

ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ИНЖЕНЕРНОМ АНАЛИЗЕ

Лекция 7

Болдырев Ю.Я., Замотин К.Ю., Петухов Е.П.

Санкт-Петербургский Государственный
Политехнический Университет

boldyrev@phmf.spbstu.ru

Суперкомпьютерные приложения к инженерному и естественнонаучному анализу

2

- Опираясь на работы последних лет, приведем ряд наиболее интересных и характерных решений (или их ключевых фрагментов), использующих рассмотренные на предыдущей лекции вычислительные технологии
- High Performance Computing in Science and Engineering '11. Transactions of the High Performance Computing Center (Wolfgang E. Nagel, Michael M. Resch, Dietmar B. Kröner), 2011

Численное моделирование взлета вертолета, его полетных характеристик и дифферента

3

- Работа выполнена сотрудниками института Аэродинамики и газовой динамики (IAG) Штудгардского университета (Felix Bensing, Martin Embacher, Martin Hollands, и др.)
- Поставленные задачи
 - / рассмотреть численное моделирование изолированного несущего винта вблизи поверхности земли
 - / рассмотреть проблему оптимизации геометрии лопасти несущего винта
 - / рассмотреть обтекание всего вертолета в условиях свободного полета

Численное моделирование взлета вертолета, его полетных характеристик и дифферента

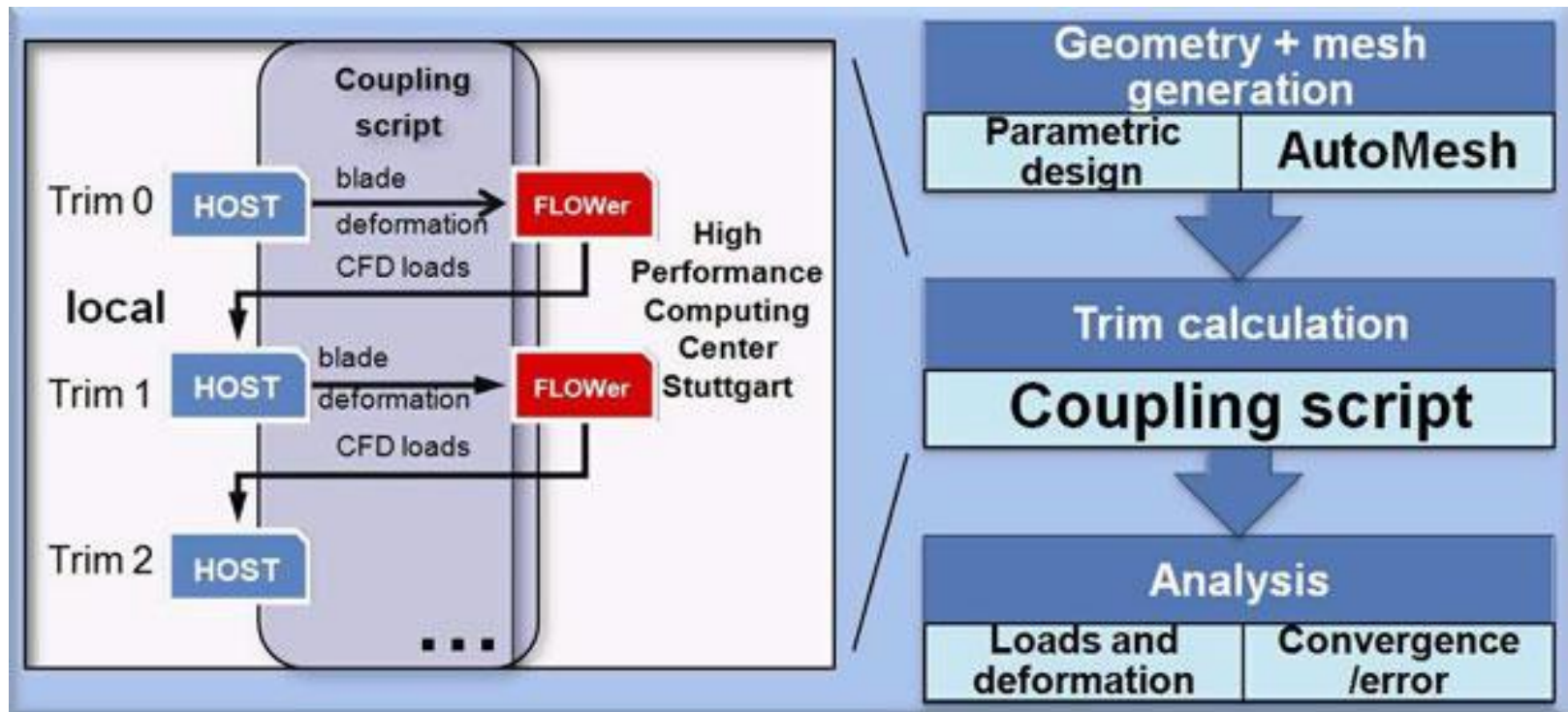
4

- Проблема оптимизации геометрии лопасти несущего винта рассматривается как корректная междисциплинарная (fluid-structure coupling procedure – процедура, рассматривающая аэроупругую пару)
- Для аэродинамических расчетов авторы используют модель RANS, реализуемую на многоблочной сетке и построенную на методе конечных объемов со вторым порядком точности на центральных разностях (программный комплекс FLOWer)

Численное моделирование изолированного несущего винта

5

Стыковка CFD и CSD вычислительных технологий: метод сильной связи, аэродинамическая нагрузка и деформации рассматриваются на каждом временном шаге



Численное моделирование изолированного несущего винта

6

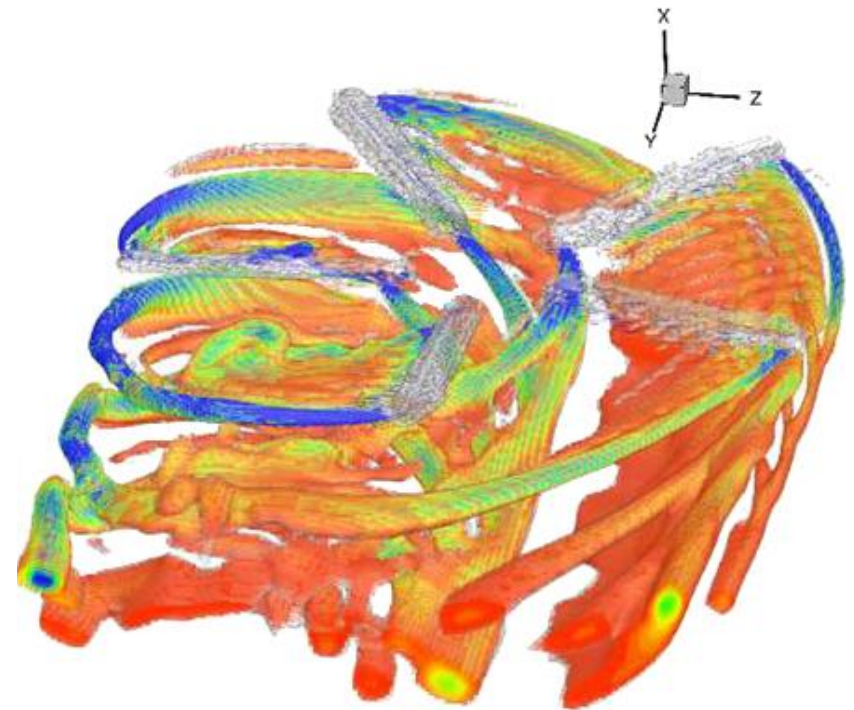
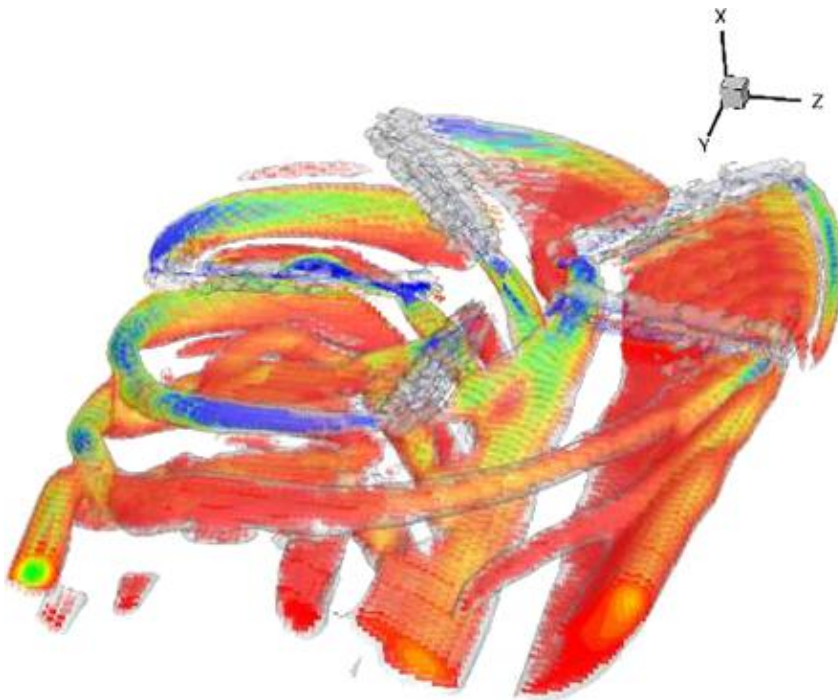
Параметры вычислительной процедуры на
различных сетках

Качество сетки	Число ячеек (Млн.)	Число блоков сетки	Число итераций по шагу времени	Кол- во узлов	Кол- во ядер	Полное время расчета (Сек)	Память на ядро, МВ	GFLOP/S на ядро
грубая	8.166	278	79	11	77	60142	368	4.61
средняя	18.172	310	75	17	136	79123	522	4.58
хорошая	39.797	450	79	30	210	121392	798	4.44

Численное моделирование изолированного несущего винта

7

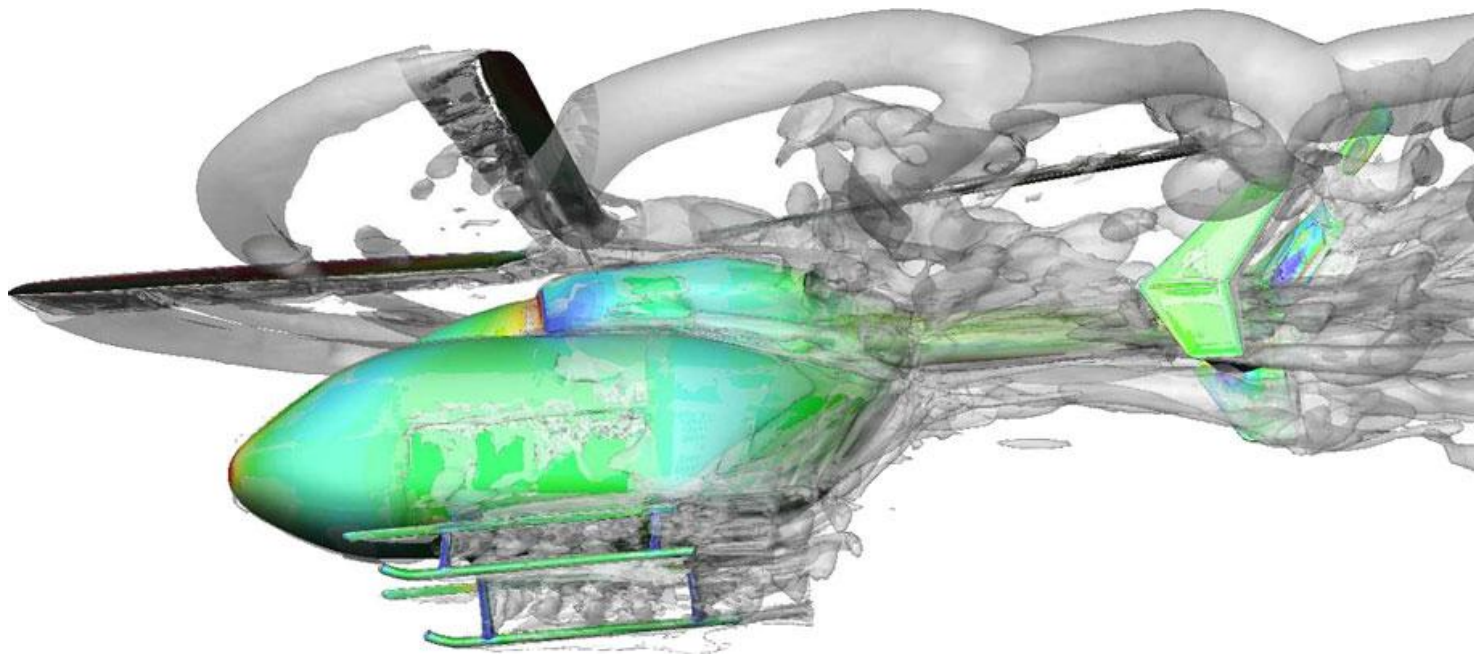
Поле завихренности при расчетах изолированного несущего винта на грубой (слева) и мелкой (справа) сетках



Численное моделирование изолированного несущего винта

8

Полученное с помощью комплекса FLOWer взаимодействие следа несущего винта со следом от фюзеляжа вертолета, максимальное число используемых ядер не превосходит 210



Применение разрывного метода Галеркина для высокопроизводительных вычислений в гидродинамике

9

- Авторы работы – сотрудники Института Аэродинамики и газовой динамики (IAG) Штутгардского университета Christoph Altmann, Andrea Beck, Andreas Birkefeld и др.
- Представленные вычислительные схемы применяются для прямого численного моделирования изотропной турбулентности, турбулентного течения в канале и LES моделирования кавитации
- Число задействованных в расчетах вычислительных ядер меняется в диапазоне от сотен до тысяч

Преимущества метода DG

10

- DG схема хорошо программируется на современных процессорных архитектурах при рациональной организации доступа к памяти
- При выполнении вычислений DG выгодно отличается от традиционных методов, особенно при использовании полиномов высокой степени при аппроксимации
- Проводилось сравнение неструктурированной программы HALO (Highly Adaptive Local Operator), разработанной авторами на основе DG схемы, и структурированной программы STRUKTI с разработанной на основе метода конечных разностей программой NS3D для решения трехмерных уравнений Навье-Стокса с учетом сжимаемости
- Сравнения показывают эффективность развиваемого подхода в части процессорного времени, а также высокую эффективность в масштабировании вычислительной процедуры.

Преимущества метода DG

11

- При использовании DG схемы в программе STRUKTI исследовалось масштабирование с числом процессоров до 512 в сравнении с классическими конечно-разностными методами в рамках изучения параллельной эффективности
- Было получено ускорение, составляющее примерно 70% от теоретического (ускорение в 512 раз, без учета межпроцессорных связей и обращений к памяти)

Математическая основа DG схемы

12

- Комбинация методов конечных объемов (FV) и конечных элементов (FE)
- Аппроксимация решения – полином в каждой ячейке сетки, на границах ячеек решение может терпеть разрыв
- Скачки на границах разрешаются известным в методе конечных объемов методом Римана
- DG схемы могут использоваться на крупных (грубых) сетках
- Главное достоинство разрывного метода Галеркина – высокая точность сохраняется даже на сильно «перекошенных» и нерегулярных сетках

Пример 1: Вихри Тейлора-Грина

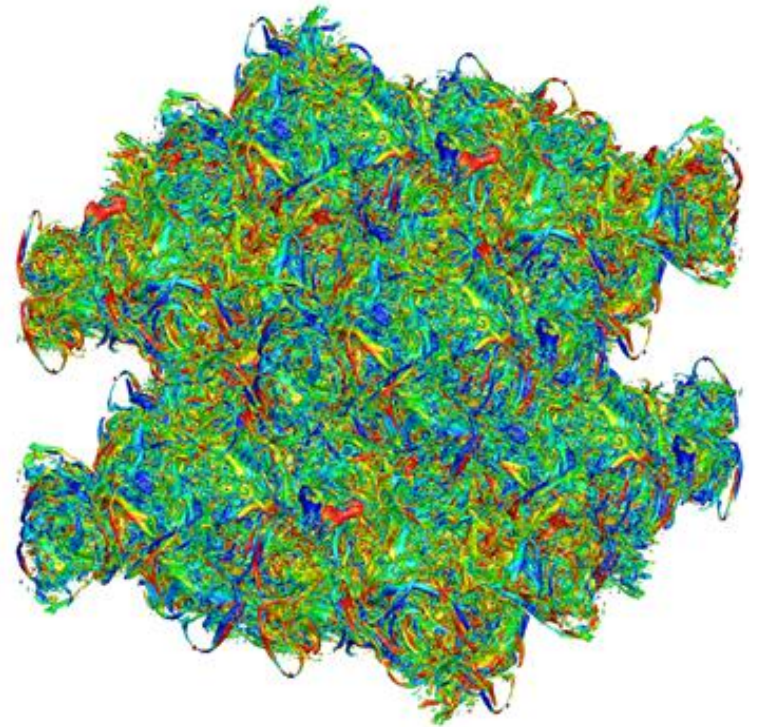
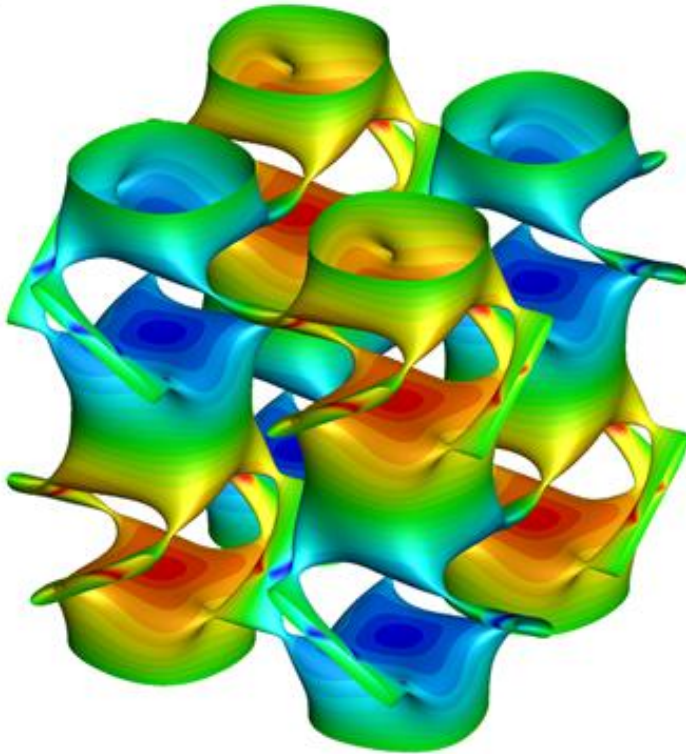
13

- Моделирование на основе DNS and LES изотропной турбулентности
- Классическая проблема вихрей Тейлора-Грина – простейший пример течения, для которого «каскад турбулентной энергии» может быть рассмотрен в рамках численного моделирования
- Поле течения испытывает быстрое разрастание полного турбулентного диссипативного спектра течения с нелинейным взаимодействием развивающихся вихрей

Пример 1: вихри Тейлора-Грина

14

Развитие турбулентности на основе взаимодействия развивающихся вихрей ($Re = 5000$), слева $t=1$ с, справа $t=9$ с



Пример 2: моделирование турбулентного течения в канале

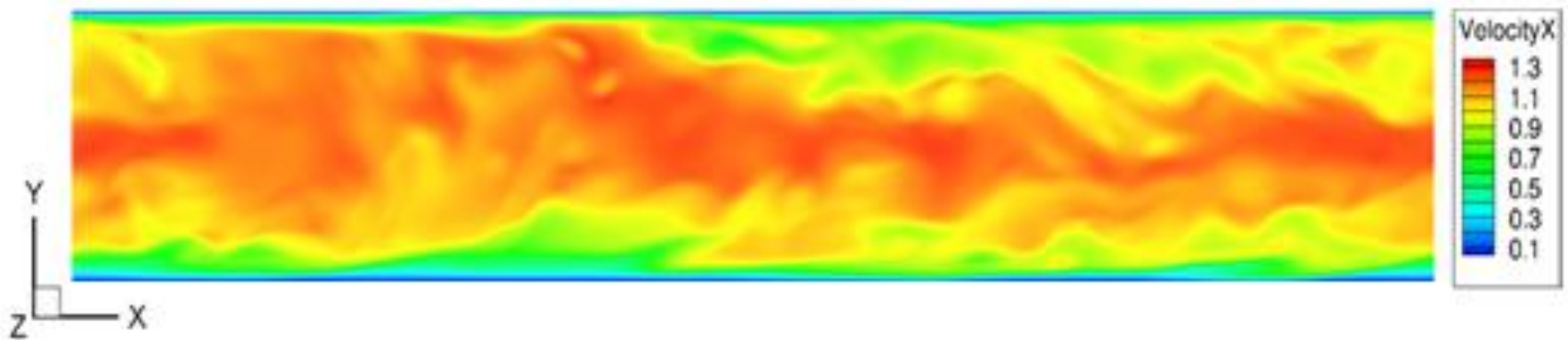
15

- Вычислительная область: $0 \leq x \leq 4\pi$, $0 \leq z \leq 4/3\pi$, $-1 \leq y \leq 1$
- На границах области постоянная температура, условия периодичности
- Течение устанавливалось с использованием ламинарного профиля скорости в направлении оси x и с наложением случайной помехи
- Число Маха 0,5 и 1,5; число Рейнольдса от $Re=3000$ до $Re=4880$
- Сетка 286 и 720 элементов четвертого порядка точности с 35,84 миллионами степеней свободы
- Средний размер временного шага $\Delta t_{avg}=1,194 \times 10^{-4}$
- Использовалось 1000 процессоров, работающих в параллельном режиме при полном времени расчета 24 часа. При этом была получена производительность 1,5 TFlop/s.

Пример 2: моделирование турбулентного течения в канале

16

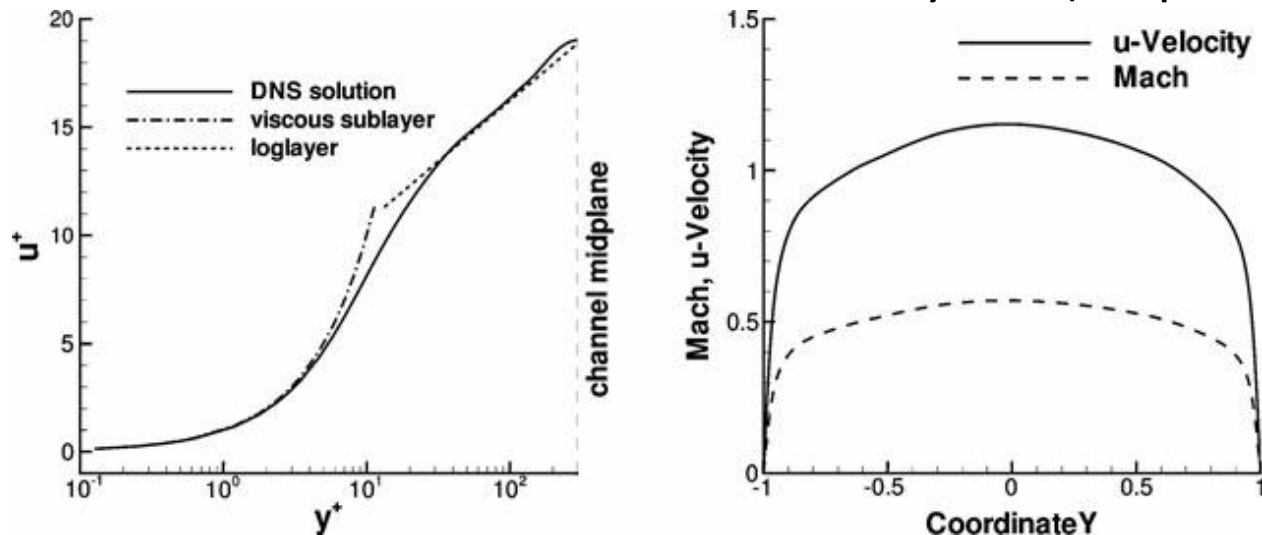
Тонкий мгновенный срез поля скорости x компоненты течения при числе Маха 1,5. Хорошо просматриваются как турбулентные структуры, так и пристеночный пограничный слой.



Пример 2: моделирование турбулентного течения в канале

17

Величины x компоненты скорости течения u и числа Маха в направлении нормальном к стенке. Профили являются типичными для пристеночных турбулентных течений: скорости и числа Маха отчетливо показывают максимум в центре канала.



Слева: пристеночный профиль скорости. Справа: пространственно – временное осредненное значение величины скорости. (Число Маха 0.5, число Рейнольдса $Re=4880$).

Литература

18

- High Performance Computing in Science and Engineering '11. Transactions of the High Performance Computing Center (Editors Wolfgang E. Nagel, Michael M. Resch, Dietmar B. Kröner), Stuttgart (HLRS) 2011. P. 649.
- Kroll, N., Eisfeld, B., Bleecke, H.M.: FLOWer, Notes on Numerical Fluid Mechanics, Vieweg, Braunschweig, Germany, Vol. 71, pp. 58–68, 1999.
- Schwarz, Th.O.: Ein blockstrukturiertes Verfahren zur Simulation der Umströmung komplexer Konfigurationen, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Universität Braunschweig, PhD Thesis, 2005.
- Benoit, B., Dequin, A.-M., Kampa, K., Grunhagen, W., Basset, P.-M., Gimonet, B.: HOST, a General Helicopter Simulation Tool for Germany and France, American Helicopter Society, 56th Annual Forum, Virginia Beach, Virginia, USA, 2000.

Литература

19

- Altmikus, A., Wagner, S., Beaumier, P., Servera, G.: A Comparison: Weak Versus Strong Modular Coupling for Trimmed Aeroelastic Rotor Simulations, American Helicopter Society, 58th Annual Forum, Montreal, Canada, 2004.
- J. S. Hesthaven and T. Warburton, Nodal Discontinuous Galerkin Methods: Algorithms, Analysis, and Applications, 1st Edition, Springer, Berlin, 2007.
- F. Hindenlang, G. Gassner, T. Bolemann and C.-D. Munz, Unstructured high order grids and their application in discontinuous Galerkin methods, Conference Proceedings, V European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2010, Lisbon, Portugal.
- S. Orszag, Numerical simulation of the Taylor-Green vortex, Computing Methods in Applied Sciences and Engineering Part 2, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 11, pp. 50–64, (1974).

Литература

20

- D. Fauconnier, Development of a Dynamic Finite Difference Method for Large-Eddy Simulation, PhD thesis, University of Gent, Belgium, (2009).
- G. N. Coleman, J. Kim and R. D. Moser, A numerical study of turbulent supersonic isothermal wall channel flow, J. Fluid Mech., Vol. 305, pp. 159–183, (1995).
- E. Lenormand, P. Sagaut and L. Ta Phuoc, Large eddy simulation of subsonic and supersonic channel flow at moderate Reynolds number, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol. 32, pp. 369–406, (2000).