

DISS. ETH NO. 28985

TrackAER: Volumetric Event-Based Particle Tracking Velocimetry in Real-Time

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Alexander Rusch

MSc ETH in Mechanical Engineering, ETH Zurich

born on 07.01.1994

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Thomas Rösgen, examiner
Prof. Dr. Tobi Delbrück, co-examiner
Dr. Christian Willert, co-examiner

2023

Abstract

In experimental fluid mechanics, both the instant, intuitive visualization of a flow field and its accurate capture in quantified form are vital to study and fully understand the complex underlying physics. These two categories of techniques tend to be mutually exclusive due to the significant data overhead associated with existing quantitative flow visualization methods. As such, an open research objective is the development of a measurement system that enables the accurate reconstruction of time-resolved, three-dimensional flow fields, while delivering and rendering the information in real-time as the flow evolves. Addressing the issue, this thesis proposes a novel measurement system called *TrackAER* which employs multiple neuromorphic *event cameras* for real-time flow tracer tracking and online flow field reconstruction. The biologically inspired operation principle of said devices is fundamentally different from conventional frame-based cameras as they do not capture spatially dense, absolute intensity information at fixed time intervals. Instead, event cameras only sense local temporal contrast changes. As such, they generate an asynchronous stream of semantically condensed data corresponding to the visual signature of the moving tracers only, and with a data rate automatically adapted to the visual stimuli. A corresponding, asynchronous data processing pipeline is developed in this work, which exploits the characteristics of the event data stream for extremely fast processing such that tracking, photogrammetric reconstruction, and velocity estimation are carried out without noticeable temporal delay. The reconstructed flow fields are real-time visualized in the form of tracer path lines that are quantitatively labeled with additional information, such as the local flow speed. The interactive, virtual, and three-dimensional representation of the flow scene in the TrackAER software offers a high level of immersion. Targeted test volumes are at the industry-relevant cubic meter scale such that neutrally buoyant helium-filled soap bubbles become the flow tracers of choice. Investigations of both transient flow phenomena as well as continuous measurements with long durations are enabled. Short tests of only a few seconds suffice to capture the predominant structures in a flow, and the temporal accumulation of the tracer reconstructions yields a dense and detailed representation of the flow field under investigation. A diverse set of test cases successfully demonstrates the broad applicability and validity of the TrackAER system, indicating measurement accuracies in the sub-percent range, on par with or better than conventional pressure-probing.

Zusammenfassung

Im Bereich der experimentellen Fluidodynamik sind die unmittelbare, intuitive Visualisierung von Strömungsfeldern und ihre exakte Erfassung in quantitativer Form gleichermaßen wichtig, um die zu Grunde liegenden komplexen physikalischen Vorgänge erforschen und verstehen zu können. Diese beiden Ansätze schliessen sich jedoch typischerweise gegenseitig aus, da die Datenmengen, die mit bestehenden quantitativen Verfahren zur Strömungsvisualisierung einhergehen, zu gross sind, um direkt verarbeitet und nahtlos visualisiert werden zu können. Ein bisher unerreichtes Ziel der Forschung ist daher die Entwicklung eines Messsystems, das die genaue, zeitlich aufgelöste und dreidimensionale Rekonstruktion einer Strömung erlaubt und dabei qualitative und quantitative Informationen über das Strömungsfeld in Echtzeit darstellt, während die Strömung sich entwickelt. Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Arbeit das neuartige Messsystem *TrackAER* vorgestellt, das mittels mehrerer neuromorpher *Eventkameras* Seedingpartikel in Echtzeit verfolgt und so Strömungsfelder online rekonstruiert. Besagte Kameras sind dem Vorbild biologischer Retinae nachempfunden und funktionieren grundlegend anders als konventionelle Kameras, die Bilder in Form von Frames aufnehmen: Statt eines räumlich dichten Abbilds mit absoluter Intensitätsinformation an jedem Pixel und fixen Bildraten, tasten Eventkameras die Szenerie auf lokale, zeitliche Änderungen des Bildkontrastes ab. Die Kameras erzeugen dadurch einen asynchronen Strom von semantisch kondensierten Daten, die ausschliesslich der visuellen Signatur der bewegten Tracerpartikel entsprechen und deren Rate sich automatisch den visuellen Stimuli anpasst. In dieser Arbeit wird eine Kette von asynchronen Algorithmen zur Datenverarbeitung entwickelt, die an die Arbeitsweise der Kameras angepasst ist. Sie nutzt die Eigenheiten des Eventdatenstreams aus, um extrem kurze Verarbeitungszeiten zu ermöglichen. Folglich wird die Nachverfolgung der Tracerpartikel, ihre photogrammetrische Rekonstruktion und die Bestimmung ihrer Geschwindigkeit ohne merklichen Zeitverzug gegenüber der physikalischen Realität ausgeführt. Die rekonstruierten Strömungsfelder werden in Echtzeit in der Form von Tracerbahnlinien visualisiert, wobei zusätzlich quantitative Informationen wie beispielsweise die lokale Strömungsgeschwindigkeit überlagert werden. Die interaktive, virtuelle und dreidimensionale Darstellung in der *TrackAER* Software erlaubt tiefe Einblicke – geradezu das Eintauchen – in die Strömung. Das Messsystem zielt auf grosse Messvolumina im industriell relevanten Kubikmeterbereich ab. Die Wahl der Tracerpartikel fällt daher auf neutraldichte heliumgefüllte Seifenblasen. *TrackAER* ermöglicht sowohl die Erfassung

von zeitlich veränderlichen Strömungsphänomenen als auch kontinuierliche Messungen über lange Zeiträume. Kurze Messungen von wenigen Sekunden hingegen genügen bereits, um die Hauptstrukturen einer Strömung aufzulösen und das zeitliche Aufsummieren der rekonstruierten Tracerbahnlinien liefert ein dichtes, detailreiches Abbild der untersuchten Strömung. Mittels einer Reihe von unterschiedlichen Testfällen wird die breite Anwendbarkeit von TrackAER, sowie die Validität der zugehörigen Messresultate unter Beweis gestellt. Gegenüber konventionellen Messverfahren basierend auf Drucksonden erweist sich die im Subprozentbereich liegende Messgenauigkeit von TrackAER als gleichwertig oder besser.