ETH zürich

ETH Library

Computational visualization of physics and topology in unsteady flow

Doctoral Thesis

Author(s):
Sadlo, Filip

Publication date:
2010

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-006435276

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 No. 19284

Computational Visualization of Physics and Topology in Unsteady Flow

A dissertation submitted to
ETH Zurich

for the Degree of
Doctor of Sciences

presented by
Filip Sadlo
Dipl. Informatik-Ing. ETH Zurich
born 27. February 1972
citizen of Zurich, ZH, Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Markus Gross, ETH Zurich, examiner
Prof. Dr. Ronald Peikert, ETH Zurich, co-examiner
Prof. Dr. Gerik Scheuermann, University of Leipzig, co-examiner

2010

Abstract

Vector fields play an important role in many areas in research and engineering. This thesis originated in the context of a project with two industry partners active in turbo-machinery and is hence oriented toward this area. Nevertheless, its first part addresses generic fluid flows whereas its second part is even more universal: its subject are vector fields in general.

Design of turbo-machinery looks back on a long history. Although high efficiency is already achieved in many areas, there is still high effort in pushing efficiency some percent further. Although this seems to be a worthless undertaking at first sight, it can substantially account into the return of these machines. Especially in the field of hydropower plants, it pays off due to their typically very long operation duration. The operation of turbines depends on various factors, many of which address to the field of fluid dynamics. For the design, there is a clear trend from experiments toward computational fluid dynamics simulations. This is especially true for these decades since computing power and simulation techniques are coming to a level where experiments are almost dispensable. This leads to the situation that reliable numerical data are easily available but often hard to interpret because of their size and intricacy. This makes computational flow visualization and analysis increasingly important. The main objective of this thesis is to push computational flow visualization further toward the needs and possibilities of modern turbo-machinery design.

This thesis focuses on two fields in computational flow visualization: vortices and global structure of flows. Although vortices are beneficial in many areas of nature, from the birth of solar systems over the flight of dragonflies to the physics of our metabolism, they tend to affect technology. Although there are fields in technology that benefit from vortices such as chemical production, they lower performance and lifetime in many others, especially where relatively high velocities are involved, such as automotive engineering and energy conversion. Two approaches are presented in this thesis for the analysis of vortex creation and vortex dynamics in general. The first one bases solely on the instantaneous structure of the curl of the velocity field, the so-called vorticity, whereas the second one examines its transport over time by advection and diffusion. This can help both, the production and avoidance of vortices as well as their control in each sense, depending on the requirements and possibilities.

Understanding the global and semi-global structure of flows, or vector fields in general, gives deeper insight into many mechanisms such as transport, mixing, and residence time and therefore allows for more control and hence more focused

research and engineering. This thesis addresses this field in two sub-categories: vector field topology and Lagrangian coherent structures. As an introduction, it is shown how the visualization of flow features can benefit from topologically seeded streamlines and stream surfaces. A special vortex type, the so-called ring vortex, is the subject in the remaining research in the field of vector field topology: methods are presented for the visualization and analysis of such flow phenomena. Lagrangian coherent structures represent an alternative to vector field topology which is, in contrast, also easily applicable and interpretable for time-dependent vector fields. First, a method based on adaptive mesh refinement for ridge extraction is presented for the efficient extraction of single time frames of Lagrangian coherent structures. Finally, a method based on the advection of computational grids is presented, which exploits temporal coherence for the extraction of time series of Lagrangian coherent structures.

Kurzfassung

Vektorfelder spielen eine wichtige Rolle in vielen Bereichen der Forschung und Entwicklung. Diese Arbeit entstand im Kontext eines Projekts mit zwei Industriepartnern, welche im Bereich des Turbomaschinenbaus aktiv sind und ist deshalb auf dieses Gebiet ausgerichtet. Nichtsdestotrotz behandelt ihr erster Teil allgemeine Strömungen von Fluiden während ihr zweiter Teil noch universeller ist: er hat Vektorfelder im Allgemeinen zum Thema.

Das Design von Turbomaschinen blickt auf eine lange Geschichte zurück. Obwohl ein hohes Mass an Effizienz bereits in vielen Bereichen erreicht wurde, wird immer noch viel Aufwand betrieben, die Effizienz einige Prozent weiter zu steigern. Obwohl dies auf den ersten Blick ein wertloses Unterfangen zu sein scheint, kann es sich substanziell auf den Ertrag dieser Maschinen auswirken. Es zahlt sich insbesondere im Gebiet der Wasserkraftwerke aufgrund ihrer langen Betriebszeiten aus. Der Betrieb von Turbinen hängt von vielen Faktoren ab, viele davon zählen zum Bereich der Fluiddynamik. Hinsichtlich des Designs erkennt man einen klaren Trend weg von Experimenten hin zu Strömungssimulationen. Dies gilt besonders für diese Jahrzehnte, da Rechenleistung und Simulationsmethoden eine Güte erreichen, welche Experimente fast überflüssig machen. Dies führt zu der Situation, dass zuverlässige numerische Daten einfach verfügbar aber aufgrund ihrer Grösse und Komplexität oft schwer interpretierbar sind. Dies lässt die Bedeutung der numerischen Strömungsvisualisierung und Analyse stetig wachsen. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit ist das Vorwärtsbringen der numerischen Strömungsvisualisierung hinsichtlich der Bedürfnisse und Möglichkeiten des modernen Designs von Turbomaschinen.

Diese Arbeit konzentriert sich auf zwei Gebiete der numerischen Strömungsvisualisierung: Wirbel und die globale Struktur von Strömungen. Obwohl Wirbel in vielen Bereichen der Natur nützlich sind, von der Entstehung von Sonnensystemen über den Flug von Libellen zu der Physik unseres Stoffwechsels, neigen sie dazu den Einsatz von Technologie zu beeinträchtigen. Obwohl es in der Technik Bereiche gibt, welche von Wirbeln profitieren, wie zum Beispiel die chemische Produktion, verringern sie die Leistung und Lebensdauer in vielen anderen, insbesondere wenn vergleichsweise hohe Geschwindigkeiten im Spiel sind, wie in der Fahrzeugtechnik und Energiewandlung. In dieser Arbeit werden zwei Ansätze für die Analyse von Wirbelentwicklung und Wirbeldynamik im Allgemeinen vorgestellt. Der erste basiert ausschliesslich auf der instantanen Struktur der Rotation des Geschwindigkeitsfeldes, der sogenannten Vortizität, während der zweite deren zeitlichen Transport mittels Advektion und Diffusion untersucht. Dies kann

bei beidem, der Erzeugung wie auch der Verhinderung von Wirbeln sowie deren Kontrolle in beider Hinsicht helfen, abhängig von den Anforderungen und Möglichkeiten.

Ein Verständnis der globalen und semi-globalen Struktur von Strömungen, oder Vektorfeldern im Allgemeinen, erlaubt ein tieferes Verständnis vieler Mechanismen wie zum Beispiel Transport, Mischung und Verweildauer und erlaubt deshalb ein höheres Mass an Kontrolle und somit gezieltere Forschung und Entwicklung. Diese Arbeit behandelt dieses Gebiet in zwei Unterkategorien: Vektorfeld-Topologie und Lagrange'sche kohärente Strukturen. Als Einführung wird gezeigt, wie die Strömungsvisualisierung durch topologiebasierte Auswahl von Stromlinien und Stromflächen profitieren kann. Ein spezieller Wirbeltyp, der sogennannte Ringwirbel, ist das Forschungsthema der restlichen Forschung im Bereich der Vektorfeld-Topologie: wir stellen Methoden zur Visualisierung und Analyse solcher Strömungsphänomene vor. Lagrange'sche kohärente Strukturen stellen eine Alternative zur Vektorfeld-Topologie dar, welche, im Gegensatz, auch auf zeitabhängige Vektorfelder einfach anzuwenden und zu interpretieren ist. Zuerst stellen wir eine Methode zur effizienten Extraktion von Lagrange'schen kohärenten Strukturen in isolierten Zeitfenstern vor, welche auf adaptiver Verfeinerung von Gittern zur Extraktion von Graten basiert. Schlussendlich stellen wir eine Methode für die Extraktion von Zeitserien von Lagrange'schen kohärenten Strukturen vor, welche die zeitliche Kohärenz ausnutzt, indem sie das Rechengitter advektiert.