήθηκε λογισμικό οδήγησης των καμερών σε γλώσσα Virtual Basic και παράλληλα δημιουργήθηκε σύστημα καταγραφής του χρόνου λήψης των καμερών.

Από τις πρώτες δοκιμές παρατηρήσαμε ότι παρόλο που η ρύθμιση του παλμού συγχρονισμού είχε ακρίβεια msec, η δεύτερη κάμερα σε ορισμένες περιπτώσεις έχανε το συγχρονισμό της. Αυτό οφείλεται στην λειτουργία των καμερών που χρησιμοποιούμε. Οι κάμερες χρησιμοποιούν τους δύο παλμούς συγχρονισμού από τον Frame Grabber που τους ορίζει τον χρόνο έναρξης και λήξης όπως και τον ρυθμό διαβάσματος των pixel της εικόνας. Επεμβαίνοντας στον παλμό οδήγησης της δεύτερης κάμερας οδηγεί σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Μετά από επικοινωνία με την εταιρία, καταλήξαμε ότι για να επιτύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα πρέπει να συγχρονίσουμε με τη χρονική υστέρηση (delay) τους δύο Frame Grabber.

Μετά από τις παραπάνω ενέργειες πετύχαμε την ελάττωση του σφάλματος λήψης των εικόνων σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό. Πιο αναλυτικά το 95% των εικόνων λαμβάνεται με ακρίβεια της τάξης των 10 ms. Αυτό επιτεύχθηκε με τη δημιουργία νέου λογισμικού οδήγησης και ελέγχου των καμερών. Αρχικά το πρόγραμμα οδήγησης των καμερών (dcf) δημιουργήθηκε σύμφωνα με τις συμβουλές της μητρικής εταιρίας. Έπειτα δημιουργήσαμε λογισμικό που ελέγχει πλήρως τις λειτουργίες των καμερών. Το λογισμικό έχει την δυνατότητα να παίρνει εικόνες, να τις αποθηκεύει σε διάφορα format, να διαχειρίζεται την μνήμη του Y/H, να ρυθμίζει το μέγεθος των εικόνων, να δίνει trigger για το ξεκίνημα της αποθήκευσης και να αναλύει τα δεδομένα.

7. Συμπεράσματα

Τεχνικές για την επέκταση των δυνατοτήτων συστήματος καταγραφής πεδίου ροής αναπτύχθηκαν σε αυτή την εργασία. Η προτεινόμενη διάταξη, χρησιμοποιώντας οικονομικές CCD cameras και με τη βοήθεια συσκευής καθυστέρησης παλμών συγχρονισμού, αυξάνει τις μετρούμενες ταχύτητες ροής από 0.2 m/s σε περίπου 2 m/s. Ο διαιρέτης δέσμης εξασφαλίζει την καταγραφή του ίδιου πεδίου από δύο κάμερες, που με τη σειρά του επιτρέπει την χρησιμοποίηση τυποποιημένου λογισμικού για εύρεση του πεδίου ροής.

Το προτεινόμενο έργο θα δώσει τη δυνατότητα πειραματικής μελέτης πολύ μεγάλου εύρους εφαρμογών της ρευστομηχανικής και ιδιαίτερα μελέτης μόνιμων και μη πεδίων

Δημήτριος Ε. Λιαροκάπης, Γρηγόριος Γ. Γρηγορόπουλος, ΕΜΠ
Τεχνικές για την Επέκταση Δυνατοτήτων Συστήματος Καταγραφής Πεδίου Ροής

ροής. Επιπλέον, η μέθοδος αποτελεί εργαλείο όχι μόνον για την κατανόηση ενός ρευστομηχανικού φαινομένου αλλά και βασικό βοήθημα για την αριθμητική επίλυσή του, προσφέροντας μεγάλο όγκο πληροφορίας προς σύγκριση με αριθμητικά αποτελέσματα αλλά και για τον προσδιορισμό των απαραίτητων οριακών συνθηκών που έχουν ανάγκη οι αριθμητικές μεθοδολογίες. Ο λόγος είναι ότι θα δώσει μια εικόνα του πεδίου ροής γύρω από δύσκολες γεωμετρίες στην υδροδυναμική πλοίου [Cotroni, Di Felice, Romano and Elefante (2001)], [Lee, Paik and Lee (2005)] και [Stella, Guj, Di Felice and Elefante (2000)] (π.χ. βολβοειδή πλώρα, πρύμνη καθρέπτη).

8. Βιβλιογραφία

- Adrian J.R., “*Strategies for Imaging Flow Fields with PIV*”, 27th AIAA Fluid Dynamics Conference, 1990, New Orleans, LA
- Bjorkquist C.D., Fingerson M.L., “*Particle Image Velocimetry*”, Atlas of Visualization, Vol. 1, 1992, Pergamon Press
- Borleteau J.P., “*Seeding in a large quiet water tank for the study of a wake flow with PIV technique*”, Particle Image Velocimetry, 384-390, 2000, Kluwer Academic Publishers
- Cotroni A., Di Felice F., Romano P.G., Elefante M., “*Investigation of the near wake of a propeller using particle image velocimetry*”, Experiments in Fluids [Suppl.], 2001, Springer Verlag
- Desaubry C., Gervais P., “*A simple particle image velocimetry instrument for low-velocity flows*”, Experiment in fluids 28, 2000, Springer Verlag
- Desaubry C., Gervais P., “*Characterisation of a standard CCD video camera devoted to the design of an efficient particle image velocimetry instrument*”, Flow Measurement and Instrumentation, 11, 2000
- Fabry P.E., “*3-D holographic PIV with a forward-scattering laser sheet and stereoscopic analysis*”, Experiments in Fluids 24, 1998, Springer Verlag
- Jensen A., Sveen K.J., Grue J., Richon B.J., Gray C., “*Acceleration in water waves by extended particle image velocimetry*”, Experiment in Fluids 30, 2001, Springer Verlag
- Lee S.J., Paik B.G., Lee M.C., “*Phase-Averaged Particle Tracking Velocimetry Measurements of Propeller Wake*”, J. Of Ship Research, Vol. 49, No. 1, 2005
- Liu Z-C., Adrian R.J., Meinhart C.D., Lai W., “*Visualization for structure in a turbulent boundary layer using a stereoscopic particle image velocimeter*”, 8th Int. Symp. Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, July 8-11, 1996, Lisbon
- Prasad K.A., Adrian R.J., “*Stereoscopic particle image velocimetry applied to liquid flows*”, Experiments in Fluids, 15, 1993, Springer Verlag
- Raffel M., Willert C., Kompenhans J., “*Particle Image Velocimetry*”, 1998, Springer Verlag
- Stella A., Guj G., Di Felice F., Elefante M., “*Experimental Investigation of Propeller Wake Evolution by Means of LDV and Flow Visualizations*”, J. of Ship Research, Vol. 44, No. 3, 2000
- Zilliac G.G., “*Modelling, calibration, and error analysis of seven-hole pressure probes*”, Experiment in Fluids 14, 104-120, 1993

Δημήτριος Ε. Λιαροκάπης, Γρηγόριος Γ. Γρηγορόπουλος, ΕΜΠ
Τεχνικές για την Επέκταση Δυνατοτήτων Συστήματος Καταγραφής Πεδίου Ροής

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012
