



Doctoral Thesis

3D simulations of vortex dynamics and biolocomotion

Author(s):

Rees, Willem M. van

Publication Date:

2014

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010414707> →

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. 22233

3D simulations of vortex dynamics and biolocomotion

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

presented by

WILLEM MARINUS VAN REES

M.Sc., Delft University of Technology
born on October 29th, 1983
citizen of the Netherlands

accepted on the recommendation of

Prof. P. Koumoutsakos, examiner
Prof. J.O. Dabiri, co-examiner
Prof. A. Leonard, co-examiner

2014

Abstract

Vortical flows are crucial in applications ranging from aircraft takeoff to fish swimming. Numerical flow simulations can increase our understanding of such phenomena in order to improve the performance of engineering devices and characterize natural processes. Yet simulations of unsteady 3D flows on modern computer architectures face several challenges. The accuracy and validity of the numerical methods need to be established before physical processes can be predicted with confidence. Efficient simulations demand high-performance software that can adapt computational elements according to the spatiotemporal scales in the flow. Physical relevance is obtained only when the resulting flow data is translated into knowledge of the dominating structures and interactions through analysis and post-processing. In this work, we contribute to each of these issues.

We use the remeshed vortex method for the simulation of selected 3D flow cases. We validate the method with vortex dynamics computations at various Reynolds numbers, and show that similar accuracy to the established pseudo-spectral method can be achieved. The solver is then applied to vortex reconnection, a mechanism for energy decay in turbulent flows, at an unprecedented Reynolds number of 10^4 . An analysis of the results uncovers novel flow features such as axial flow generation and secondary reconnection instabilities.

The solver is extended with fluid-structure interaction capabilities and coupled to an optimization algorithm to create a versatile reverse-engineering framework. This approach is then used to identify the optimally fast and efficient morphologies and kinematics of 3D undulatory swimmers. The optimal solutions outperform a natural reference swimmer by reaching almost three times higher speeds and over four times higher efficiencies. We investigate how the optimal swimmers manipulate the fluid to accomplish these feats.

Lastly, we develop a 3D multiresolution remeshed vortex method to improve the computational efficiency of fluid-structure interaction simulations. It is designed for high performance on modern compact compute platforms and employs a hybrid CPU/GPU velocity solver. The software enables the first ever computation multiple 3D self-propelled swimmers and their hydrodynamic interactions, achieved using only four compute nodes.

Zusammenfassung

Wirbelströmungen spielen eine wichtige Rolle in so verschiedenen Prozessen wie Flugzeugstarts oder schwimmenden Fischen. Strömungssimulationen können unser Wissen und Verständnis solcher Strömungen vertiefen, und damit natürliche Prozesse erklären oder die Leistung technischer Anwendungen verbessern.

Simulationen von instationären 3D Strömungen auf modernen Computern bergen mehrere Herausforderungen. So muss die Genauigkeit der numerischen Methoden nachgewiesen werden, bevor physikalische Prozesse zuverlässig vorausgesagt werden können. Effiziente Simulationen benötigen ausserdem Hochleistungssoftware und die Möglichkeit, Rechenelemente den raumzeitlichen Skalen der Strömung anzupassen. Physikalisch sinnvolle Aussagen sind am Ende nur möglich, wenn ein Verständnis durch sorgfältige Analyse und Nachbearbeitung der resultierenden Strömungsdaten hergestellt wird.

In der vorliegenden Arbeit verwenden wir die ‘Remeshed-Vortex-Methode’ um ausgewählte 3D Strömungen zu simulieren. Wir zeigen die Genauigkeit der Methode für Wirbelströmungen im Vergleich zu einer gut validierten ‘Pseudo-Spektral-Methode’. Dann simulieren wir ‘Vortex Reconnection’ – die Verbindung zweier Wirbelrohre – und untersuchen ihre Rolle für den Energiezerfall in turbulenten Strömungen.

Die numerische Methode wurde mit Fluid-Struktur-Interaktion Techniken erweitert und mit einem evolutionären Optimierungsalgorithmus kombiniert. Mit dieser Reverse-Engineering Rahmenstruktur finden wir die schnellsten und effizientesten Formen und Bewegungen für 3D Schwimmer. Unsere optimalen Schwimmer erreichen fast dreimal höhere Geschwindigkeit oder mehr als viermal höhere Effizienz als gewisse existierende Fische. Wir analysieren die Wirbel und Fließstrukturen um zu erklären, wie diese optimalen Schwimmer die Strömung für ihre Leistung nutzen.

Schliesslich entwickelten wir einen 3D-Multi-Resolutions-Solver für die ‘Remeshed-Vortex-Methode’, um solche Fluid-Struktur-Interaktions-Probleme effizienter simulieren zu können. Die Software wurde so entworfen, dass sie auf modernen Computern inklusive Grafikkarten eine hohe Leistung erreicht. Mit diesem Solver konnten wir erstmals die hydrodynamischen Interaktionen zwischen mehreren 3D Schwimmern simulieren.