



Risultati del Progetto STOPP

Un approccio multidisciplinare al monitoraggio ambientale multi-scala attraverso bioindicatori vegetali

Caratterizzazione, modellazione e controllo automatico di una piattaforma stratosferica ibrida HAPS

P. Gili, A. Lerro, L. de Pasquale - POLITO



Centro Italiano Ricerche Aerospaziali



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DELLA
TUSCIA



Politecnico
di Torino



ASI, Roma, 22 maggio 2025

Scopo dell'attività

Sviluppo di un **tool di simulazione dinamica** per una piattaforma stratosferica ibrida.

Questo è composto da due parti fondamentali:

1. **Modello dinamico** della piattaforma stratosferica ibrida
2. **Algoritmo di Guida, Navigazione e Controllo** che permetta alla piattaforma di seguire autonomamente una traiettoria desiderata.



Scopo dell'attività

Sviluppo di un **tool di simulazione dinamica** per una piattaforma stratosferica ibrida.

Questo è composto da due parti fondamentali:

1. **Modello dinamico** della piattaforma stratosferica ibrida
2. **Algoritmo di Guida, Navigazione e Controllo** che permetta alla piattaforma di seguire autonomamente una traiettoria desiderata.

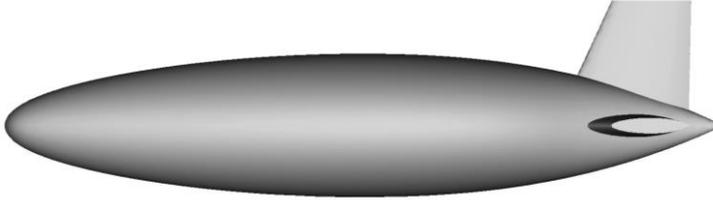
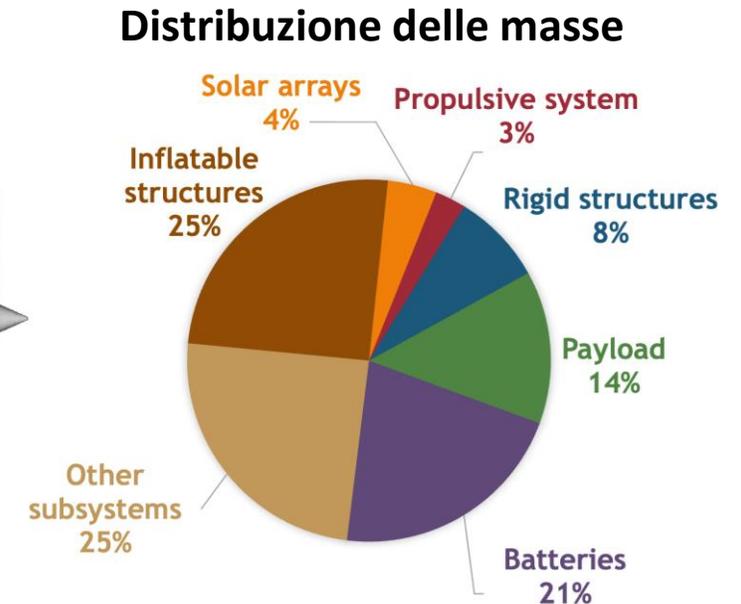


Configurazione della piattaforma HAPS

La configurazione selezionata per lo studio è la piattaforma stratosferica ibrida progettata dal CIRA in [1].

Requisiti di Missione	
Payload	25 kg
Quota operativa	
Durata missione	
Velocità di crociera	
Durata notturna	
Sistema energetico	Fotovoltaico + batterie

Modello CAD

[1] V. Baraniello, G. Persechino, and R. Borsa. Tools for the conceptual design of a stratospheric hybrid platform. In SAE Technical Paper 2020-01-0025, 2020

INPUT

Caratterizzazione

Modellazione

GNC

OUTPUT

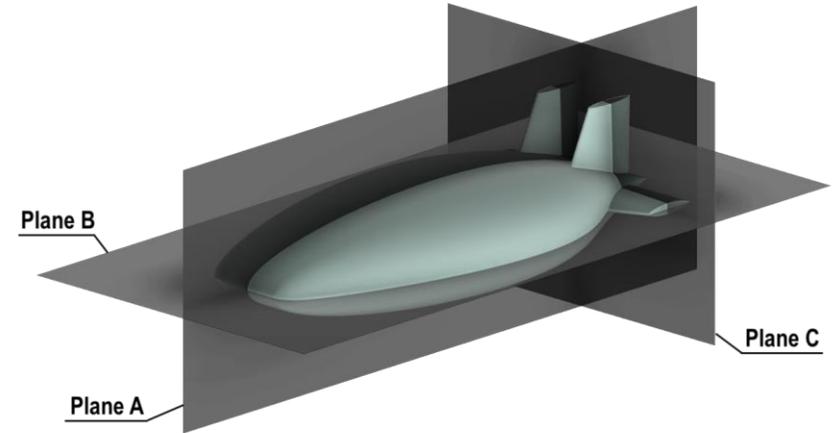
Risultati del Progetto STOPP

Caratterizzazione della piattaforma

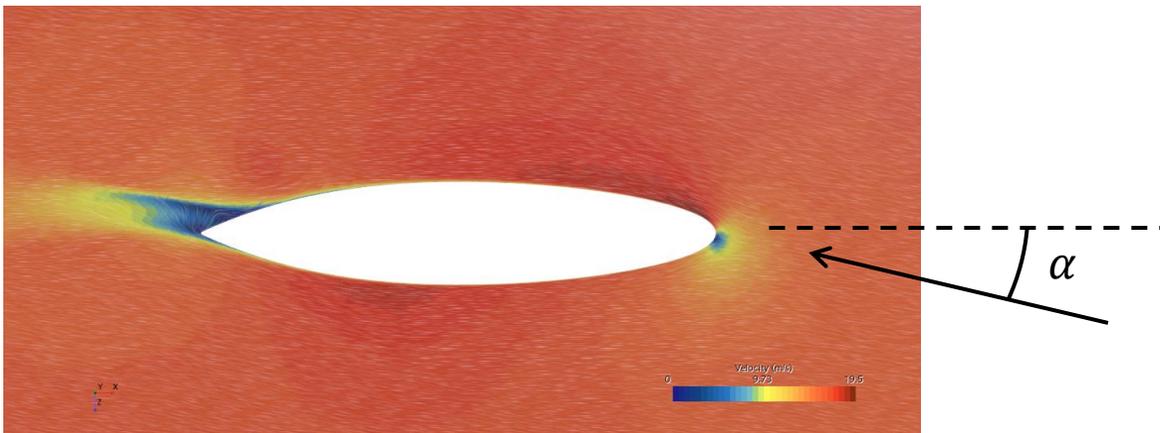
È stato necessario determinare le seguenti caratteristiche:

Aerodinamica

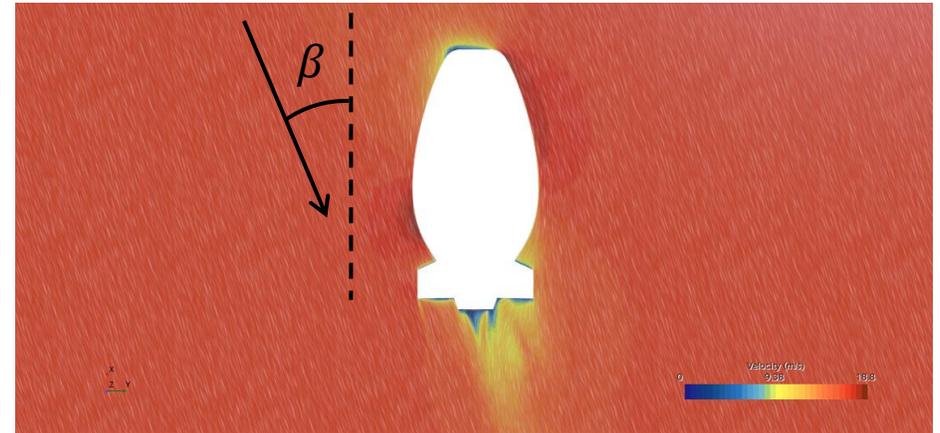
- Simulazioni CFD (velivolo completo)
- Analisi potenziale bidimensionale (superfici di controllo)



Piano A



Piano B



INPUT

Caratterizzazione

Modellazione

GNC

OUTPUT

Risultati del Progetto STOPP

Caratterizzazione della piattaforma

È stato necessario determinare le seguenti caratteristiche:

Aerodinamica

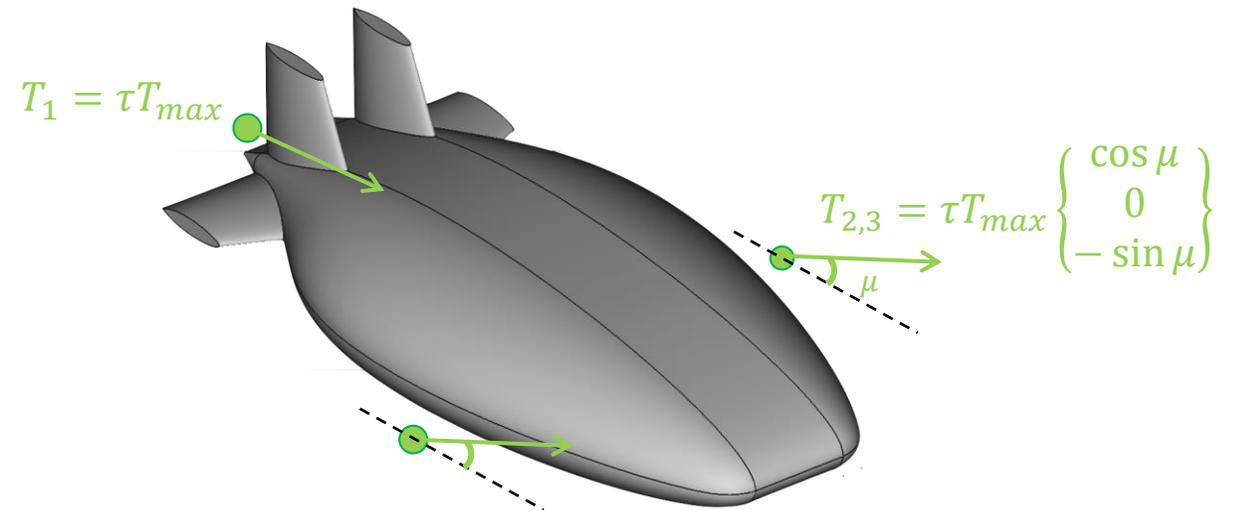
- Simulazioni CFD (velivolo completo)
- Analisi potenziale bidimensionale (superfici di controllo)

Propulsione

- Modello di spinta
- Posizione dei propulsori

Sistema propulsivo

- Un propulsore posteriore fisso (1)
- Due propulsori anteriori mobili (2,3)



INPUT

Caratterizzazione

Modellazione

GNC

OUTPUT

Risultati del Progetto STOPP

Caratterizzazione della piattaforma

È stato necessario determinare le seguenti caratteristiche:

Aerodinamica

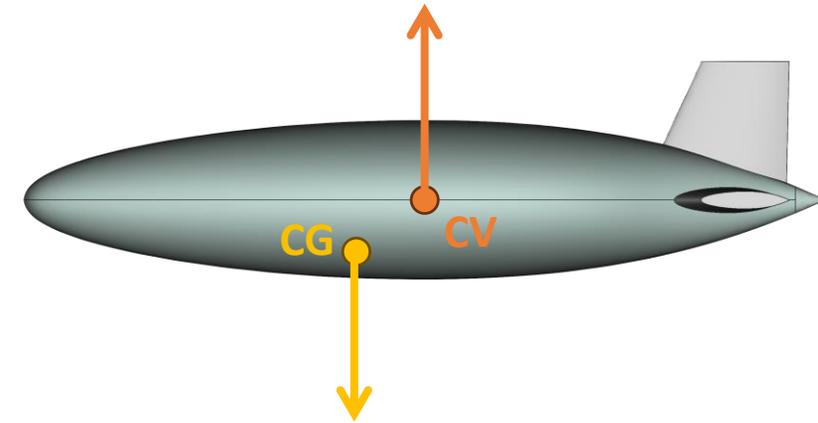
- Simulazioni CFD (velivolo completo)
- Analisi potenziale bidimensionale (superfici di controllo)

Propulsione

- Modello di spinta
- Posizione dei propulsori

Aerostatica e gravità

- Forza aerostatica (centro di volume)
- Forza peso (centro di massa)



La forza aerostatica è:

- funzione del **volume** della piattaforma e della **differenza di densità** tra gas interno e aria esterna
- applicata nel **centro di volume (CV)**, funzione della forma

La forza peso:

- dipende dalla **distribuzione della massa**
- è applicata nel **baricentro (CG)**, incognito

INPUT

Caratterizzazione

Modellazione

GNC

OUTPUT

Risultati del Progetto STOPP

Modellazione della piattaforma

Il modello dinamico della piattaforma HAPS si basa sulle seguenti ipotesi:

- Massa costante
- Corpo rigido
- Simmetria rispetto al piano XZ
- Terra piatta e inerziale

$$\begin{bmatrix} m\mathbf{1} + \mathbf{M}' & -m[\tilde{\mathbf{r}}_{CG}] \\ m[\tilde{\mathbf{r}}_{CG}] & \mathbf{I} + \mathbf{I}' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_{CV} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{M} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_D \\ \mathbf{M}_D \end{Bmatrix}$$

\mathbf{V}_{CV} : velocità lineare del CV

$\boldsymbol{\omega}$: velocità angolare

\mathbf{F}, \mathbf{M} : risultanti di forze e momenti esterni

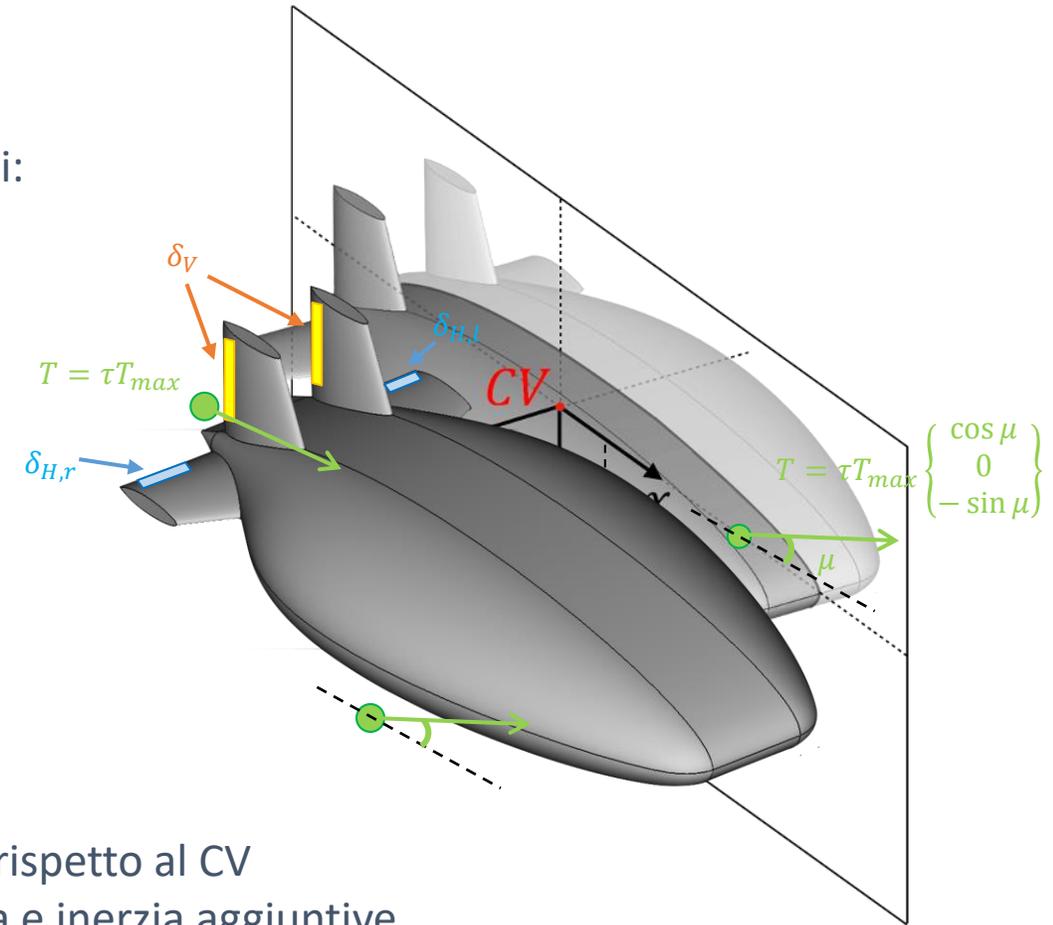
$\mathbf{F}_D, \mathbf{M}_D$: forze e momenti non inerziali

m : massa

\mathbf{I} : matrice di inerzia

\mathbf{r}_{CG} : posizione del CG rispetto al CV

\mathbf{M}', \mathbf{I}' : matrici di massa e inerzia aggiuntive



INPUT

Caratterizzazione

Modellazione

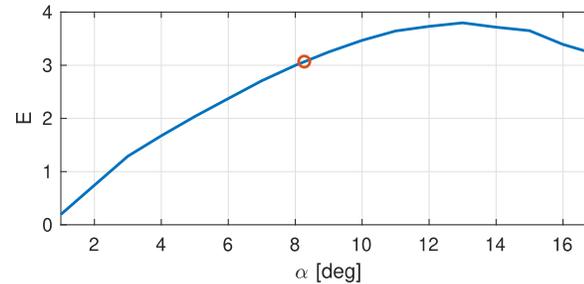
GNC

OUTPUT

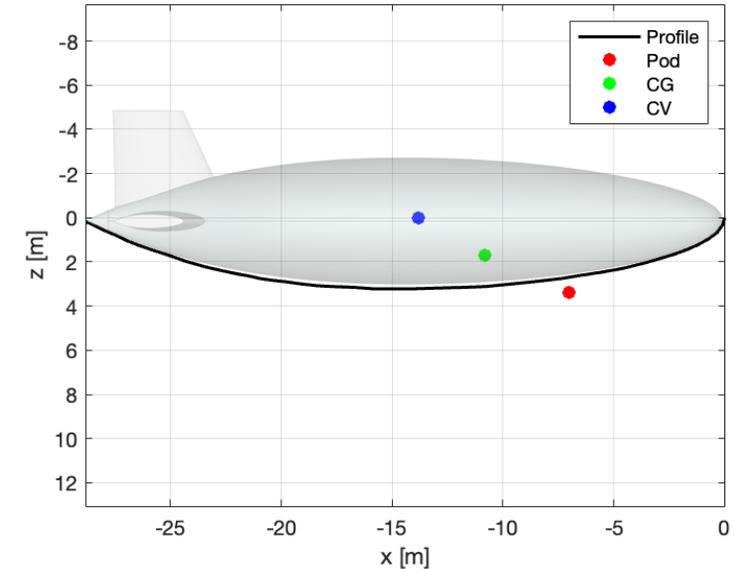
Modellazione della piattaforma

La posizione del **baricentro ottimale** è stata determinata tramite una procedura iterativa tale da ottenere una condizione di equilibrio che rispettasse le seguenti condizioni:

- Angolo d'attacco prossimo alla condizione di **massima efficienza aerodinamica**
- Superfici di controllo mobili prossime alla propria **posizione neutra**
- Manetta **minima**



Parametro	Valore
Angolo d'attacco	8.27°
Manetta	64%
Deflessione equilibratore	-0.19°
Angolo di orientamento della spinta	-0.05°



INPUT

Caratterizzazione

Modellazione

GNC

OUTPUT

Risultati del Progetto STOPP

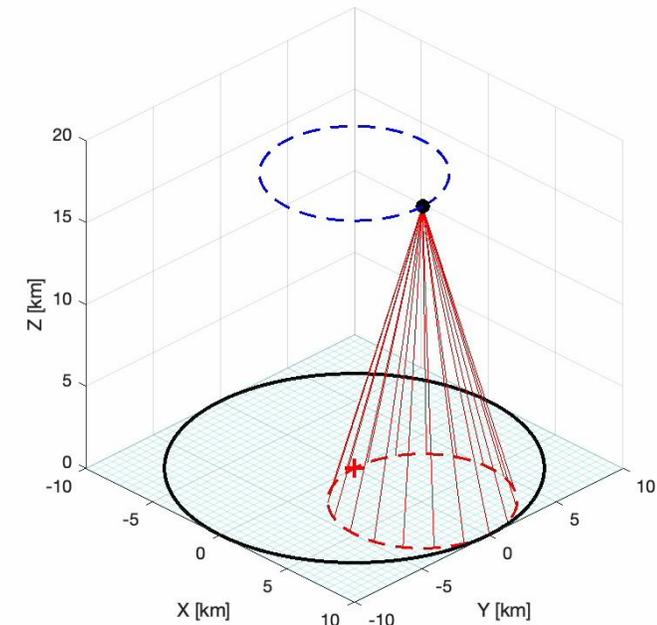
Sottosistema GNC

Lo scopo del sottosistema GNC è di permettere il controllo della piattaforma tramite il comando di una **traiettoria desiderata**, che la piattaforma dovrà essere in grado di seguire autonomamente.

La traiettoria desiderata di riferimento è una traiettoria di “**loitering**”, che permette di coprire un’area di osservazione la cui estensione dipende da:

- Quota della piattaforma
- Raggio della traiettoria
- Ampiezza del campo visivo del sensore (FOV)

Parametro	Valore
Raggio della traiettoria	5 km
Quota	18 km
Campo visivo del sensore	30°
Area di osservazione	315 km ²



INPUT

Caratterizzazione

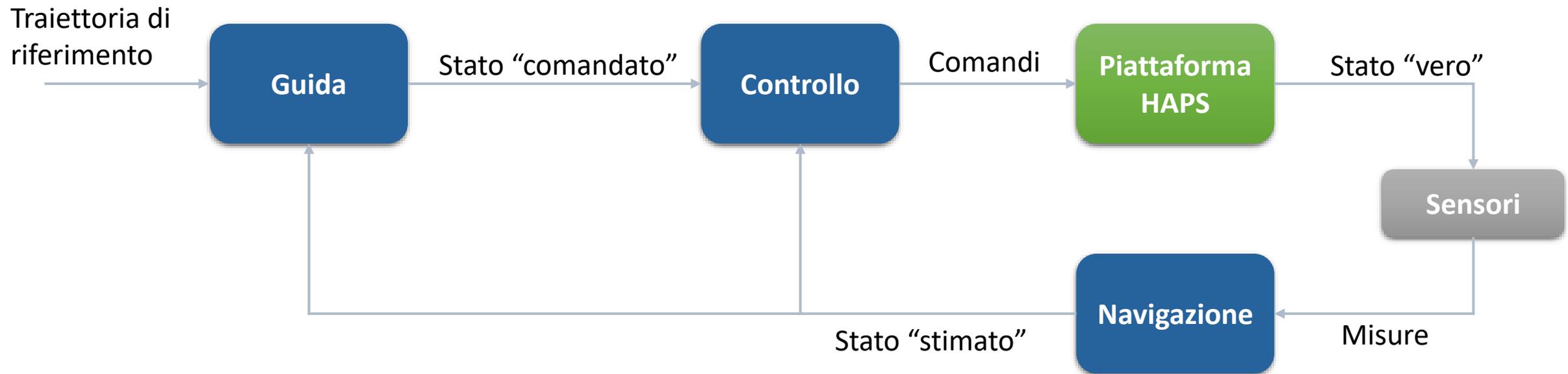
Modellazione

GNC

OUTPUT

Risultati del Progetto STOPP

Sottosistema GNC



INPUT

Caratterizzazione

Modellazione

GNC

OUTPUT

Sottosistema GNC

Navigazione

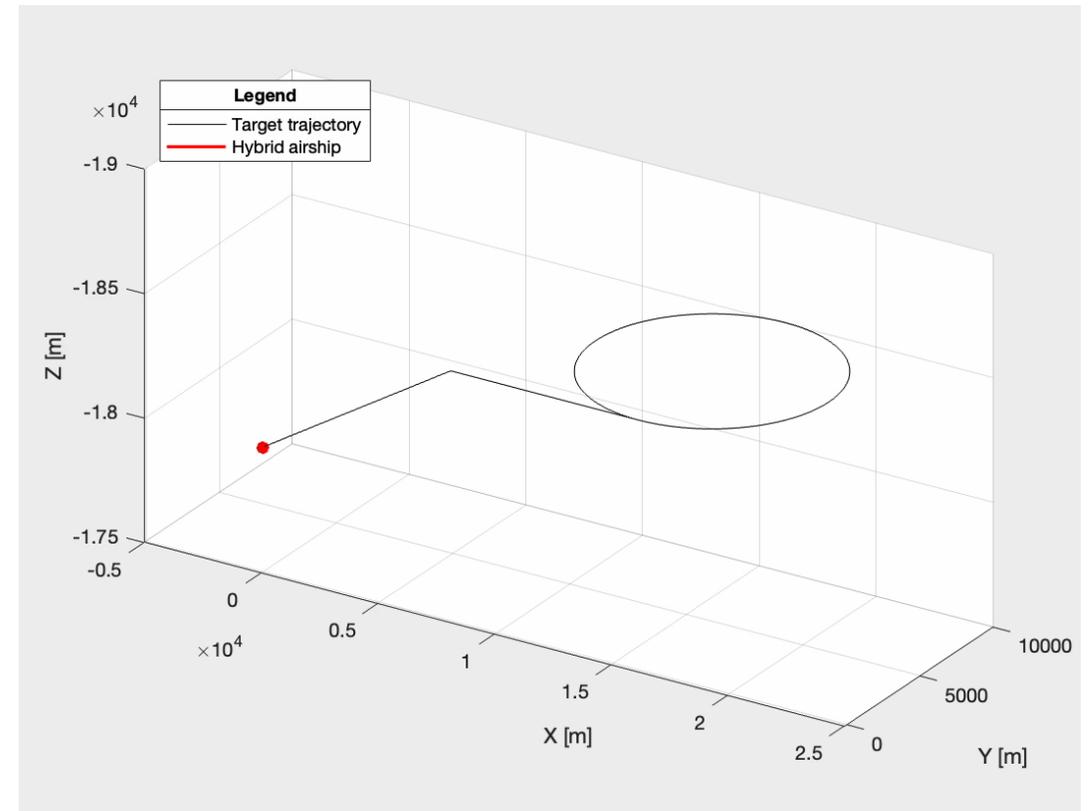
- Filtro di Kalman di tipo Unscented

Controllo

- Controllo PID (2 loop)

Guida

- Artificial Potential Field



INPUT

Caratterizzazione

Modellazione

GNC

OUTPUT

Risultati del Progetto STOPP



Risultati ottenuti

I principali risultati del lavoro presentato sono:

- L'implementazione di un **modello dinamico completo** della piattaforma stratosferica ibrida
- Lo studio dell'impatto della **posizione del baricentro** sulla condizione di equilibrio
- Lo sviluppo del **sottosistema GNC** per tracciare una traiettoria desiderata

Sviluppi futuri

Attualmente, il lavoro di ricerca prosegue sulle seguenti tematiche:

- Studio sulla **robustezza** del sottosistema GNC a disturbi esterni (vento, turbolenza, errori di misura)
- Utilizzo di algoritmi di controllo **avanzati**
- Studio su **configurazioni** diverse dei comandi

INPUT

Caratterizzazione

Modellazione

GNC

OUTPUT

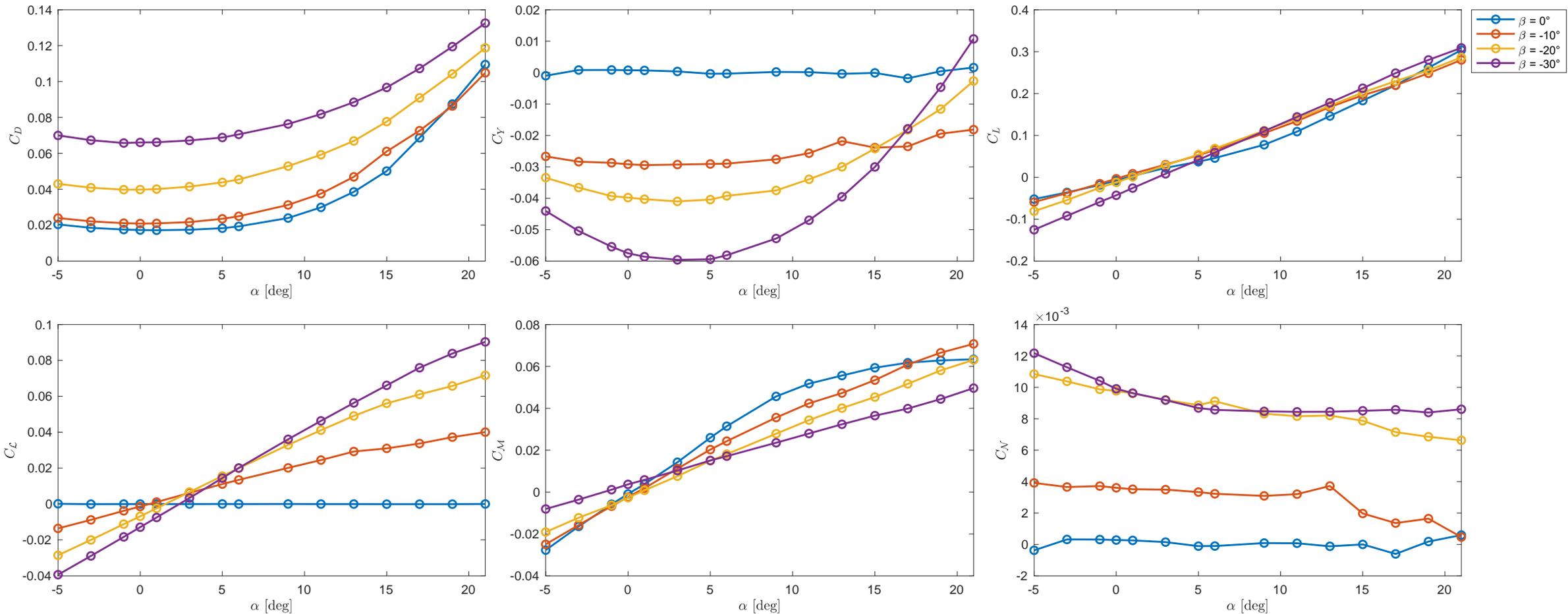
Risultati del Progetto STOPP



Grazie per l'attenzione!

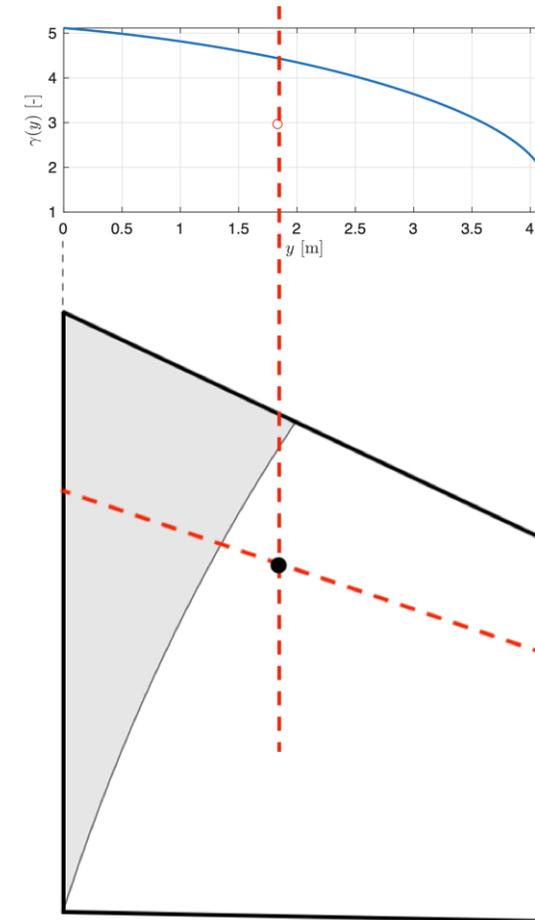
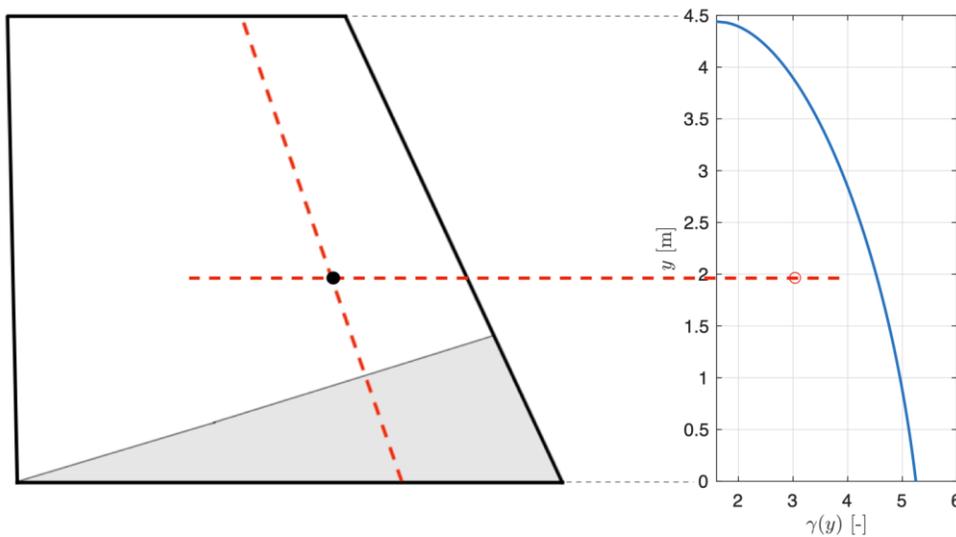
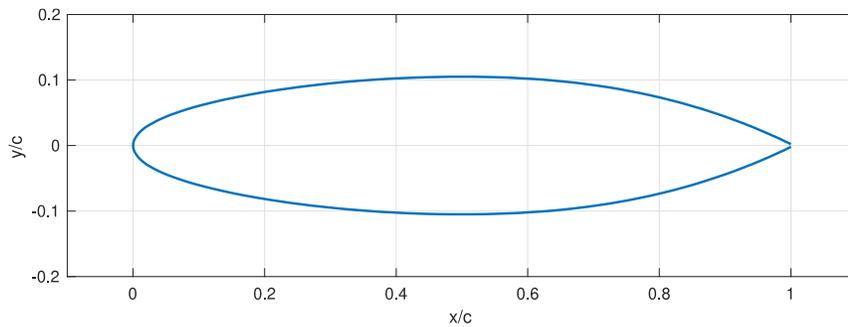


Risultati dell'analisi CFD



Risultati del Progetto STOPP

Risultati dell'analisi delle superfici di controllo



Risultati dell'analisi delle superfici di controllo

$$C_{L\delta_H} = \eta_H \tau_H \frac{S_H}{S} C_{L\alpha,H}$$

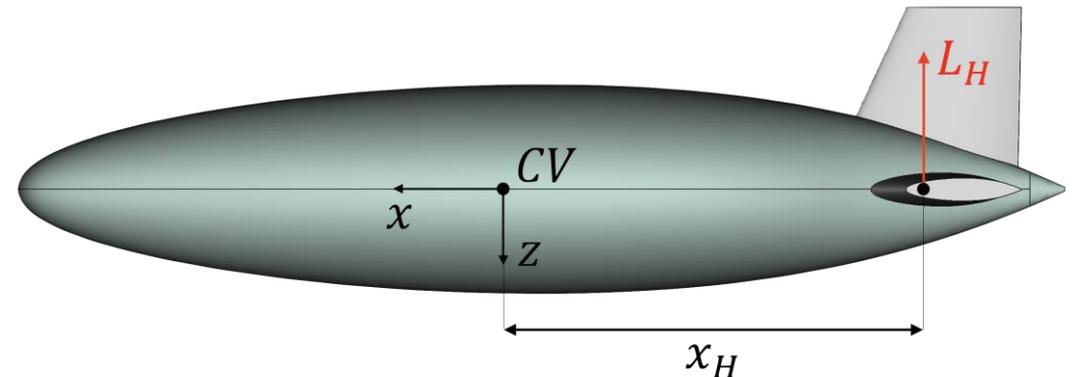
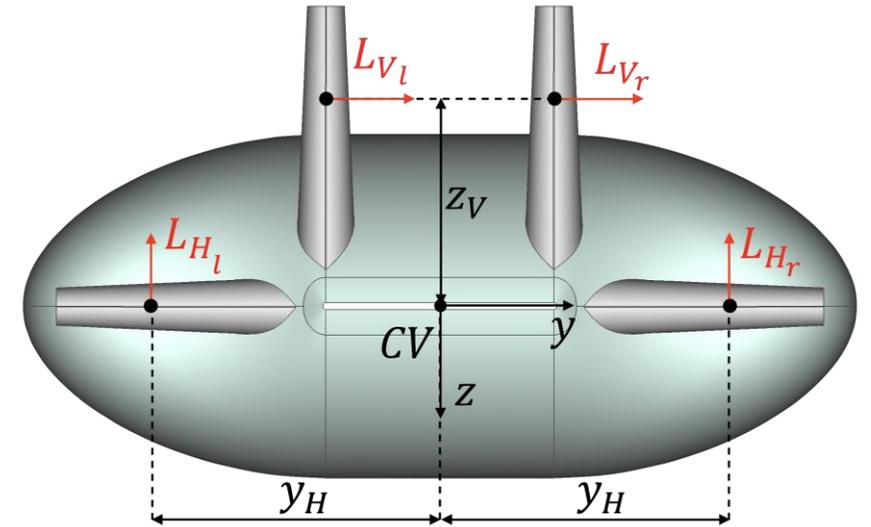
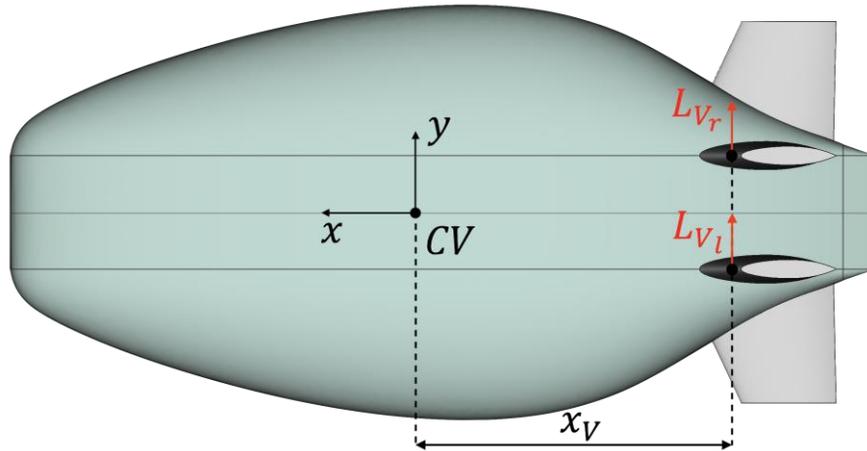
$$C_{Y\delta_V} = 2\eta_V \tau_V \frac{S_V}{S} C_{L\alpha,V}$$

$$C_{M\delta_H} = -\eta_H \tau_H \frac{S_H x_H}{S L} C_{L\alpha,H}$$

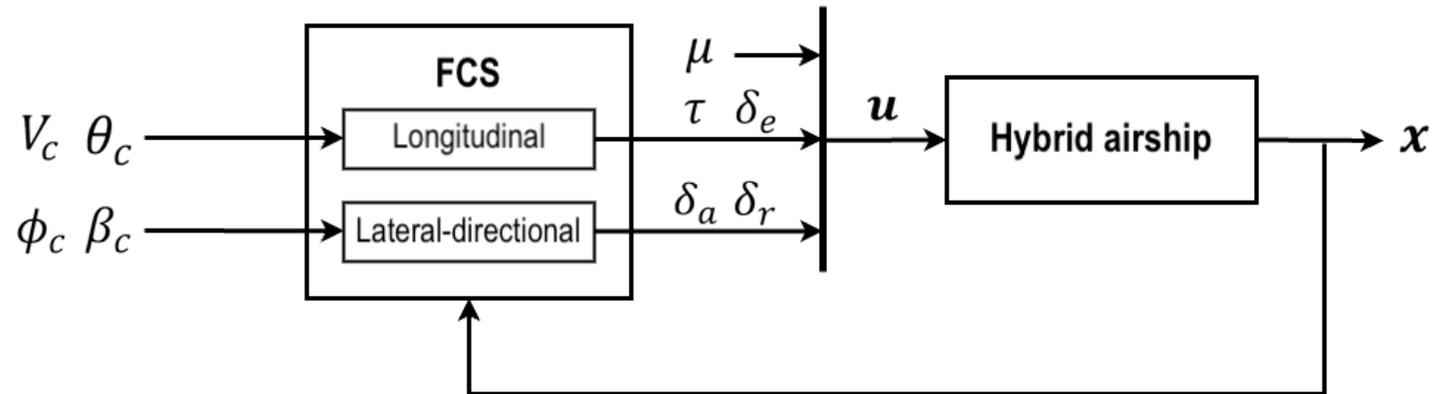
$$C_{N\delta_V} = -2\eta_V \tau_V \frac{S_V x_V}{S L} C_{L\alpha,V}$$

$$C_{L\delta_H} = -\eta_H \tau_H \frac{S_H y_H}{S w} C_{L\alpha,H}$$

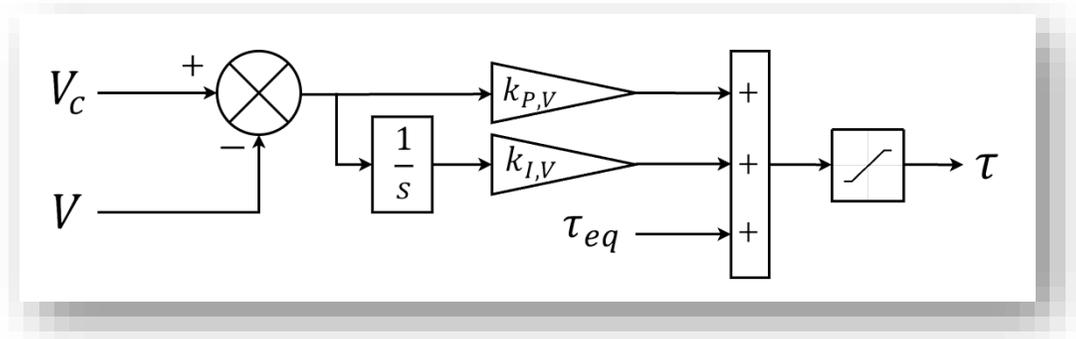
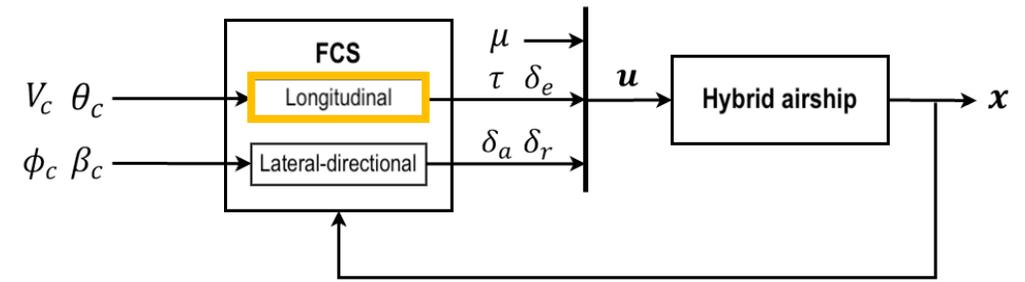
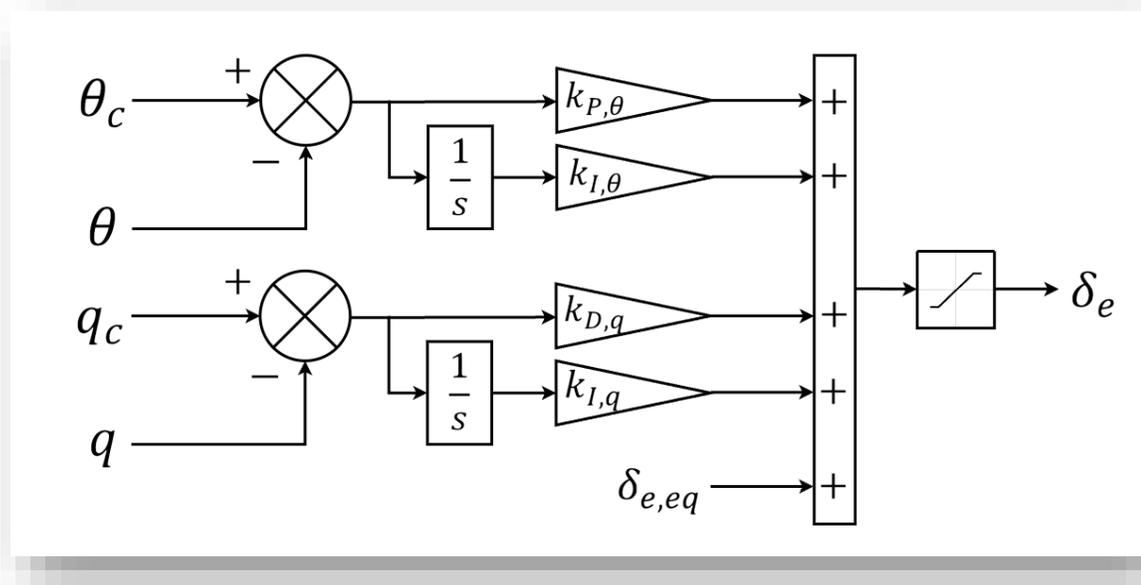
$$C_{L\delta_V} = 2\eta_V \tau_V \frac{S_V z_V}{S w} C_{L\alpha,V}$$



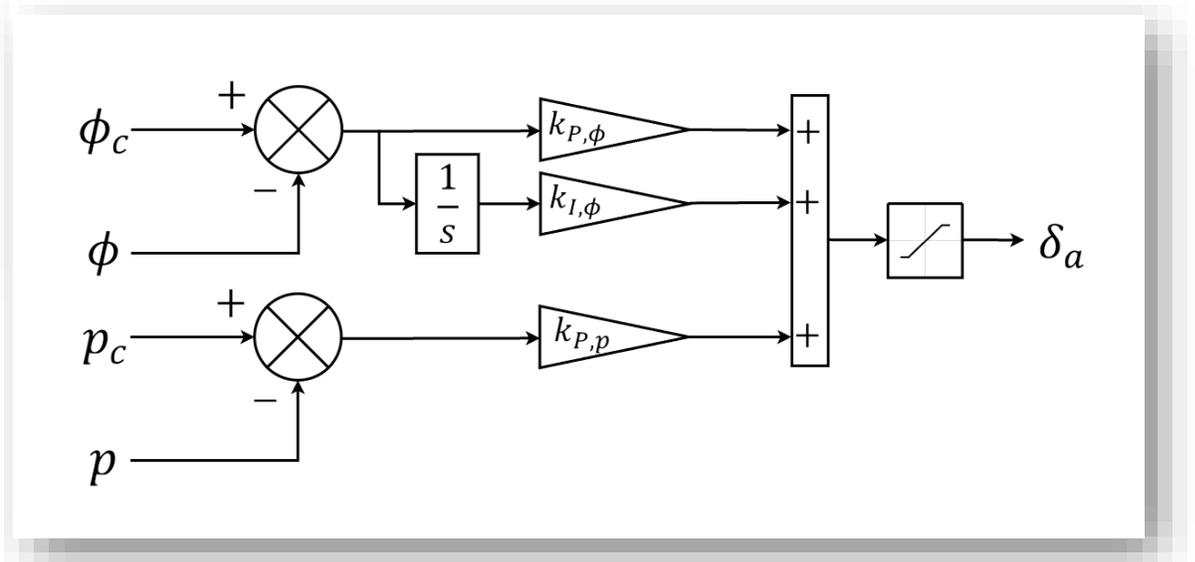
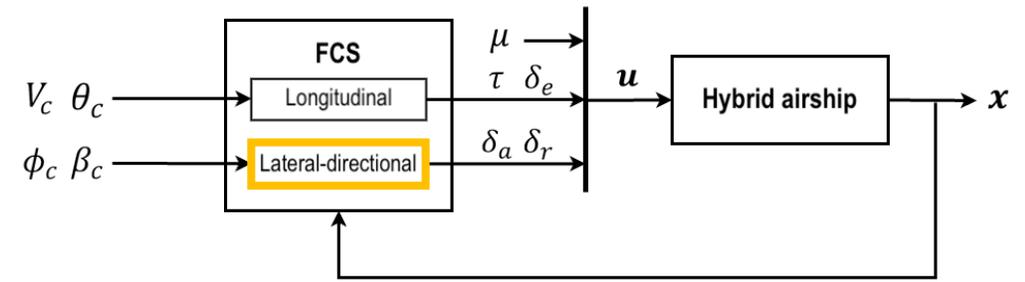
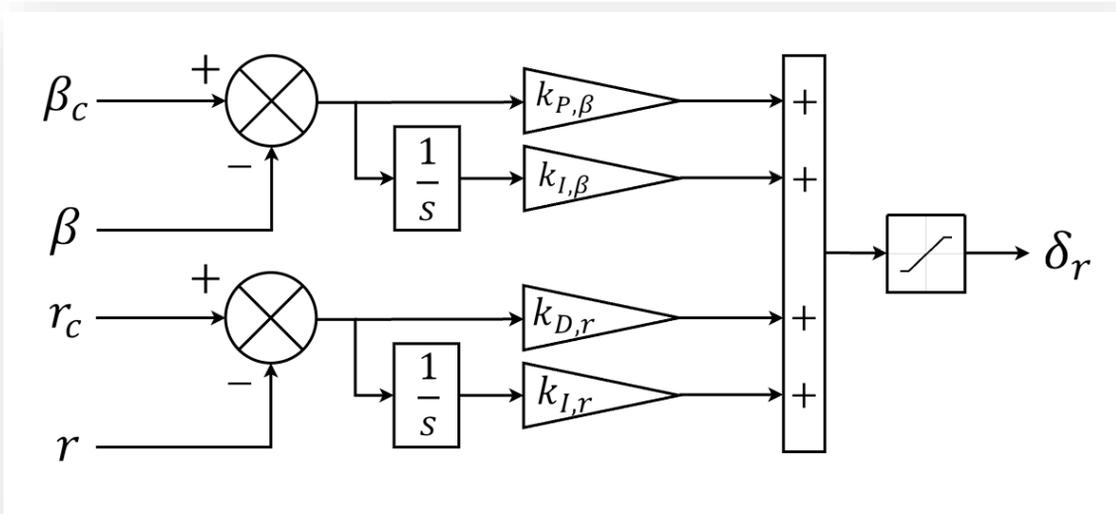
Algoritmo di controllo - FCS



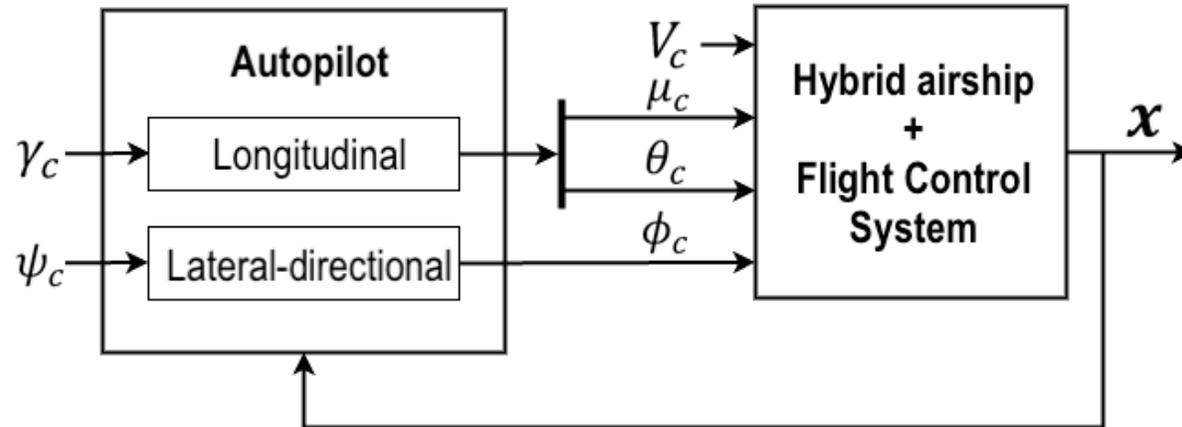
Algoritmo di controllo - FCS



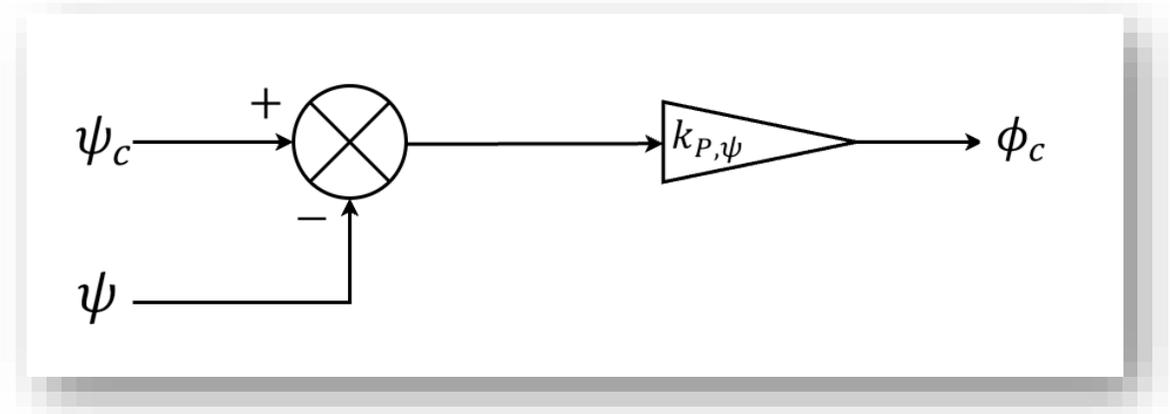
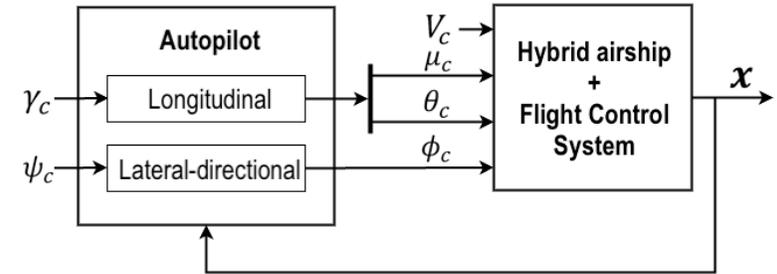
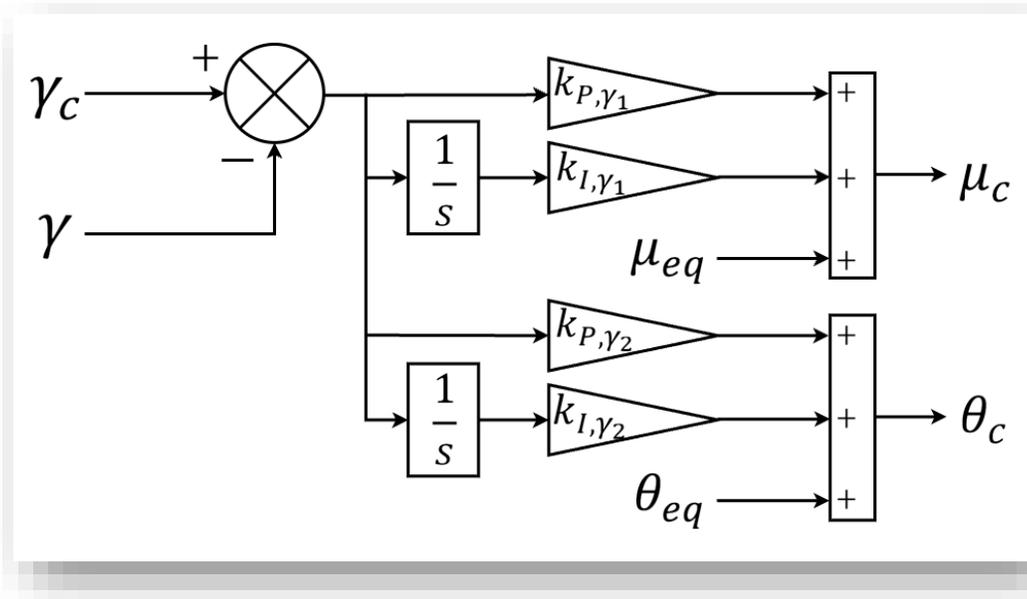
Algoritmo di controllo - FCS



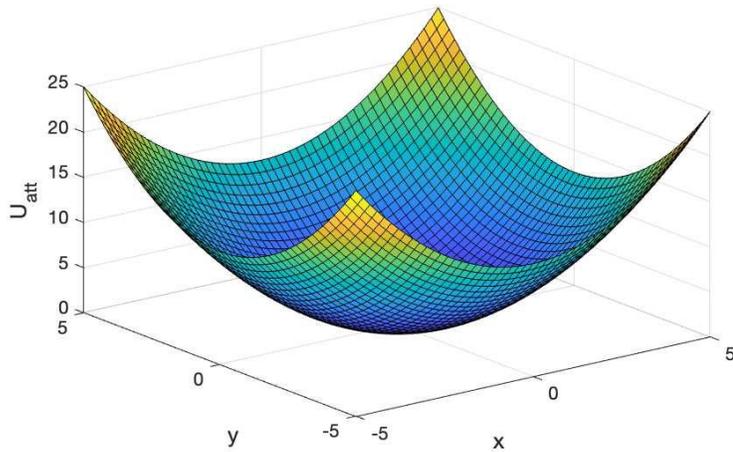
Algoritmo di controllo - Autopilota



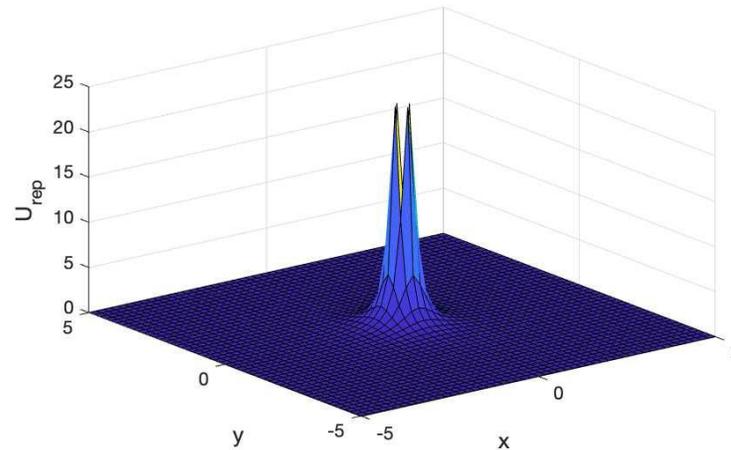
Algoritmo di controllo - Autopilota



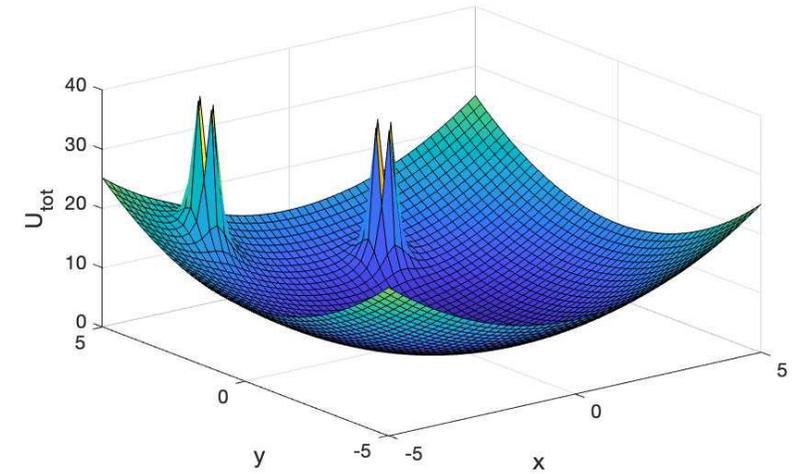
Algoritmo di guida



$$U_{att}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} k_{att} \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_g\|^2$$



$$U_{rep}(\mathbf{x}) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_{rep} \left(\frac{1}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_o\|} - \frac{1}{d_o} \right)^2 & \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_o\| \leq d_o \\ 0 & \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_o\| > d_o \end{cases}$$



$$U_{tot}(\mathbf{x}) = U_{att}(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^{n_o} U_{rep_i}(\mathbf{x})$$

Algoritmo di guida

$$\mathbf{F}_{tot}(\mathbf{x}) = -\nabla U_{tot}(\mathbf{x}) \quad \Rightarrow \quad \hat{\mathbf{V}} = \frac{\mathbf{F}_{tot}(\mathbf{x})}{\|\mathbf{F}_{tot}(\mathbf{x})\|} \quad \Rightarrow \quad \dot{\mathbf{x}}_d = \dot{x}_{d,max} \hat{\mathbf{V}}$$

