

DISS. ETH NO. 24625

Real-Time 3D Flow Visualization Technique with Large Scale Capability

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZÜRICH
(Dr. sc. ETH Zürich)

presented by

Andreas Müller

MSc ETH Masch.-Ing., ETH Zürich
born September 23, 1984
citizen of Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Thomas Rösgen, examiner
Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann, co-examiner
Dr. Andrin Landolt, co-examiner

2017

Abstract

The use of quantitative flow visualization techniques like particle image velocimetry (PIV), particle tracking velocimetry (PTV) or probe traversing in commercial wind tunnel testing is rather the exception than the rule, often hindered by the comparatively complex and time-consuming setup. In practice, qualitative visualization methods like mini-tufts and smoke flow visualization are often the only applicable option, especially when measuring in or around complex geometries.

In this work, a novel quantitative flow visualization method (Pro-Cap) is developed with the goal to enhance the productivity of aerodynamic testing. To this end, the orientation and position of a hand-held probe (e.g. multi-hole pressure probe, thermoelectric anemometer) are optically tracked using a motion capture camera system with sub-millimeter accuracy. The simultaneous recording of the probe's output signal allows interpolating the flow data onto a regular grid. To provide some real-time feedback to the operator, a GPU-accelerated interpolation and rendering scheme is applied. By continuously scanning the probe around the test article the reconstructed field eventually converges to the time-averaged flow field. The interactive, real-time visualization of the measured flow is crucial for the efficiency of the method as it allows the operator to focus specifically on regions with complex flow structures. To date, Pro-Cap supports the following visualization features: Contour slices, vector slices, streamlines, and isosurfaces.

The scanning approach offers great flexibility as with different probes the volumetric distribution of virtually any flow quantity can be recorded. So far, the system has been tested mostly with a five-hole probe, a device that allows one to measure the static pressure, the flow velocity magnitude and the flow direction, albeit in a limited range of angles.

To enhance the consistency and quality of the measured velocity field, the applied interpolation method offers the possibility to account for physical constraints such as mass conservation.

The visualization method was successfully tested on flows around different aerodynamic models. Comparisons with measurements from a 3-axis traversing system reveal that the setup and measurement time is reduced by a factor of about 20 with acceptable losses in accuracy. This circumstance underlines the method's potential to fill the gap between traditional flow visualization and high-precision, high-complexity measurement techniques.

Zusammenfassung

Der Einsatz von quantitativen Strömungsvisualisierungsmethoden in kommerziellen Windkanalmessungen ist eher die Ausnahme als die Regel, meist aufgrund des komplexen und aufwendigen Aufbaus. In der Praxis kommen qualitative Visualisierungstechniken wie Wollfäden oder Visualisierungen mit Rauch häufiger zum Einsatz, dies gilt insbesondere bei Messungen in und um komplexe Geometrien.

In dieser Arbeit wird eine neue quantitative Strömungsvisualisierungsmethode (ProCap) entwickelt mit dem Ziel, die Produktivität von aerodynamischen Untersuchungen zu verbessern. Zu diesem Zweck wird mit Hilfe eines optischen Motion Capture Systems, welches submillimeter Genauigkeit hat, die Orientierung und die Position einer handgeführten Sonde (z.B. Mehrlochsonde, thermoelektrische Anemometer) bestimmt. Das gleichzeitige Aufnehmen des Sondersignals erlaubt es, die gemessenen Strömungsdaten auf ein reguläres Gitter zu interpolieren. Um dem Anwender ein Feedback in Echtzeit bereitzustellen, wird für die Interpolation und räumliche Darstellung eine programmierbare Grafikkarte (GPU) eingesetzt. Mit fortlaufender Messdauer konvergiert die Rekonstruktion zum zeitlich gemittelten Strömungsfeld. Die interaktive Visualisierung der gemessenen Strömung in Echtzeit ist für die Effizienz der Methode von entscheidender Bedeutung. Sie ermöglicht dem Anwender, sich auf Gebiete mit interessanten Strömungsstrukturen zu fokussieren. Zurzeit unterstützt ProCap die folgenden Visualisierungsfunktionen: Kontourflächen, Vektorflächen, Stromlinien und Isoflächen.

Das Messkonzept von ProCap zeichnet sich nicht nur durch seine Effizienz aus, sondern bietet auch diverse Einsatzmöglichkeiten. Unter anderem kann durch den Einsatz verschiedener Sonden die räumliche Verteilung beliebiger Strömungsgrößen gemessen werden. Bisher wurden die meisten Messungen mit einer sogenannten Fünflochsonde durchgeführt. Diese druckbasierte Messtechnik eignet sich für Strömungen mit einer bekannten Hauptströmungsrichtung und ermöglicht das gleichzeitige Messen von Druck, Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsrichtung.

Zur Verbesserung der Messqualität wurde das Interpolationsschema für die Geschwindigkeit so angepasst, dass die Massenerhaltung der Strömung inhärent erfüllt ist.

Verschiedene Strömungen wurden mit der neuen Messmethode untersucht. Vergleiche mit Traversierungen belegen die Effizienz und das Leistungsvermögen von ProCap. Die Messzeit verkürzt sich um zirka das 20-fache. Allerdings ist die räumliche Auflösung der komplexen Strömungsstrukturen etwas schlechter. Nichtsdestotrotz besitzt die Methode das Potential, die bestehende Lücke zwischen komplexen, quantitativen und einfachen, rein-qualitativen Messsystemen zu schliessen.