בקרה אוטומטית של כלי טיס

DCM

$$D_B^E = [\Phi][\Theta][\Psi]$$

$$D_B^E = \begin{bmatrix} c\Theta c\Psi & c\Theta s\Psi & -s\Theta \\ s\Phi s\Theta c\Psi - c\Phi s\Psi & s\Phi s\Theta s\Psi + c\Phi c\Psi & s\Phi c\Theta \\ c\Phi s\Theta c\Psi + s\Phi s\Psi & c\Phi s\Theta s\Psi - s\Phi c\Psi & c\Phi c\Theta \end{bmatrix}$$

$$D_E^B = \begin{bmatrix} c\Theta c\Psi & s\Phi s\Theta c\Psi - c\Phi s\Psi & c\Phi s\Theta c\Psi + s\Phi s\Psi \\ c\Theta s\Psi & s\Phi s\Theta s\Psi + c\Phi c\Psi & c\Phi s\Theta s\Psi - s\Phi c\Psi \\ -s\Theta & s\Phi c\Theta & c\Phi c\Theta \end{bmatrix}$$

**במקרה שרוצים לעבור מצירי גוף לרוח אז $\phi = 0, \theta = -\alpha, \psi = \beta$

והסדר הוא $\theta \Rightarrow \psi$

<u>תאוצת מ"כ בצירי גוף – תאוצה לא מדודה, זהו כח ספציפי</u>

במצב מתמיד כל משתני המצב קבועים בזמן ביחס לצירי גוף – (' נופל)

$$m\left(\dot{U}' + QW - RV + g\sin\Theta\right) = X + T_X$$

$$m\left(\dot{V}' - PW + RU - g\sin\Phi\cos\Theta\right) = Y + T_Y$$

$$m\left(\dot{W}' + PV - QU - g\cos\Phi\cos\Theta\right) = Z + T_z$$

<u>משוואת שימור תנע</u> $\dfrac{d\vec{H}}{dt}$ (**במצב מתמיד** ' נופל)

$$I_X\dot{P}' - I_{XZ}\dot{R}' - I_{XZ}PQ + \left(I_Z - I_Y\right)RQ = L_A + L_T$$

$$I_Y\dot{Q}' + \left(I_X - I_Z\right)PR + I_{XZ}\left(P^2 - R^2\right) = M_A + M_T$$

$$I_Z\dot{R}' - I_{XZ}\dot{P}' + \left(I_Y - I_X\right)PQ + I_{XZ}QR = N_A + N_T$$

<u>במצב מתמיד:</u> $\dot{U}_0, \dot{V}_0, \dot{W}_0, \dot{P}_0, \dot{Q}_0, \dot{R}_0 = 0$

<u>בטיסה ישרה:</u> $P_0, Q_0, R_0, \Psi_0, \Theta_0, \Phi_0 = 0$

<u>בטיסה מאוזנת:</u> $\Phi_0 = 0$

<u>בטיסה סימטרית:</u> $\beta_0, V_0 = 0$ <u>בטיסה אופקית:</u> $\gamma_0 = 0$

<u>טיסה מקוזזת:</u> טיסה ישרה, סימטרית, מאוזנת, ללא רוח

$$\dot{\Phi} = P + Q\sin\Phi\tan\Theta + R\cos\Phi\tan\Theta$$

$$\dot{\Theta} = Q\cos\Phi - R\sin\Phi$$

$$\dot{\Psi} = \left(Q\sin\Phi + R\cos\Phi\right)/\cos\Theta$$

$$P = \dot{\Phi} - \dot{\Psi}\sin\Theta$$

$$Q = \dot{\Theta}\cos\Phi + \dot{\Psi}\cos\Theta\sin\Phi$$

$$R = \dot{\Psi}\cos\Theta\cos\Phi - \dot{\Theta}\sin\Phi$$

<u>מומנטי אינרציה</u>

1. מטוס סימטרי סביב XOZ: $I_{XY}=I_{ZY}=0$, $I_{XZ}<0$
2. עבור XYZ כל האיברים המעורבים מתאפסים

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}_B = \begin{bmatrix} s\alpha & -c\beta c\alpha \\ 0 & -s\beta \\ -c\alpha & -c\beta s\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_0 \\ D_0 \end{bmatrix}$$

<u>צירי יציבות</u>

יתרון: כוחות פשוטים במצב קיזוז

חסרון: מומנטי אינרציה וצירים משתנים לפי מצב הטיסה

<u>פותחו עבור טיסה סימטרית</u>

$$\alpha_0 = 0 \Rightarrow \gamma_0 = \Theta_0$$

$$X_0 = -D_0 + T_0\cos\left(\alpha_0 + \alpha_T\right)$$

$$Z_0 = -L_0 - T_0\sin\left(\alpha_0 + \alpha_T\right)$$

<u>תאוצה מדודה לא במ"כ</u>

$$a_m = a_{cg} + \left.\frac{dV_1}{dt}\right|_I - D_B^E\vec{g}$$

$$\left.\frac{dV_1}{dt}\right|_I = \left.\frac{dV_1}{dt}\right|_B + \Omega \times V_1$$

$$V_1 = \left.\frac{dr_1}{dt}\right|_B + \Omega \times r_1$$

$$\gamma = a\sin\left(-\dot{Z}_E \big/ |V|\right)$$

$$\gamma = a\cos\left(\dot{X}_E \big/ |V|\right)$$

<u>מעבר בין צירי גוף B לצירי יציבות S</u>

$$D_S^B = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix},\ D_B^S = \left[D_S^B\right]^{-1} \qquad I_S = D_S^B I_B D_B^S$$

$$\begin{Bmatrix} I_x \\ I_z \\ I_{xz} \end{Bmatrix}_S = \begin{bmatrix} \cos^2\alpha & \sin^2\alpha & -\sin(2\alpha) \\ \sin^2\alpha & \cos^2\alpha & \sin(2\alpha) \\ 0.5\sin(2\alpha) & -0.5\sin(2\alpha) & \cos(2\alpha) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I_x \\ I_z \\ I_{xz} \end{Bmatrix}_B$$

$$I_{y_S} = I_{y_B}$$

<u>פירוק רוח לצירי גוף</u>

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = |V| \begin{bmatrix} c\alpha c\beta \\ s\beta \\ c\beta s\alpha \end{bmatrix}$$

$$\alpha = a\tan\left(W \big/ U\right) \approx \frac{W}{U}$$

$$\beta = a\sin\left(V \big/ |V|\right) \approx \frac{V}{|V|}$$

<u>מודל אורכי (עבור טיסה מקוזזת, הפרות ביחס לצירי יציבות)</u>

$$\begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X_u & X_w & 0 & -g\cos\gamma_0 \\ Z_u & Z_w & U_0 & -g\sin\gamma_0 \\ \bar{M}_u & \bar{M}_w & \bar{M}_q & -gM_{\dot{w}}\sin\gamma_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ w \\ q \\ \theta \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{\delta e} & T_{\delta T} \\ Z_{\delta e} & 0 \\ \bar{M}_{\delta e} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_e \\ \delta_T \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} X_u & X_w \\ Z_u & Z_w \\ \bar{M}_u & \bar{M}_w \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_g \\ w_g \end{Bmatrix}$$

$$\bar{M}_{(\cdot)} = M_{(\cdot)} + M_{\dot{w}}Z_{(\cdot)}$$

$$\bar{M}_q = M_q + M_{\dot{w}}U_0$$

$$\dot{h} = -w + U_0\theta = U_0\gamma\ ,\ h = \gamma\, U_0 \big/ s$$

$$a_{z,cg} = -\ddot{h} = -U_0\dot{\gamma} = -U_0 q + \dot{w}$$

<u>מודל רוחבי (עבור טיסה מקוזזת ואופקית, הפרות ביחס לצירי יציבות)</u>

$$\begin{Bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \\ \dot{\phi} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_v & 0 & -1 & g/U_0 \\ L'_\beta & L'_p & L'_r & 0 \\ N'_\beta & N'_p & N'_r & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta \\ p \\ r \\ \phi \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} Y^*_{\delta a} & Y^*_{\delta r} \\ L'_{\delta a} & L'_{\delta r} \\ N'_{\delta a} & N'_{\delta r} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_a \\ \delta_r \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_v \\ L'_\beta \\ N'_\beta \\ 0 \end{bmatrix} \beta_g$$

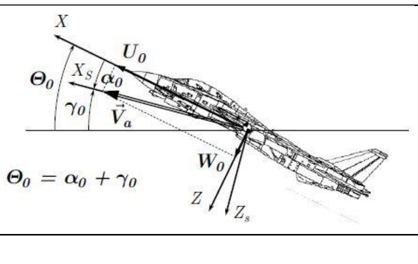
$$\dot{\psi} = r$$

$$\dot{y} = U_0\left(\beta + \psi\right)$$

$$a_{y,cg} = U_0\left(\dot{\beta} + \dot{\psi}\right) = U_0\left(\dot{\beta} + r\right)$$

$$\theta = \alpha + \gamma$$

הקשר נכון רק בטיסה אורכית + מישורית



<u>שימושי</u>

#בטיסה **בגובה קבוע**

$\gamma = 0$

בפניה **מתואמת**

$F_{Y_R} = a_{Y_R} = 0$

$$T = 2\pi f = \frac{2\pi}{\omega} \qquad v = \omega R \qquad H = I\omega$$

$$rpm \cdot \frac{2\pi}{60} = rad \big/ \sec \qquad a = \omega^2 R \qquad M = I\ddot{\theta}$$

השפעת רוטורים

$$\vec H = \vec H_0 + \vec h$$

$$\vec h = \sum I_{Ri}\vec\omega_{Ri} = h_x\hat i + h_y\hat j + h_z\hat k \qquad \frac{d\vec h}{dt} = \begin{bmatrix} Qh_z - Rh_y \\ Rh_x - Ph_z \\ Ph_y - Qh_x \end{bmatrix}$$

$$\frac{d\vec h}{dt} = \cancel{\dot{\vec h}_0} + \vec\Omega_{plane}\times\vec h$$

H_0 – תנ""ז כשהרוטורים לא סובבים   h – תנ"ז של הרוטורים ביחס לצירי גוף.

תנע זוויתי

$$\vec H = \vec H_0 + \vec h \Rightarrow \frac{dH}{dt} = \dot{\vec H} + \vec\Omega_{body}\times\vec H$$

$$\frac{dH}{dt} = \dot{\vec H}_0 + \cancel{\dot{\vec h}} + \vec\Omega_b\times\vec H_0 + \vec\Omega_b\times\vec h =$$

$$= KnownForm + \vec\Omega_b\times\vec h$$

גזירת מערכות צירים

$$\left.\frac{d\vec x}{dt}\right|_I = \left.\frac{d\vec x}{dt}\right|_B + \vec\omega\times\vec x$$

$$\left.\frac{d\vec x}{dt}\right|_I = \dot{\vec x} + \vec\omega\times\vec x$$

משוואת התנועה של הפרות קטנות – גזירה ביחס למצב נומינלי (טיסה מקוזזת)

$$m\left(\dot u + W_0 q + g\theta\cos\Theta_0\right) = \Delta X + \Delta T_X \qquad I_X\dot p - I_{XZ}\dot r = \Delta L_A + \Delta L_T \qquad \dot\phi = p + r\tan\Theta_0$$

$$m\left(\dot v - W_0 p + U_0 r - g\phi\cos\Theta_0\right) = \Delta Y + \Delta T_Y \qquad I_Y\dot q = \Delta M_A + \Delta M_T \qquad \dot\theta = q$$

$$m\left(\dot w - U_0 q + g\theta\sin\Theta_0\right) = \Delta Z + \Delta T_Z \qquad I_Z\dot r - I_{XZ}\dot p = \Delta N_A + \Delta N_T \qquad \dot\psi = r/\cos\Theta_0$$

מדיד תאוצה מוצב בחרטום

$$\alpha_m = \frac{w - ql}{U_0}$$

$$l = front - x_{cg}$$

נגזרות יציבות

$$A \triangleq \frac{\rho S U_0}{m} \quad B \triangleq \frac{\rho S U_0 c}{I_y} \quad D \triangleq \frac{\rho S U_0 b}{2I_x} \quad E \triangleq \frac{\rho S U_0 b}{2I_z}$$

מישור רוחבי

כח צד

$$\left.\frac{1}{m}\frac{\partial Y}{\partial(param)}\right|_{nom}$$

$$Y_v = \frac{A}{2}C_{y\beta} < 0 \qquad \left[\sec^{-1}\right]$$

$$Y^*_\delta = \frac{A}{2}C_{y\delta},\ \ Y_{\delta r} < 0 \qquad \left[m\cdot\sec^{-2}\right]$$

גלגול סביב X

$$L_\beta = DU_0C_{l\beta} < 0 \qquad \left[\sec^{-2}\right]$$

$$L_p = D\frac{b}{2}C_{lp} < 0 \qquad \left[\sec^{-1}\right]$$

$$L_r = D\frac{b}{2}C_{lr} > 0 \qquad \left[\sec^{-1}\right]$$

$$L_\delta = DU_0C_{l\delta},\ \ \mathcal{L}_{\delta\alpha.\rho} > 0 \qquad \left[\sec^{-2}\right]$$

$$L_v = \frac{1}{U_0}\mathcal{L}_\beta \qquad \left[(m\cdot\sec)^{-1}\right]$$

סבסוב סביב Z

$$\left.\frac{1}{I_z}\frac{\partial N}{\partial(param)}\right|_{nom}$$

$$N_\beta = EU_0C_{n\beta} > 0 \qquad \left[\sec^{-2}\right]$$

$$N_p = E\frac{b}{2}C_{np} < 0 \qquad \left[\sec^{-1}\right]$$

$$N_r = E\frac{b}{2}C_{nr} < 0 \qquad \left[\sec^{-1}\right]$$

מרסן DR

$$N_\delta = EU_0C_{n\delta},\ \ N_{\delta r} < 0 \qquad \left[\sec^{-2}\right]$$

$$N_v = \frac{1}{U_0}N_\beta \qquad \left[(m\cdot\sec)^{-1}\right]$$

יציבות שבשבת

מישור אורכי

$$\left.\frac{1}{m}\frac{\partial X}{\partial(param)}\right|_{nom}$$

$$X_u = A\left(-C_D - C_{Du}\right) < 0 \qquad \left[\sec^{-1}\right]$$

$$X_w = \frac{A}{2}\left(C_L - C_{D\alpha}\right) > 0 \qquad \left[\sec^{-1}\right]$$

כושר תמרון

$$Z_u = A\left(-C_L - C_{Lu}\right) < 0 \qquad \left[\sec^{-1}\right]$$

$$Z_w = \frac{A}{2}\left(C_{L\alpha} - C_D\right) < 0 \qquad \left[\sec^{-1}\right]$$

$$Z_\delta = A\frac{U_0}{2}\left(-C_{L\delta}\right),\ \ Z_{\delta\varepsilon} < 0 \qquad \left[m\cdot\sec^{-2}\right]$$

$$Z_\alpha = U_0 Z_u \qquad \left[m\cdot\sec^{-2}\right]$$

עלרוד סביב Y

$$M_u = B\left(C_M + C_{Mu}\right) \qquad \left[(m\cdot\sec)^{-1}\right]$$

$$M_w = \frac{B}{2}C_{M\alpha} < 0 \qquad \left[(m\cdot\sec)^{-1}\right]$$

$$M_{\dot w} = B\frac{c}{4U_0}C_{M\dot\alpha} < 0 \qquad \left[m^{-1}\right]$$

כמה זמן לוקח לזרימה לעבור חצי מיתר.

$$M_q = B\frac{c}{4}C_{Mq} < 0 \qquad \left[\sec^{-1}\right]$$

$$M_\delta = B\frac{U_0}{2}C_{M\delta},\ \ M_{\delta\varepsilon} < 0 \qquad \left[\sec^{-2}\right]$$

$\dot v - sidewash$

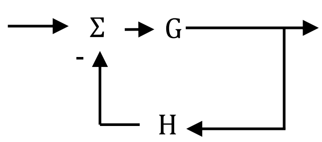
$\dot w - downwash$

שיקולים לסימון משוב והגבר

1. יציבות ב-RL.
2. ב-ss סימן כניסה כסימן יציאה

רוחב הסרט

הגבר של 3dB- בעקום בודה
תדר חציית הגבר < BW
רוחב סרט גדול, המערכת מגיבה יותר טוב ומהר אבל חשופה יותר לרעשים. וההפך.



$$TransFcn = \frac{G}{1+GH}$$

נגזרות יציבות מדחף

$$T_{x\delta T} = \frac{1}{m}\frac{\partial T_x}{\partial\delta_T} = \frac{1}{m}\frac{\partial T}{\partial\delta_T}\cos\alpha$$

$$T_{z\delta T} = -\frac{1}{m}\frac{\partial T_z}{\partial\delta_T} = -\frac{1}{m}\frac{\partial T}{\partial\delta_T}\sin\alpha$$

$$M_{\delta T} = \frac{1}{I_Y}\frac{\partial T}{\partial\delta_T}Z_T$$

Inverse Matrix

$$A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$$

$$A^{-1} = \frac{1}{\det A}\begin{bmatrix} d & -b \\ -c & a \end{bmatrix}$$

$$\sin(\alpha+\beta) = \sin\alpha\cos\beta + \cos\alpha\sin\beta$$

$$\cos(\alpha+\beta) = \cos\alpha\cos\beta - \sin\alpha\sin\beta$$

מישור רוחבי	מישור אורכי

מישור רוחבי

$$\Delta_{lateral}(s)=(s+p_{spiral})(s+p_{roll})\left(s^2+2\zeta_{DR}\omega_{DR}s+\omega_{DR}^{2}\right)$$

$$\omega_{DR}=1\div3\ {}^{rad}/_{\sec}\qquad \zeta_{DR}=0.015\div0.15$$

Roll – המוד השכיח ביותר, מוד מהיר. התכנסות לזווית גלגול קבועה בהטיית מאזנות $\tau=0.2\div1\sec$

Spiral – מוד איטי, קרוב לראשית יציב/לא יציב

מישור אורכי

2DOF app of SP – **הנחה:** מהירות הטיסה לא משתנה – מוד מהיר

$$\begin{Bmatrix}\dot w\\ \dot q\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}Z_w & U_0\\ \bar M_w & \bar M_q\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}w\\ q\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}Z_{\delta e} & -Z_w\\ \bar M_{\delta e} & -\bar M_w\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\delta_e\\ w_g\end{Bmatrix}$$

$$\Delta_{SP}(s)=s^2-\left(\bar M_q+Z_w\right)s+\left(\bar M_q Z_w-U_0\bar M_w\right)$$

$$\omega_{SP}=2\div3\ {}^{rad}/_{\sec}\qquad \zeta_{SP}=0.2\div0.4\qquad 2\zeta\omega\propto\sqrt{\rho}$$

הריסון לא משתנה עם מהירות הטיסה.
בירידה בגובה הגרר גדל אז הריסון גדל וגם התדירות גדלה כי התנודה מהירה יותר.

3DOF of DR+Roll

$$\begin{Bmatrix}\dot\beta\\ \dot p\\ \dot r\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}Y_v & 0 & -1\\ L'_\beta & L'_p & 0\\ N'_\beta & 0 & N'_r\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\beta\\ p\\ r\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}Y^*_{\delta a} & Y^*_{\delta r}\\ L'_{\delta a} & L'_{\delta r}\\ N'_{\delta a} & N'_{\delta r}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\delta_a\\ \delta_r\end{Bmatrix}$$

$$\Delta_{DR+Roll}(s)=\left(s-L'_p\right)\left[s^2-s\left(Y_v+N'_r\right)+\left(N'_\beta+Y_vN'_r\right)\right]$$

$$Y^*_{\delta r}=\frac{Y_{\delta r}}{U_0}$$

אם מוסיפים את המשוואה של $\dot\phi=p$ מתווסף קוטב בראשית

2DOF app of Phugoid – מוד איטי

$$\begin{Bmatrix}\dot u\\ \dot\theta\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}X_u & -g\\ -\frac{Z_u}{U_0} & 0\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}u\\ \theta\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}X_{\delta e}-X_w\frac{M_{\delta e}}{M_w}\\ \frac{M_{\delta e}}{U_0}\frac{Z_w}{M_w}-\frac{Z_{\delta e}}{U_0}\end{bmatrix}\delta_e+\begin{bmatrix}0\\ -\frac{1}{U_0}\cdot\frac{M_{\delta e}}{M_w}\end{bmatrix}\dot\delta_e$$

$$\Delta_{Ph}(s)=s^2-X_us-\frac{Z_u}{U_0}g\qquad C_{Lu},C_{Du}\approx0$$

$$\omega_{Ph}\cong\frac{\sqrt{2}g}{U_0}\qquad \zeta_{Ph}\cong\frac{1}{\sqrt{2}}\frac{D}{L}$$

ריסון הפוגואידה כתוצאה מהגרר←הרבה ריסון זה הרבה גרר

2DOF app of DR

$$\begin{Bmatrix}\dot\beta\\ \dot r\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}Y_v & -1\\ N'_\beta & N'_r\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\beta\\ r\end{Bmatrix}+\begin{Bmatrix}Y^*_{\delta r}\\ N'_{\delta r}\end{Bmatrix}\delta_r$$

$$\Delta_{DR}(s)=s^2-s\left(Y_v+N'_r\right)+\left(N'_\beta+Y_vN'_r\right)$$

כתוצאה מביטול DR (סימון ' לביטול צימוד בין p ו-r)

$$N'_{(\cdot)}=\frac{N_{(\cdot)}+\frac{I_{XZ}}{I_X}\mathcal{L}_{(\cdot)}}{1-\frac{I_{XZ}^2}{I_XI_Z}}\qquad \mathcal{L}'_{(\cdot)}=\frac{N=\mathcal{L}_{(\cdot)}+\frac{I_{XZ}}{I_X}N_{(\cdot)}}{1-\frac{I_{XZ}^2}{I_XI_Z}}$$

3DOF app of Phugoid

$$\begin{Bmatrix}\dot u\\ \dot w\\ 0\\ \dot\theta\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}X_u & X_w & 0 & -g\\ Z_u & Z_w & U_0 & 0\\ M_u & M_w & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}u\\ w\\ 0\\ \theta\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}X_{\delta e}\\ Z_{\delta e}\\ M_{\delta e}\\ 0\end{bmatrix}\delta_e$$

קטבים קרובים לאפס לא מורגשים במציאות

$$\Delta_{Ph}(s)=s^2+\left(\frac{M_u\left(X_\alpha-g\right)}{M_\alpha}-X_u\right)s-\frac{g}{U_0}\left(Z_u-\frac{M_u}{M_\alpha}Z_w\right)$$

$$M_\alpha=M_wU_0\qquad M_{\dot\alpha}=M_{\dot w}U_0\qquad X_\alpha=X_wU_0$$

לרוב M_u זניח. $M_u>0$ – יציב, $M_u<0$ – לא יציב (לא בהכרח)

תמסורות רוחביות (קירוב)

$$\frac{p}{\delta_a}=\frac{L'_{\delta a}}{s-L'_p}\qquad \frac{\phi}{\delta_a}=\frac{L'_{\delta a}}{s\left(s-L'_p\right)}$$

תמסורות אורכיות (קירוב)

$$\frac{h}{\theta}=\frac{U_0}{s}\frac{\gamma}{\theta}\qquad \frac{\gamma}{\theta}=\frac{-Z_w}{s-Z_w}$$

פונקציית תמסורת

$$H=C\left(sI-A\right)^{-1}B+D$$

מותר לצמצם קטבים ואפסים רק ב-OLHP!

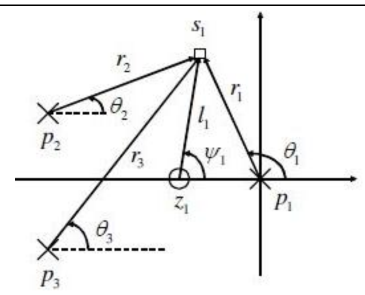
זמן התייצבות

$$t_s(1\%)=\frac{4.6}{\zeta\omega_n}\qquad t_s(5\%)=\frac{3}{\zeta\omega_n}$$

<u>כללים לשרטוט RL – p מס' קטבים, z מס' אפסים.</u> כאשר אנחנו ב-RL 0→X. אם קיים אפס בצד ימין המערכת היא מסוג NMP

	K>0	K<0
RL קיים על הציר הממשי בכל נקודה במימינה סכום אפסי וקטבי GH הוא	אי זוגי	זוגי
מס' אסימפטוטות	M=p-z	
זוויות אסימפטוטות k=0,1,…M-1	$\alpha_k=\frac{(1+2k)\pi}{p-z}$	$\alpha_k=\frac{2k\pi}{p-z}$
חיתוך האסימפטוטות עם הציר הממשי	$\sigma_{cg}=\frac{\sum\mathrm{Re}(poles)-\sum\mathrm{Re}(zeros)}{p-z}$	
נק' התפלגות	$\frac{d}{ds}\left(\frac{1}{GH(s)}\right)=0$	
זוויות ה-RL ליד קטבים ואפסים מרוכבים	$\phi_{others}\triangleq\sum\psi_i-\sum\theta_i$	
קטבים ואפסים בודדים (K>0)	זווית עזיבת הקוטב: $\theta_{dep}=180^\circ+\sum\phi_{others}$ זווית הגעה לאפס: $\psi_{arr}=180^\circ-\sum\phi_{others}$	

	K>0	K<0
חוק הפאזה	$\angle GH(s)=\pm180^\circ(2k+1)$ $\sum\psi_i-\sum\theta_i=(2k+1)\pi$	$\angle GH(s)=\pm2\pi k$ $\sum\psi_i-\sum\theta_i=2\pi k$
חוק ההגבר	$\lvert KGH(s)\rvert=1\Rightarrow\frac{\lvert K\rvert\prod_i l_i}{\prod_j r_j}=1$	



$$KGH(s)=\frac{K\prod_i^m\left(s-z_i\right)}{\prod_j^n\left(s-p_j\right)}$$

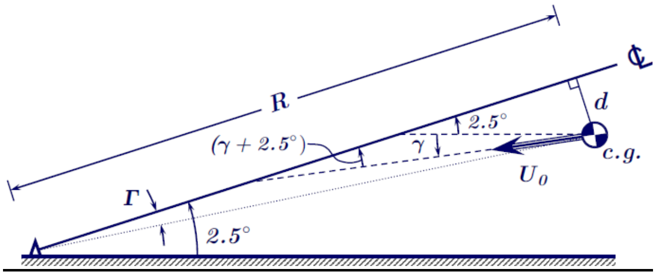
נחיתה אוטומטית

$$\dot d = U_0 \sin(\gamma + 2.5°)$$

$$d(s) = \frac{U_0}{57.3 \cdot s}(\gamma + 2.5°)$$

$$\tan\Gamma = \frac{d}{R} \Rightarrow \Gamma[\deg] = \frac{U_0}{Rs}(\gamma + 2.5°)$$

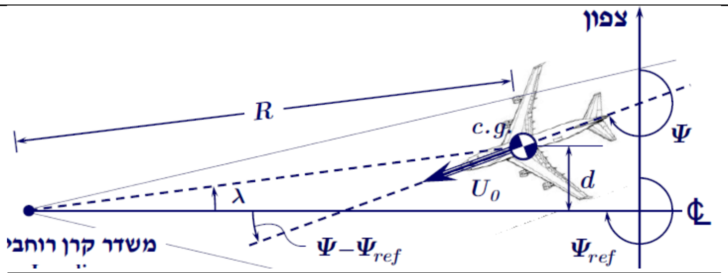
$$\Gamma_{ref} = 2.5°$$

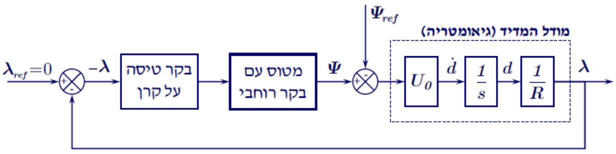


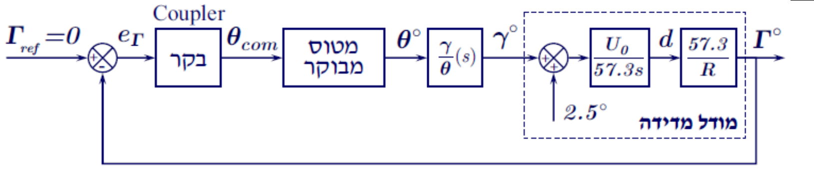
$$\dot d = U_0 \sin(\psi - \psi_{ref}) \cong U_0(\psi - \psi_{ref})° / 57.3$$

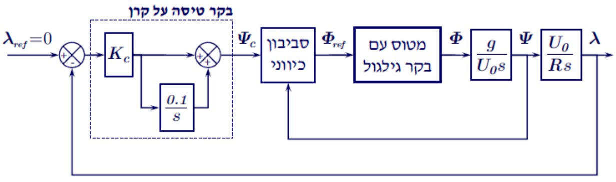
$$d(s) = \frac{U_0}{57.3 \cdot s}(\gamma + 2.5°)$$

$$\tan\lambda = \frac{d}{R} \Rightarrow \lambda[\deg] = \frac{U_0}{Rs}(\psi - \psi_{ref})°$$









תאום בפניה

$$\begin{cases} L\sin\phi = mR\dot\psi^2 = mV\dot\psi \\ L\cos\phi = mg \end{cases}$$

$$\Rightarrow \tan\phi = \frac{V}{g}\dot\psi$$

$$r = \dot\psi\cos\phi = \frac{g}{V}\sin\phi$$

$$q = \dot\psi\sin\phi = \frac{g}{V}\tan\phi\sin\phi$$

$$\frac{\phi}{\delta_a}(s) = \frac{L'_{\delta a}}{s(s - L'_p)} \Rightarrow \frac{r}{\delta_a}(s) \cong \frac{g}{Vs}\left(\frac{L'_{\delta a}}{s - L'_p}\right)$$

פיתוח תמסורת בין זווית עלרוד לזווית מסלול (קירוב):

$$a_z = Z_\alpha \alpha \cong -a_h$$

$$a_h = \ddot h = U_0\dot\gamma = -Z_\alpha\alpha$$

$$\dot\gamma = -\frac{Z_\alpha}{U_0}\alpha = -Z_w\alpha$$

$$\theta = \gamma + \alpha \Rightarrow \frac{\gamma}{\theta} = \frac{-Z_w}{s - Z_w}$$

הנחות בקירובים:

SP - $u = \dot u = 0$

Phugoid – 3DF - $I_y\dot q, M_q q, M_w \dot w = 0$

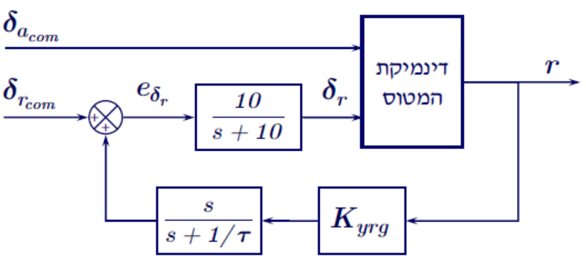
Phugoid – 2DF - " ", $M_u = 0$

DR – 2DF - $\phi, \dot\phi, \dot p = 0$

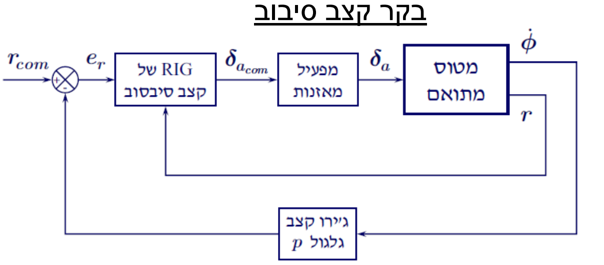
DR – 3DF - $L'_r, r, N'_p\ p, \frac{g}{U_0}\phi = 0$

$\gamma_0 = 0$ בכולם

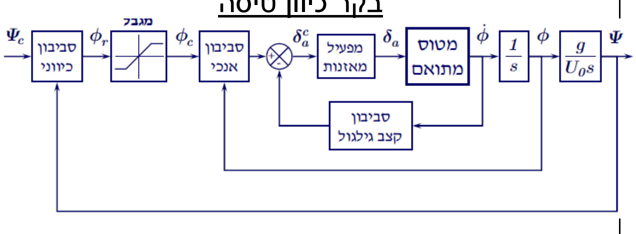
מרסן הגלגול ההולנדי



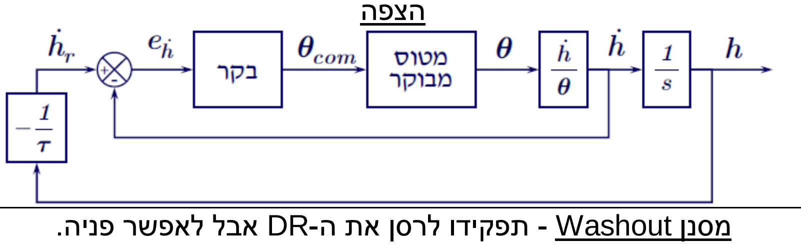
בקר קצב סיבוב



בקר כיוון טיסה



הצפה



$$h(t) = h_0 e^{-t/\tau}$$

$$\Rightarrow \dot h = -\frac{h}{\tau}$$

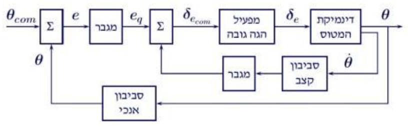
$$\begin{cases} \dot h_0 = U_0\sin(\gamma_{ref})\tau \\ R_0 + R_T = \dfrac{h_0}{\tan(\gamma_{ref})} + R_T = mU_0\tau \end{cases}$$

m - מספר קבועי זמן רצויים לנחיתה מרגע ההצפה

מסנן Washout - תפקידו לרסן את ה-DR אבל לאפשר פניה.

לשם כך יש להגביל את התדרים לפי בחירה של תדר הברך $1/\tau$ (HPF).
בתדרים הגבוהים אין הנחתה, החוג יפעל וירסן את ה-DR. אם התדר גבוה אפשר לפנות בהרבה תדרים מהירים. אם הוא נמוך יש קושי בפניה. ככל שהקוטב קרוב לראשית הוא איטי יותר.

בקר זווית עלרוד עם חוג קצב



$$\dot\theta = q, \quad \theta = \frac{q}{s} = \gamma + \alpha \quad \gamma = \frac{q}{s} - \frac{w}{U_0}$$

$$A\cos(\lambda) + B\sin(\lambda) = C\sin(\lambda + n) \quad C = \sqrt{A^2 + B^2} \quad n = \tan^{-1}\left(\frac{A}{B}\right)$$