

Active control and drag reduction in turbulent wall flows

Fulvio Martinelli¹ Maurizio Quadrio¹ Paolo Luchini²

(1) Dipartimento Ing. Aerospaziale, Politecnico di Milano

(2) Dipartimento Ing. Meccanica, Università di Salerno

CAPI 2007 - Milano
15-16 Ottobre 2007

Sommario

Introduzione: turbolenza e controllo

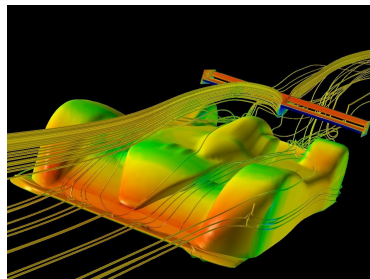
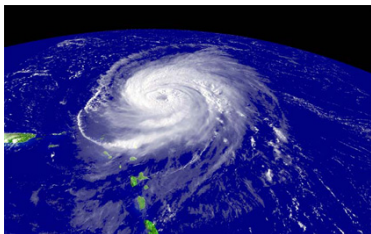
Problema modello e approccio

Risultati e conclusioni

Cos'è la turbolenza?



Cos'è la turbolenza?



Caratteristiche dei flussi turbolenti

- ▶ Assenza di separazione delle scale
- ▶ Tridimensionalità
- ▶ Non stazionarietà
- ▶ Dinamica caotica

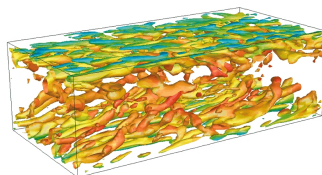
Turbolenza e tecnologia

I flussi turbolenti sono dovunque!

- ▶ Flusso d'aria su aeroplani, automobili, motocicli, imbarcazioni
- ▶ Flusso d'acqua su sottomarini, imbarcazioni
- ▶ Processi di combustione
- ▶ Oleodotti e gasdotti
- ▶ Flusso nei vasi sanguigni e nelle alte vie respiratorie
- ▶ Atmosfera

Turbolenza di parete

Tutti i flussi di interesse applicativo si sviluppano vicino a corpi solidi (pareti).



La presenza della parete è il **motore** della turbolenza. È **fondamentale** studiare la dinamica dei flussi turbolenti in prossimità di pareti solide.

Controllo della turbolenza

Perché?

- ▶ Riduzione dei consumi nei trasporti aerei e marini
- ▶ Riduzione di emissioni inquinanti nei processi di combustione
- ▶ Aumento dell'efficienza in processi industriali e farmaceutici

Ne vale la pena?

Un esempio: aereo da trasporto civile

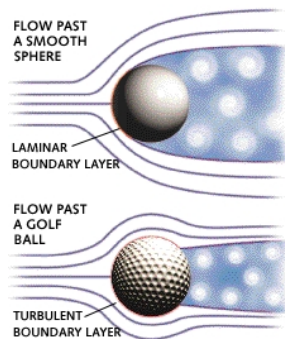
- ▶ Riduzione del 10% della resistenza = aumento del **40%** del margine di profitto della compagnia aerea.
- ▶ Considerando l'intera flotta civile mondiale: risparmio di \approx 7 miliardi di dollari/anno

Fonti: Scientific American (1997) & U.S. National Committee on Theoretical and Applied Mechanics, 2006

Controllo della turbolenza

Tecniche passive

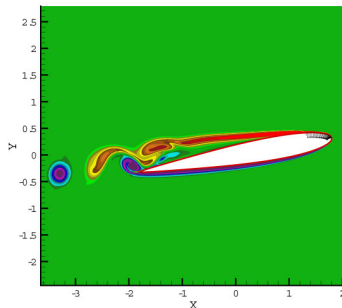
- ▶ Non richiede ingresso di energia nel sistema
- ▶ Tipicamente: progetto appropriato di forme e superfici



Controllo della turbolenza

Tecniche attive in anello aperto

- ▶ Richiedono una spesa energetica (attuatori)
- ▶ Esempio: aspirazione dello strato limite su profili alari

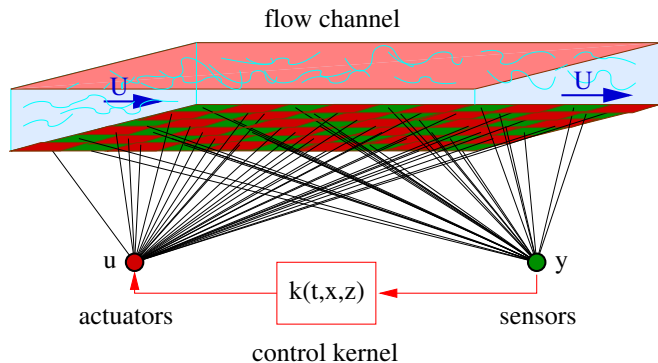


Controllo della turbolenza

Tecniche attive in **retroazione**

- ▶ Richiedono una spesa energetica (attuatori)
- ▶ Richiedono misure (sensori)
- ▶ Richiedono una legge di controllo
- ▶ Esempio: soffiamento - aspirazione a parete sulla base di misure di attrito

Controllo in retroazione di flussi turbolenti



Stato dell'arte

- ▶ Approccio esclusivamente computazionale
- ▶ Soluzione numerica **diretta** delle equazioni di Navier-Stokes (no modelli di turbolenza!)
- ▶ Utilizzo della teoria del **controllo ottimo** (sviluppata nell'ambito della meccanica e dell'elettronica)

Gruppi di ricerca coinvolti:

- ▶ Politecnico di Milano - Università di Salerno (Prof. M. Quadrio, Prof. P. Luchini)
- ▶ University of California, San Diego (Prof. T. Bewley)

Simulazione numerica diretta (DNS) della turbolenza di parete

- ▶ Problema modello: flusso turbolento fra due lastre piane
- ▶ Geometria semplice: simulazioni accurate a Reynolds moderati
- ▶ Nessun modello di turbolenza: centinaia di milioni di gradi di libertà
- ▶ Formulazione: Quadrio & Luchini (JCP, 2006)

Progetto dei sistemi di controllo

- ▶ Tecnica di controllo: soffiamento-aspirazione a parete
- ▶ Progetto: basato sulla teoria del controllo ottimo **lineare**
- ▶ Anche il progetto del controllore richiede supercomputers!

Personal Supercomputer

- ▶ Cluster **ottimizzato** per la DNS nel canale piano e nel tubo circolare
- ▶ 268 dual-CPU dual-core processori AMD Opteron
- ▶ Networking hardware economico da 1 Gb
- ▶ 300 GB di memoria complessiva
- ▶ 40 TB di spazio disco
- ▶ Potenza di picco: 2.6 TFlops



Personal Supercomputer



Personal Supercomputer

Confronto alternativo

.	Earth Simulator	Personal Supercomputer
Efficienza energetica	3 Flops/Watt	70 Flops/Watt
Efficienza economica	1 MFlops / euro	10 MFlops / euro

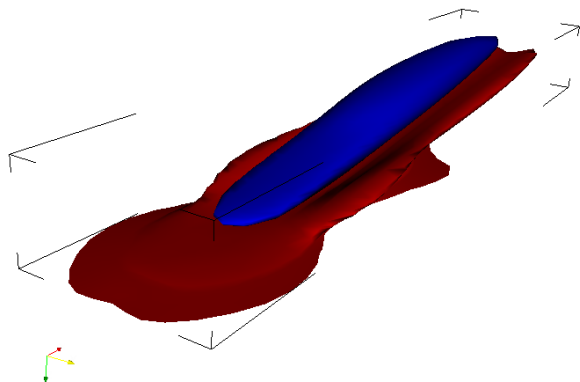
Simulazioni effettuate

Controllo di tipo **full-state**

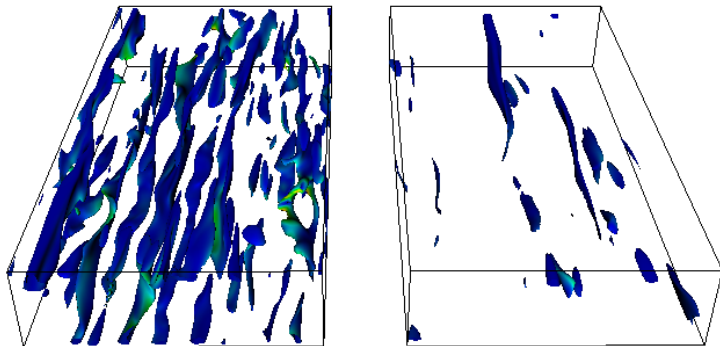
Re	N
2200	$\approx 10^6$
5000	$\approx 10^7$
10500	$\approx 10^8$

Progetto del controllore

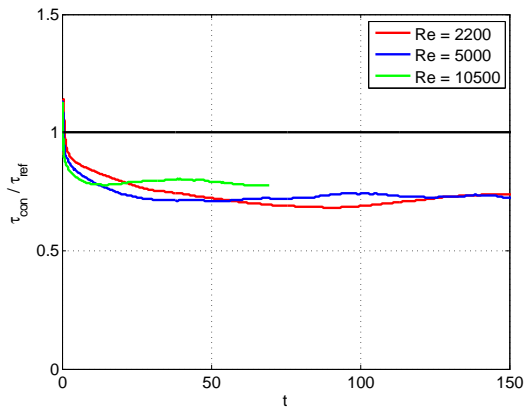
Nucleo di convoluzione



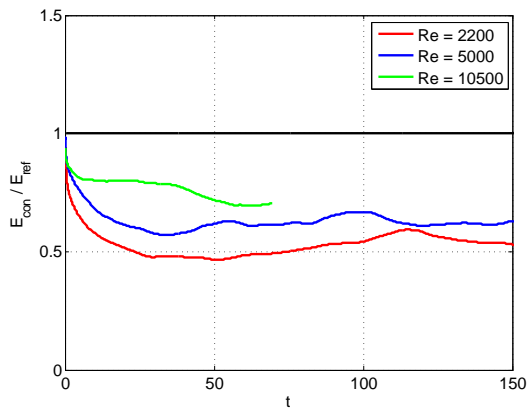
Effetto del controllo sulle strutture turbolente



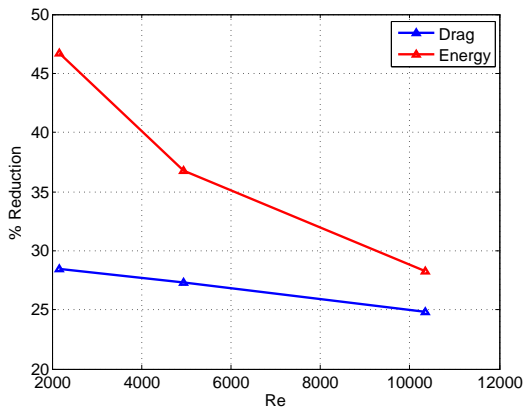
Riduzione della resistenza



Riduzione dell'energia cinetica turbolenta



Effetto Re



Conclusioni e prospettive

- ▶ Interesse ingegneristico nel **controllo** di flussi turbolenti
- ▶ Il controllo **attivo** in **retroazione** è una tecnica promettente
- ▶ Le prestazioni sono buone anche a Re moderati
- ▶ Necessità (oggi) di supercalcolatori
- ▶ Domani?