

Diss. ETH No. 14957

A Quantitative Visualization Tool for Large Wind Tunnel Experiments

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZÜRICH

for the degree of
DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES

presented by

MATTHIAS MACHACEK

Dipl.-Ing. (ETH Zürich)
born March 5th, 1973
Citizen of Switzerland

Accepted on the recommendation of
Prof. Dr. T. Rösgen, examiner
Prof. Dr. L. Van Gool, co-examiner
Prof. Dr. M. Gharib, co-examiner

Zürich 2002

Einführung

Ein System zur Visualisierung von Strömungsversuchen in grossen Windkanälen wurde entwickelt. Das Verfahren basiert auf einer vollständigen Rekonstruktion der dreidimensionalen Trajektorien von Partikeln, die zur Strömungssichtbarmachung dem Fluid beigegeben werden. Dieser Ansatz erlaubt eine Strömungsvisualisierung in einem ausgedehnten Messvolumen.

Das Ziel war es, das System für praktische Versuche im Windkanal anwendbar zu machen. Daher musste der Messaufbau und die Messprozedur so einfach wie möglich gehalten werden. Im Idealfall erlaubt die Methode eine direkte quantitative Strömungsvisualisierung noch während des Versuches. Um das zu ermöglichen müssen die Algorithmen einfach und effektiv sein und der Rechenaufwand muss klein gehalten werden.

Die Partikel zur Strömungssichtbarmachung werden mit zwei Kameras aufgenommen, wobei das ganze Messvolumen kontinuierlich ausgeleuchtet wird. Die Beleuchtungszeit der Kameras wird auf den grösstmöglichen Wert gesetzt ($\sim 1/\text{Bildrate}$) was zu einer Bilderreihe führt, in der ein bewegtes Teilchen einen kontinuierlichen Pfad aus zusammengesetzten Segmenten erzeugt. Mit Hilfe der Partikelbahnen aus beiden Kameras wird die dreidimensionale Partikelbahn rekonstruiert.

Um den schwachen Kontrast zu verbessern wird ein Referenzbild vom aktuellen Bild subtrahiert, danach wird das Bild gefiltert um das Rauschen zu unterdrücken und mit einem Schwellwertoperator segmentiert. Die Pfadsegmente werden aufgrund der Tatsache identifiziert, dass die Pfade kontinuierlich sind, d.h. jedes nachfolgende Segment muss genau dort zu finden sein wo dasselbe Segment im vorangehenden Bild aufgehört hat. Die Endpunkte der identifizierten Segmente werden extrahiert und die Randpixelkoordinaten der Segmente werden bezüglich der Verzerrung durch die Linse und des CCD Chips korrigiert. Sobald kein neues Segment mehr für den betreffenden Pfad gefunden werden kann, wird die Mittellinie des Pfades mit einem kubischen Spline approximiert. Die zusammengehörenden Pfade aus den zwei Kameras werden aufgrund der Epipolarbe-

dingung, angewandt auf die Endpunkte, bestimmt. Nachdem zwei zusammengehörende Pfade gefunden sind, wird die Partikelbahn punktweise dreidimensional rekonstruiert. Ein dreidimensionaler kubischer Spline wird verwendet um die Partikelbahn zu beschreiben. Die Partikelgeschwindigkeit kann aufgrund der Segmentlänge und der Belichtungszeit berechnet werden. Um Informationen über die Form der Partikelbahn zu erhalten, werden zusätzlich die Krümmung, die Torsion und das begleitende Dreibein berechnet.

Die Resultate werden in einer interaktiven und dreidimensionalen virtuellen Umgebung dargestellt, welche aus den rekonstruierten Partikelbahnen, dem aerodynamischen Modell und dem Windkanal besteht. Diese Umgebung erlaubt es, durch Interaktion und Navigation die Strömung genau zu studieren und zu analysieren.

Um die Abbildung eines Objektes durch die Kameras beschreiben zu können, muss ein Modell verwendet werden. Dieses Modell enthält eine Reihe von Parametern, die man zuerst mit einem geeigneten Kalibrationsverfahren bestimmen muss, bevor man die Messungen durchführen kann. Aufgrund des grossen Messvolumens ist eine zweistufige Kalibrationsmethode entwickelt worden, welche die geforderte Einfachheit des gesamten Messvorganges erhält. Im ersten Schritt werden die Parameter, welche die Eigenschaften der Linse und des CCD Chips beschreiben, berechnet. Da diese unabhängig von der Messvolumengrösse sind, kann man dazu ein kleines, handliches Kalibrationsobjekt wählen. Dazu wird eine ebene Platte mit einem Punktmuster verwendet. Um eine dreidimensionale Punkteverteilung zu erhalten, wie es für die Kalibrationsroutinen unbedingt notwendig ist, wird die Platte während der Kalibrierung verschoben. Für die Kalibrierung der Parameter welche die Kameraposition und Orientierung beschreiben, wird ein Verfahren verwendet, welches auf der Korrespondenz von Punkten und auf einer Referenzlänge basiert. Dazu wird ein Stab mit zwei Leuchtdioden als Kalibrationsobjekt verwendet. Es hat sich gezeigt, dass die zweistufige Kalibrationsmethode die Prozedur wesentlich vereinfacht, wobei die gleiche Kalibriergenauigkeit wie bei einer vollen photogrammetrischen Methode erreicht wird.

Der Versuchsaufbau besteht im wesentlichen aus zwei *interline* CCD Kameras mit einer Bildrate von 120 Bildern/s, um das Aufnehmen von schnellen Strömungsvorgängen zu ermöglichen. Die Kameras haben die erforderliche kurze Aufnahmetzeit zwischen den Bildern, notwendig um Bilder mit kontinuierlichen Bahnen von bewegten Partikeln zu erzeugen. Heliumgefüllte Bläschen mit einer im Vergleich zur Umgebungsluft neutralen Dichte werden als Markerpartikel ge-

braucht. Da die Dichte genau angepasst werden kann, sind solche Bläschen die ideale Lösung.

Das entwickelte quantitative Messverfahren, basierend auf dreidimensional rekonstruierten Partikelbahnen, wurde in einem mittelgrossen Windkanal getestet. Eine einfache parallele Strömung, eine Staupunktströmung an einer Kreisplatte und das Wirbelsystem eines Deltaflügels wurden visualisiert. Es hat sich gezeigt, dass die Methode grundsätzlich funktioniert. Die vollständig dreidimensionale Visualisierung der Strömung mit zusätzlichen Geschwindigkeitsinformationen wurde erreicht.

Abstract

The development of a measurement system to visualize complex flows in large scale wind tunnel tests is described. The method is based on the three-dimensional reconstruction of tracer path lines. This approach allows to visualize and quantify complex three-dimensional and time dependent flows in a full three-dimensional measurement volume. The objective is to develop a system practicable for wind tunnel test. The set-up complexity and the measurement effort must therefore be kept as simple and low as possible. Ideally the method allows for an on-line quantitative visualization of the flow. This requires simple and effective algorithms to keep the computational time low.

Two cameras and a continuous illumination of the entire measurement volume are used to record the flow tracers. The camera shutter is therefore set to the maximum exposure time ($\sim 1/\text{frame rate}$) to produce consecutive images, in which a moving particle leaves a continuous string of connected path segments, forming a complete path line. The corresponding path lines from both camera views are used to reconstruct the path line in three dimensions.

The reconstruction consist of the following steps. A reference image is subtracted from the actual image to enhance the contrast, the image is filtered to reduce the residual noise and a threshold operation is applied for the image segmentation. The path segments are identified based on the necessary connectivity condition in-between frames; the follow-on segment in the current frame must be connected with the segment in the preceding frame. The two endpoints of the identified path segment are extracted and the boundary pixels are corrected for the distortion caused by the camera. After no follow-on segment for a path line can be found, the path centerline is approximated with a cubic spline. Corresponding path lines from both camera views are found based on the epipolar condition applied to the endpoints. Thereafter the path line is reconstructed pointwise in three dimensions and a three-dimensional cubic spline is calculated as path line representation. Thereafter the information inherent in the reconstructed path lines is extracted. The path segment length in conjunction with the exposure time gives an estimate on the flow velocity and the shape of the path line gives information on

the topology of the flow. For a characterization of the path line shape local measures as the curvature, the torsion and the Frenet frame are calculated. The results are displayed in an interactive three-dimensional virtual environment consisting of the reconstructed path lines, the aerodynamical model and the test section of the wind tunnel. The environment allows to control the mode of the path line display and the navigation in the three-dimensional measurement volume for analysis of the flow visualization.

The photogrammetric approach requires a camera model to establish a mathematical connection between an object and its camera image. The parameters describing the camera model are a priori unknown and must be found by an appropriate calibration procedure before any measurements can be conducted. An accurate photogrammetric calibration requires a calibration pattern with a size equal to the measurement volume size. To keep the calibration procedure for large wind tunnel test simple a two-step calibration is developed. In a first step the parameters describing the characteristics of the camera lens and the CCD chip are calibrated with a photogrammetric calibration. Because these parameters do not depend on the set-up or the measurement volume size the calibration can be done off-line with a small, handy calibration target. For this a planar calibration target with point markers is used. The target is shifted during the calibration procedure to create a virtual three-dimensional calibration object required by the calibration algorithm. In the second step the parameters describing the camera position and orientation are calibrated based on point correspondences and on a reference length. For this a stick with two LEDs is used as calibration object. It was found that the two-step calibration greatly facilitates the calibration procedure while the same calibration accuracy is obtained as with a full photogrammetric calibration.

The hardware is realized with two interline CCD cameras with a frame rate of 120 frames/s for measurements at high flow velocities. The cameras have the required short dead time in-between the frames necessary to create connected segments of the moving particles. Neutrally buoyant helium filled bubbles are used as tracer particles. Matching the density of the ambient air, the bubbles are ideal flow tracers in this respect.

The quantitative visualization method based on three-dimensionally reconstructed path lines was demonstrated in a medium scale wind tunnel free stream flow, a stagnation point flow and for the vortex system of a delta wing. The results showed the principle functionality of the method. A full three-dimensional visualization of the flows with additional velocity information was obtained.