ETH zürich

ETH Library

Imaging of turbulent mixing by laser induced fluorescence and its application to velocity and velocity gradient measurements by a multi-patch 3D image correlation approach

Doctoral Thesis

Author(s):
Deusch, Stefan

Publication date:
1998

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-001904969

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

Diss. ETH Nr. 12 598

Imaging of Turbulent Mixing by Laser Induced Fluorescence and its Application to Velocity and Velocity Gradient Measurements by a Multi-Patch 3D Image Correlation Approach

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of

Doctor of Technical Sciences

presented by

Stefan Deusch

Dipl.-Ing.
University of Technology, Vienna
born August 8, 1969
citizen of Austria

Accepted on the recommendation of
Prof. Dr. P. Rys, examiner
Prof. Dr. M. Morbidelli, co-examiner
Prof. em. Dr. T. Dracos, co-examiner

Zurich, 1998

Abstract

The measurement of intrinsic reaction rate constants is based on the assumption of perfect mixedness of reactants and products at any time. However, for the class of diffusion-controlled reactions, where the reactive step is very rapid and the rate of reaction is controlled by the diffusive approach of the reactants, the complexity of the liquid state may cause variations of the observed global reaction rate. The consequences of this are that the conversion in an upscaled stirred tank reactor is generally lower than in the laboratory experiment, and if various interdependent reaction pathways are possible, the product selectivity changes with the degree of mixing. The mixing of liquid reactants is usually brought about by the action of a turbulent velocity field. A measure of the state of mixedness of a two-component system is the extent of the so-called "intermaterial surface". This surface can be mapped out with a non-reacting passive dye.

The objective of this work was to provide a technique to experimentally characterise mixing at its intermaterial surface in full 3D and with time. For this purpose the method of Laser Induced Fluorescence (LIF) was developed into a 3D technique, especially for imaging turbulent mixing interfaces. The scope of this work is outlined in three parts:

The first part is about the theoretical and practical fundamentals of 3D LIF imaging. An experiment was implemented using a cw argon ion laser. The laser beam was focused into a water-filled reservoir containing a non-buoyant turbulent free jet. A laser light sheet was produced either statically by a cylindrical lens or dynamically by scanning the beam through a rotating plexi prism. Two prisms were constructed, one for scanning a 45 mm light sheet, and one for a 35 mm sheet. For the 3D LIF images the laser beam or sheet was either scanned linearly by a moving mirror, or radially by a piezo-driven mirror. Two digital high-speed cameras with up to 500 frames/s were used to image the LIF patterns of mixing fluids. One camera had a photodiode sensor with 256^2 pixs, the other was a CCD camera with 512^2 pixs. The z-resolution was chosen equal to the x,y-resolution of the viewfield. The time to record one 3D volume image was fixed shorter than the Kolmogorov time scale of the local flow. Thus the 'thickness' of one volume was confined by the local *Re*-number and the imaging speed of the camera. The disodium salt of fluorescein was chosen as LIF dye because of its high water solubility, its high fluorescence quantum efficiency (>90%), the matching of its absorption maximum at 491 nm with the principal Ar-ion laser line at 488 nm, and its low diffusivity ($Sc = 2790$). 2D LIF images of the jet cross section in the farfield were taken during over 120s. They showed that the scalar center of gravity made a circular motion. This suggests the important role of streamwise vortical structures even far away from the jet origin. The 3D LIF imaging was made with a space resolution of 68.4 μm/pix in the best case, at a nozzle *Re*-number of 6500 and at a few mm's Kolmogorov length. A radiometric correction for inhomogeneous excitation illumination and self absorption of the dye allowed to compute the absolute concentration field - a prerequisite to look at scalar dissipation measurements.

The second part of this work discusses the possibility to apply the so-called Least Squares Matching (LSM) image correlation technique to the 4D (3D+t) LIF voxel data in order to obtain the velocity and the velocity gradient field of the flow. LSM models the transformation of correlated pixels, e.g. of a cube of 11^3 pixels, affine by minimizing the sum of squared greyvalue differences. The least-squares fit of the affine parameters is

done iteratively until convergence, the method can therefore be called a Gauss-Markov process. The LSM was originally formulated for a single group of pixels, called patch. Here it was developed to a simultaneous solution of an assembly of 3x3x3 patches with the additional geometric constraint that initially joint corners between patches keep the patches linked during the transformation. This constraint makes it unlikely that neighbouring patches are overlapping or drifting apart thus violating the continuum hypothesis. Such discontinuities were a frequent failure of the Single Patch LSM (SP-LSM) method. The simultaneous method, called Multi-Patch LSM (MP-LSM), was implemented in three different versions: 1) a docking version in which the new solutions are connected to the previous solutions. This method turned out to be conceptually false since the solutions are constrained too much a priori, and the errors accumulate. However, it can be used at a solid no-slip boundary condition. 2) A sparse free MP-LSM version solves the 27 patches, stores the values of the center patch, and proceeds two patches. The holes are post-interpolated. 3) A dense free MP-LSM version solves the patch assembly at the location of every patch. All three methods together with the SP-LSM were validated with synthetic and experimental images utilizing the advection field of a Direct Numerical Simulation (DNS) of a fully turbulent channel flow at $Re = 8500$. The dense free MP-LSM version showed the best accuracy and reliability of both, the individual transformation components and some integral tests of the flowfield. A correlation test of the pointwise continuity reached 97% and the correlation of vanishing divergence of vorticity was 87%. The role of individual LSM program parameters was also investigated. For instance, it was shown that images with true 10- or 12-bit resolution can be used to reproduce the deformation field with an accuracy approaching that of the DNS field. However, the validation with experimental 3D LIF images revealed that this kind of images is only partially applicable for 3D LSM correlation. The continuity test correlated with 89%, the divergence of vorticity vanished with 60% correlation.

Thirdly, the combination of the 3D LIF imaging experiments with the LSM software can be used to assess scalar mixing. Two sample experiments are presented to describe the structures of scalar mixing and to extract basic kinematic quantities and their relationship. The experiments were taken in the outer edge of the shear layer of the jet farfield. Results were found in agreement with numerical simulations and other measurements: (i) on the average two of the three rate-of-strain eigenvalues are positive, (ii) the intermediate eigenvalue β tends to align most with the vorticity vector ω, (iii) the enstrophy generation term is correlated with the sign of β, (iv) higher dissipation values occur at positive β values. The same experiment was also looked at in the space of its velocity gradient invariants and its symmetric and skew-symmetric subspaces. This topological analysis was also found in agreement with literature data of incompressible DNS flow.

Zusammenfassung

Eine grundlegende Annahme bei der Messung intrinsischer Reaktionsraten ist, daß Produkte und Reaktanden zu jeder Zeit ideal durchmischt im Reaktionsvolumen vorliegen. Indes bei der Klasse der diffusionskontrollierten Reaktionen, bei denen der stoffwandelnde Schritt sehr schnell ist und die Reaktionsrate durch das diffusive Heranströmen der Reaktanden begrenzt ist, vermag die Komplexität des flüssigen Zustandes Variationen der beobachtbaren, globalen Reaktionsrate herbeizuführen. Die Folgen davon sind, daß der Umsatz in einem Upscale-Rührreaktor im allgemeinen niedriger ist als im Laborexperiment, und daß bei mehreren untereinander abhängigen Reaktionspfaden die Produkteselektivität mit dem Durchmischungsgrad ändern kann. Flüssige Reaktanden werden in der Regel mittels eines turbulenten Geschwindigkeitsfeldes vermischt. Ein Maß für den Mischungszustand eines Zweikomponentensystems ist die Größe seiner intermateriellen Oberfläche. Diese Oberfläche kann mit einem nicht reaktiven, hydrodynamisch passiven Farbstoff markiert werden.

Ziel dieser Arbeit war es, eine Meßtechnik zu entwickeln, die imstande ist, das Durchmischen anhand seiner intermateriellen Oberfläche in 3D und dessen zeitliche Entwicklung zu messen. Dazu wurde die Methode der Laser induzierten Fluoreszenz (LIF) zu einer 3D Aufnahmetechnik erweitert, um im besonderen die intermateriellen Oberflächen turbulenter Durchmischung zu messen. Die Arbeit läßt sich in drei Teile gliedern:

Im ersten Teil werden die theoretischen und praktischen Grundlagen der 3D LIF Aufnahmetechnik beleuchtet. Im Experiment wurde ein 'continuous wave' (cw) Ar-Ionen Laser eingesetzt. Der Laserstrahl wurde in einen wassergefüllten Tank fokussiert, in dem ein auftriebsneutraler, turbulenter Jet erzeugt wurde. Der Laserstrahl wurde entweder zusätzlich mit einer plan-zylindrischen Linse in eine Lichtschicht transformiert oder direkt mittels rotierenden Plexiglas-Prismen zu einer 45-mm oder einer 35-mm breiten Lichtschicht gescannt. Für die 3D LIF Bilder wurde der Laserstrahl zusätzlich entweder mechanisch linear oder radial über einen piezo-getriebenen Kippspiegel gescannt. Zwei digitale Hochgeschwindigkeitskameras, beide mit bis zu 500 Bildern/s Aufnahmegeschwindigkeit, eine Photodiodenkamera mit 256^2 Pixel und eine CCD Kamera mit 512^2 Pixel, wurden benutzt. Die Auflösung in z-Richtung wurde der x,y-Auflösung der Kamera angeglichen. Die Aufnahmezeit eines 3D Bildes wurde in allen Fällen kürzer als die lokale Kolmogorov Zeit gewählt, d.h. die „Dicke" der 3D Bilder wird durch die *Re*-Zahl der Strömung und die Aufnahmegeschwindigkeit der Kamera begrenzt. Als LIF Farbstoff wurde Dinatriumfluoreszein gewählt, weil es neben seiner hohen Fluoreszenzquantenausbeute (>90%) auch eine geringe Diffusion in Wasser hat (Sc = 2790) und sein Absorptionsmaximum bei 491 nm sehr gut zur 488 nm Emissionslinie des Ar-lasers paßt. 2D LIF Aufnahmen des radialen Jet-Querschnittes über 120s zeigten eine zirkuläre Bewegung des Konzentrationsschwerpunktes im Fernfeld. Dies läßt auf die Wichtigkeit der anfänglichen Wirbelstrukturen in Strömungsrichtung schließen. Die 3D LIF Aufnahmen wurden im besten Fall mit 68.4 µm/Pix. aufgelöst bei einer Düsen *Re*-Zahl von 6500 und einer Kolmogorov Länge im mm-Bereich. Mit einer radiometrischen Korrektur der Beleuchtungsintensität und für die Selbstabsorption des Farbstoffes konnte auf die absolute Konzentration aus den Grauwertintensitäten zurückgerechnet werden - eine Voraussetzung für die Untersuchung der skalaren Durchmischung.

Im zweiten Teil der Arbeit werden die Möglichkeiten diskutiert, die digitalen 4D (3D+t) LIF Strömungsbilder der Methode des Least-Squares-Matching (LSM) zwecks Bestimmung des Geschwindigkeits- und Deformationsfeldes zu unterwerfen. LSM modelliert die Beziehung zwischen korrelierten Pixelgruppen, z.B. Würfel von 11^3 Pixel, als affine Transformation unter Minimierung der Summe der quadrierten Grauwertedifferenzen. Dabei gelangt man zu einem iterativen Gauß-Markov Prozeß. Die ursprüngliche Formulierung der Korrelation einzelner Pixelfenster, genannt Patches, wurde zu einer simultanen Lösung einer Anordnung von 3x3x3 Patches erweitert, mit der zusätzlichen Nebenbedingung, daß gemeinsame Patch-Ecken während der Transformation zusammen bleiben sollen. Dadurch werden Diskontinuitäten, wie Überlappungen oder Löcher, unmöglich. Diese traten bei der Einzel-Patch (SP-LSM) Methode häufig auf. Für das Simultanverfahren, Multi-Patch LSM (MP-LSM), wurden drei verschiedene Versionen entwickelt: 1) Eine „Andock"-Version, bei der die Lösungen laufend angedockt werden. Weil aber die Fehler beim Andocken akkumuliert werden, erwies sich dieses Verfahren, außer an festen Grenzschicht-Randbedingungen, als unbrauchbar. 2) Eine verdünnte Rechnungsweise, sparse free MP-LSM, löst nur jedes zweite Patch im Raum, und die Lücken werden nachträglich interpoliert. 3) Eine verdichtete Rechnungsweise, dense free MP-LSM, löst jedes unbekannte Patch ohne Einschränkungen *a-priori*. Alle drei Methoden wurden gemeinsam mit dem SP-LSM mit einem Geschwindigkeitsfeld einer Direkten Numerischen Simulation (DNS) einer Kanalströmung bei $Re = 8500$ sowohl mit synthetischen als auch mit experimentellen Bildern validiert. Die 'dense free MP-LSM' Variante zeigte dabei die höchste Genauigkeit und Zuverlässigkeit, sowohl der einzelnen Transformationsparameter, als auch davon abgeleiteter Testgrößen des Strömungsfeldes. So korreliert beispielsweise die Volumenerhaltung (Kontinuität) mit 97% und die Divergenz des Wirbelvektors mit 87%. Der Einfluß einiger LSM-Programmparameter wurde ebenfalls untersucht. Es wurde u.a. gezeigt, daß Bilder mit echter 10- oder sogar 12-bit Auflösung mit fast der Genauigkeit des DNS Feldes korreliert werden können. Die Validierung mit experimentellen LIF Bildern zeigte jedoch, daß solche Bilder nur bedingt für LSM geeignet sind. Die lokale Volumenerhaltung korreliert mit 89%, während die lokale Divergenz des Wirbelvektorfeldes mit 60% korreliert.

Drittens wird anhand zweier Versuche exemplarisch gezeigt, daß die 3D LIF Hardware kombiniert mit der LSM Software dazu verwendet werden kann, skalare Vermischung zu messen, die Geometrie der dabei auftretenden Strukturen darzustellen, sowie Beziehungen zwischen fundamentalen kinematischen Größen zu untersuchen. Im vorliegenden Fall des turbulenten Jets im Fernfeld wurden bei einer Scherschicht im äußeren Teil des Jets folgende Resultate gefunden, die im Einklang mit numerischen Simulationen und Messungen sind: 1) Zwei von drei Eigenwerten des Dehnungstensors sind meist positiv, 2) der Wirbelvektor ω ist häufig nahezu parallel zum mittleren Eigenvektor β ausgerichtet, 3) der "enstrophy generation" Term ist mit dem Vorzeichen von β korreliert, 4) höhere Dissipation tritt eher bei positivem β auf. Das gleiche Experiment wurde auch im Raum seiner Invarianten des Geschwindigkeitsgradient-Tensors sowie seines symmetrischen und antisymmetrischen Anteils betrachtet. Diese Topologie-Analyse war ebenfalls in Übereinstimmung mit Literaturdaten von DNS inkompressibler Strömung.