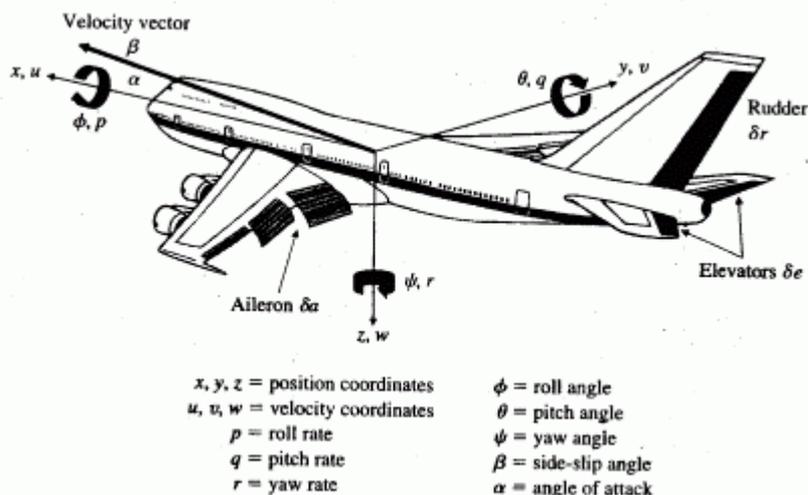
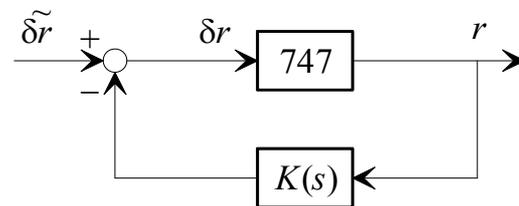


Luogo delle radici



Le equazioni lineari di moto del corpo rigido per un Boeing 747 sono dell'ottavo ordine, ma sono in prima approssimazione separabili in due gruppi del quarto ordine. Il primo gruppo  $(\beta, r, p, \phi)$  rappresenta il moto laterale, consistente in rollio  $(\phi, p)$ , imbardata  $(r)$  e movimento laterale, associato all'angolo di *side-slip*  $\beta$ . Il secondo  $(u, w, q, \theta)$  rappresenta il moto longitudinale, consistente in moto assiale  $(u)$ , verticale  $(w)$  e di beccheggio  $(\theta$  e  $q)$ . Possibili variabili di controllo per il moto laterale sono gli angoli del timone  $(\delta r)$  e degli alettoni  $(\delta a)$ , per il moto longitudinale l'angolo di inclinazione dell'equilibratore  $(\delta e)$  e la manetta (*throttle*). In questa esercitazione ci si concentrerà sul progetto di un **controllore automatico del moto laterale (yaw damper)**.

Il moto laterale di un Boeing 747 ha un modo vibratorio poco smorzato che rende difficile il pilotaggio. Lo scopo del controllo laterale è di modificare tale dinamica in modo da agevolare il pilota. In particolare si vuole massimizzare lo smorzamento della dinamica, utilizzando quale variabile di controllo l'angolo del timone  $\delta r$ , e quale variabile misurata lo *yaw rate*  $r$ . Si fa riferimento allo schema di controllo qui riportato, in cui il regolatore in retroazione  $K(s)$  dovrà essere progettato con il luogo delle radici al fine di migliorare la dinamica in anello chiuso. A regolatore inserito, il nuovo ingresso a disposizione del pilota sarà l'angolo  $\delta \tilde{r}$ .



**Modello lineare del moto laterale:** (per moto orizzontale a 40000 ft, velocità nominale Mach 0.8).

Posto  $x = [\beta \ r \ p \ \phi]^T$ ,  $u = [\delta r \ \delta a]^T$ ,  $y = [r \ \phi]^T$  ( $\beta$  e  $\phi$  in rad,  $r$  e  $p$  in rad/s,  $\delta r$  e  $\delta a$  in rad) si ha:

$$\dot{x} = Ax + bu, \quad y = cx$$

con  $A = \begin{bmatrix} -0.0558 & -0.9968 & 0.0802 & 0.0415 \\ 0.598 & -0.115 & -0.0318 & 0 \\ -3.05 & 0.388 & -0.465 & 0 \\ 0 & 0.0805 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $b = \begin{bmatrix} 0.0729 & 0.0001 \\ -4.75 & 1.23 \\ 1.53 & 10.63 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

1. Dopo avere definito le tre matrici, creare, con il comando `b747=ss(A,b,c,0)`, il sistema dinamico in Matlab.
2. Con il comando `damp(b747)` ricavare gli autovalori e con `pzmap(b747)` visualizzarli. Si individueranno due modi corrispondenti ad autovalori reali (lo *spiral mode*, a bassissima frequenza, e il *roll mode*) ed un modo vibratorio poco smorzato (*dutch roll*).
3. Utilizzare il comando `impulse(b747,20)` per tracciare le risposte all'impulso del sistema, limitatamente ai primi 20 secondi. Si osservi che, in risposta ad un impulso sugli alettoni (secondo ingresso), l'angolo di rollio (seconda uscita) ha una variazione finita.
4. Con il comando `b747rr=b747(1,1)` selezionare il sottosistema dall'angolo timone  $\delta r$  allo *yaw rate*  $r$ .
5. Con il comando `rlocus(-b747rr)` tracciare il luogo delle radici inverso (il sistema ha guadagno negativo (-153.33)). Si usi il comando `sgrid` per tracciare il diagramma su una griglia che evidenzia i punti ad uguale smorzamento.
6. Si progetti un controllore proporzionale  $K(s) = k$ , selezionando graficamente il valore di  $k$  in modo da massimizzare lo smorzamento dei poli complessi in anello chiuso. Si usi per questo il comando interattivo `[k,p]=rlocfind(-b747rr)`.
7. Con il comando `clprop=feedback(b747,-k,1,1)` si crei il sistema MIMO in anello chiuso con il regolatore proporzionale progettato. Si visualizzi la risposta all'impulso, confrontandola con quella in anello aperto: `impulse(b747,clprop,20)`. Si osservi che ora la dinamica è più smorzata, ma è cambiato il comportamento della risposta dell'angolo di rollio all'impulso sugli alettoni.
8. Si progetti quindi un controllore derivativo  $K(s) = ks/(s+p)$  (*circuito di washout*), sempre con il luogo delle radici. Si ponga  $p=0.33$  (costante di tempo di 3 secondi). Si utilizzino i comandi `H= tf([1 0],[1 0.33])`, `L= H*b747rr`, `rlocus(-L)`, `sgrid`, `[k,p]=rlocfind(-L)`. Si selezioni graficamente  $k$  in modo da massimizzare lo smorzamento dei poli complessi.
9. Con il comando `clwash=feedback(b747,-k*H,1,1)`, si crei il sistema MIMO in anello chiuso con il regolatore di washout. Si visualizzi la risposta all'impulso, confrontandola con quella in anello aperto: `impulse(b747,clwash,20)`. Si osservi che la dinamica è ben smorzata ed è stato ripristinato il comportamento corretto della risposta dell'angolo di rollio all'impulso sugli alettoni.