

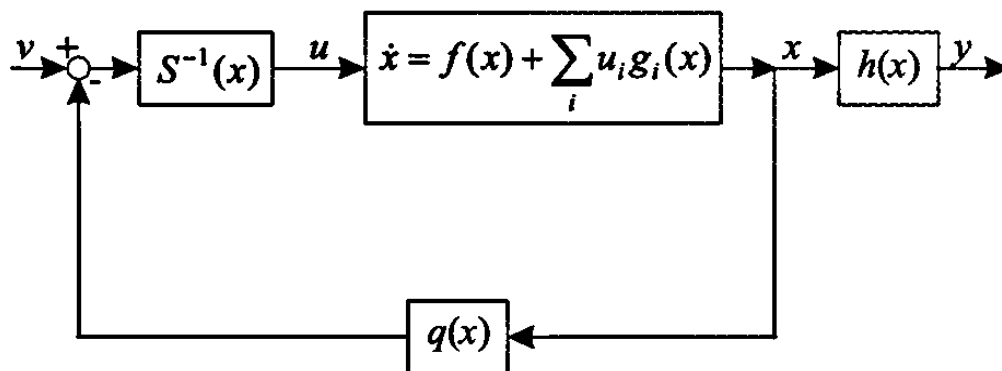
VIII. Autonóm járművek, formáció irányítás

1. Autonóm robotok irányításánál alkalmazott nemlineáris irányítási módszerek áttekintése. A bemenet/kimenet linearizálás, a backstepping és a mozgó horizontú prediktív irányítás elve. Állapotbecslés kiterjesztett Kalman-szűrővel.

Nemlineáris irányítási módszerek:

- Bemenet/kimenet linearizálás relatív fokszám, statikus visszacsatolás
Bronovsky linearis alak + zéró-dinamika
- Differenciális simaság (flatness) elvű Dinamikus állapot-visszacsatolással + koordináta transzformációval linearizálható
- Visszalépéses stabilizálás (backstepping) szigorú visszacsatolásos alak, Ljapunov technika
- Mozgó horizontú prediktív irányítás (RHC) LTI /LTV linearizálás + optimalizálás felny. körben első beavatkozó jel kiadása zárt körben

MIMO bemenet/kimenet linearizált rendszer blokkvázlata:



Szigorúan visszacsatolásos alakban adott n relatív fokszámú rendszer:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= G_1(\bar{x}_1)x_2 + f_1(\bar{x}_1) + W_1(\bar{x}_1)\delta_1(t) \quad \dots \\ \dot{x}_i &= G_i(\bar{x}_i)x_{i+1} + f_i(\bar{x}_i) + W_i(\bar{x}_i)\delta_i(t) \quad \dots \\ \dot{x}_n &= G_n(\bar{x}_n)u + f_n(\bar{x}_n) + W_n(\bar{x}_n)\delta_n(t) \quad , \quad \bar{x}_i = (x_1^T \ x_2^T \ \dots \ x_i^T)^T \\ y &= h(x_1) \quad , \quad h^{x_1}(x_1), G_i(x_i) \text{ invertálható, } \delta_i(t) \text{ korlátos} \end{aligned}$$

Állapotbecslés kiterjesztett Kalman-szűrővel (EKF): Sorfejtés az előző becslés helyén

2. Az automatikus akadályelkerülési feladat megfogalmazása földi jármű esetén. Pályatervezés az elasztikus szalag elve alapján, útszegély, statikus és mozgó akadályok figyelembevétele. Simítás spline, ppval, unmkpp, mkpp MATLAB eszközökkel, a referencia pálya meghatározása.

Automatikus akadályelkerülési feladat:

- Adott: álló és mozgó akadályok
- Pályatervezés az elasztikus szalag elve alapján
- Irányítás: Lie-algebrái (DGA), prediktív (RHC)
- 2-antennás diff. GPS+IMU, 2-szintű Kalman-szűrő
- Irányítás gyors prototípus tervezése

Automatikus ütközésselkerülő pályatervezés:

Elastikus szalag: $(r_0, t_0) \xrightarrow{\dots} (r_i, t_i) \xrightarrow{k_i, l_{0,i}} (r_{i+1}, t_{i+1}) \xrightarrow{\dots} (r_N, t_N)$

Belső és külső erők:

- Csomópontok: belső potenciál $V^{int} = \sum_{i=0}^{N-1} V_i^{int} = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{2} k_i (|r_{i+1} - r_i| - l_{0i})^2$, az erők a negatív gradiensek

- Útszegélyek: $r_i \rightarrow r_i^{B_q}$ legközelebbi az útszegély mentén, $q \in \{l, r\}$:

$$F_i^{B_q} = M^B \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{|r_i - r_i^{B_q}|}{\sigma^{B_q}}\right)^2\right) \frac{r_i - r_i^{B_q}}{|r_i - r_i^{B_q}|}, \quad \sigma^{B_q} = k^{B_q} / \sqrt{2 \ln(M^B / m^B)}, \quad k^{B_l} / k^{B_r} = 3, \quad M^B = 2, \quad m^B = 0.05$$

- Statikus akadályok: lassan változó taszító erők => megfelelő pályagörcbület

$$F_{i,stat}^{O_j} = k^{O_j} \frac{d^{O_j} / 2}{|r_i - r^{O_j}|} \frac{r_i - r^{O_j}}{|r_i - r^{O_j}|}, \quad k^{O_j} = 3$$

- Mozgó akadályok: r_i reached at $t_i \rightarrow$ moving obstacle is in $r^{O_j}(t_i)$

$$F_{i,mov}^{O_j} = k^{O_j} \exp\left(-\left(\frac{|r_i - r^{O_j}(t_i)| - d_j}{2}\right)^2\right) \frac{r_i - r^{O_j}(t_i)}{|r_i - r^{O_j}(t_i)|}$$

- Erőegyensúly: $F_i^{sum} = F_i^{int} + F_i^{B_l} + F_i^{B_r} + \sum_{j=1}^M F_{i*}^{O_j} = 0$, $x = (r_1^T, r_2^T, \dots, r_N^T)$,

$$f(x) = ((F_1^{sum})^T, (F_2^{sum})^T, \dots, (F_N^{sum})^T)$$

- Matlab fsolve: $f(x) = 0$, Jacobian (derivative) of $f(x) \rightarrow$ 1s számítási idő
- Deriváltak: elasztikus szalag \rightarrow törött vonal $(x,y) \rightarrow (t,x), (t,y)$ sorozatok
simítás: MATLAB: spline, ppval, unmkpp, mkpp
- Referencia pálya: $\beta=0 \Rightarrow X, \dot{X}, \ddot{X}, Y, \dot{Y}, \ddot{Y}, v, \dot{v}, \kappa, \psi, \dot{\psi}, \ddot{\psi}$ (kívánt)

3. Földi jármű modelljének bemenet-affin approximációja. A modell nemlineáris szétcsatolása differenciálgeometriai (DGA) módszerrel. A paraméterek megválasztása és a zárt szabályozási kör alakja.

Approximált nemlineáris (bemenet-affin) járműmodell:

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} -x_3 + (Tx_1 + S_h)/(m_v x_4) \\ x_3 \\ -S_h l_R / I_{zz} \\ -T / m_v \\ x_4 \cos(x_1 + x_2) \\ x_4 \sin(x_1 + x_2) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 1/(m_v x_4) & -x_1/(m_v x_4) \\ 0 & 0 \\ l_F / I_{zz} & 0 \\ 0 & 1/m_v \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_v \\ F_{IR} \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$$\dot{x} = A(x) + B(x)u$$

$$y = \begin{pmatrix} x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} = C(x)$$

Bement-affin modell nemlineáris szétcsatolása:

Jelölések: $\bar{y}_1 = \lambda_1 w_1 - \alpha_{01} x_5 - \alpha_{11} x_4 C_{12}$, $\bar{y}_2 = \lambda_2 w_2 - \alpha_{02} x_6 - \alpha_{12} x_4 S_{12}$

Paraméterek megválasztása: $\lambda_1 = \lambda_2 := \lambda$, $\alpha_{01} = \alpha_{02} := \lambda$, $\alpha_{11} = \alpha_{12} = 2\sqrt{\lambda}$

Aperiodikus határeset: $s^2 + 2\sqrt{\lambda}s + \lambda = 0$

Irányítás (DGA): $w_i := w_{id} + \frac{1}{\lambda}(\alpha_{1i} \dot{w}_{id} + \ddot{w}_{id})$, $w_{1d}(t) = X_d(t)$, $w_{2d}(t) = Y_d(t)$

$$u_1 = -S_h + [(C_{12} x_1 - S_{12}) \bar{y}_1 + (S_{12} x_1 + C_{12}) \bar{y}_2] m_v$$
 , $u_2 = -S_h + [(C_{12} x_1 - S_{12}) \bar{y}_1 + (S_{12} x_1 + C_{12}) \bar{y}_2] m_v$

$$\delta_w = \frac{S_v}{c_F} + \beta + \frac{l_F \psi}{v_G}$$

Zárt szabályozási kör: $(\ddot{w}_{id} - \ddot{y}_i) + \alpha_{1i}(\dot{w}_{id} - \dot{y}_i) + \lambda(w_{id} - y_i) = 0$

4. A nemlineáris mozgó horizontú prediktív irányítási algoritmus (RHC). Linearizálás a horizont kezdetén, LTV állapotegyenlet a perturbációkra. A célfüggvény alakja, korlátozás a végállapotra, a megoldás elve. Az RHC algoritmus lépései.

LTV linearizálás minden horizont kezdetén:

- Állapot sorozat (nominális): $\{x_0, x_1, \dots, x_N\}$
- Irányítás sorozat (nominális): $\{u_0, u_1, \dots, u_{N-1}\}$
- Kimenet sorozat (nominális): $\{y_0 = C x_0, y_1 = c x_1, \dots, y_N = C x_N\}$
- Előírt kimenet sorozat: $\{y_{d0}, y_{d1}, \dots, y_{dN}\}$
- Hiba sorozat (nominális): $\{e_0 = y_{d0} - y_0, e_1 = y_{d1} - y_1, \dots, e_N = y_{dN} - y_N\}$
- Állapot perturbációk: $\{\delta x_0 = \hat{x}_0 - x_0, \delta x_1, \dots, \delta x_N\}$
- Irányítás perturbációk: $\{\delta u_0, \delta u_1, \dots, \delta u_{N-1}\}$
- LTV perturbált rendszer: $\delta x_{i+1}, A_i \delta x_i + B_i \delta u_i$

- Kimenet hibák (reális): $y_{di} - C(x_i + \delta x_i) = e_i - \delta y_i$
- Költségfüggvény: $J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N-1} \|e_i - \delta y_i\|^2 + \frac{1}{2} \lambda \sum_{i=0}^{N-1} \|\delta u_i\|^2$

LTV állapotegyenlet a perturbációkra:

Állapot perturbációk

Kimenet perturbációk

$$\begin{pmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \\ \vdots \\ \delta x_{N-1} \\ \delta x_N \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 A_0 \\ \vdots \\ A_{N-2} \cdots A_1 A_0 \\ A_{N-1} \cdots A_1 A_0 \end{bmatrix} \delta x_0 + \begin{bmatrix} B_0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ A_1 B_0 & B_1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \cdots & \ddots & 0 & 0 \\ A_{N-2} \cdots A_1 B_0 & A_{N-2} \cdots A_2 B_1 & \cdots & B_{N-2} & 0 \\ A_{N-1} \cdots A_1 B_0 & A_{N-1} \cdots A_2 B_1 & \cdots & A_{N-1} B_{N-2} & B_{N-1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta u_0 \\ \delta u_1 \\ \vdots \\ \delta u_{N-2} \\ \delta u_{N-1} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \delta y_1 \\ \delta y_2 \\ \vdots \\ \delta y_{N-1} \\ \delta y_N \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} CA_0 \\ CA_1 A_0 \\ \vdots \\ CA_{N-2} \cdots A_1 A_0 \\ CA_{N-1} \cdots A_1 A_0 \end{bmatrix} \delta x_0 + \begin{bmatrix} CB_0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ CA_1 B_0 & CB_1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 & 0 \\ CA_{N-2} \cdots A_1 B_0 & \cdots & \cdots & CB_{N-2} & 0 \\ CA_{N-1} \cdots A_1 B_0 & \cdots & \cdots & CA_{N-1} B_{N-2} & CB_{N-1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta u_0 \\ \delta u_1 \\ \vdots \\ \delta u_{N-2} \\ \delta u_{N-1} \end{pmatrix}$$

Tömör alak

$$\begin{pmatrix} \delta y_1 \\ \delta y_2 \\ \vdots \\ \delta y_{N-1} \end{pmatrix} = P_1 \delta x_0 + H_1 \delta U \quad P_1 = \begin{bmatrix} p_1^T \\ \vdots \\ p_{N-1}^T \end{bmatrix}_{m(N-1) \times n}, \quad H_1 = \begin{bmatrix} h_1^T \\ \vdots \\ h_{N-1}^T \end{bmatrix}_{m(N-1) \times Nr}$$

$$\delta y_N = P_2 \delta x_0 + H_2 \delta U \quad P_2 = [p_N^T]_{m \times n}, \quad H_2 = [h_N^T]_{m \times Nr}$$

$$n = \dim x, \quad r = \dim u, \quad m = \dim y$$

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N-1} \|e_i - \delta y_i\|^2 + \frac{1}{2} \lambda \sum_{i=0}^{N-1} \|\delta u_i\|^2 \rightarrow \min$$

$$e_N - \delta y_N = e_N - (P_2 \delta x_0 + H_2 \delta U) = 0$$

Jelölések: $\bar{m} = \sum_{i=1}^{N-1} h_i e_i$, $L_1 := H_1^T H_1 + \lambda I$, $L_u := H_2 L_1^{-1} H_2^T$

Megoldás Lagrange-multiplikátor szabállyal:

$$\delta U = L^{-1} \{ H_2^T L_u^{-1} e_N + (I - H_2^T L_u^{-1} H_2 L_1^{-1}) \bar{m} - [H_1^T P_1 + H_2^T L_u^{-1} (P_2 - H_2 L_1^{-1} H_1^T P_1)] \delta x_0 \}$$

Irányítás zárt körben: $u_0 + \delta u_0$, u_0 : Nominális irányítás (I. algoritmus),

δu_0 : Első eleme a felnyitott körben optimális δU irányítási sorozatnak

RHC algoritmus:

1. Nominális állapot sorozat számítása a kezdeti állapotból és a nominális irányítás sorozatból. Nominális kimenet és hiba sorozatok számítása.
2. Diszkrétidejű LTV modell számítása a perturbációk számára Euler-formulával.
3. Optimális irányítás sorozat számítása felnyitott körben (változás és teljes). Első elem kiadása zárt körben.
4. Következő irányítás számítása a horizont vége után (DGA, LS, ismétlés). A bővített irányítás kell az eltoláshoz.
5. Nominális irányítás számítása a következő horizont számára a bővített irányítási sorozat balra tolásával.

5. Állapotbecslés GPS/IMU érzékelőkkel földi robot esetén. 2-antennás differenciális GPS. Kalman-szűrő az első szinten, szögsebesség becslés. Kalman-szűrő a második szinten. Az állapotbecslés implementálása, sebesség és pozíció becslés.

Érzékelő: 2 antennás differenciális GPS, 3D gyorsulásérzékelők és giroszkópok

- V_m^{GPS} sebesség a GPS koordináta-rendszerben
- Ψ_m^{GPS} orientáció (yaw) a GPS koordináta-rendszerben
- $a_{x,m}$ longitudinális gyorsulás az autó koordináta-rendszerben
- $a_{y,m}$ transzverzális gyorsulás az autó koordináta-rendszerben
- r_m szögsebesség az autó koordináta-rendszerben
- Csúszási szög: $\gamma = \text{atan2}(V_2^{GPS}, V_1^{GPS}) \rightarrow \beta^{GPS} = \gamma - \psi_m^{GPS}$
 $u_{x,m}^{GPS} = \|V_m^{GPS}\| \cos(\beta^{GPS}) + \text{noise}$, $u_{y,m}^{GPS} = \|V_m^{GPS}\| \sin(\beta^{GPS}) + \text{noise}$

Kalman-szűrő az első szinten

Folytonosidejű modell:

$$\begin{pmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{r}_{bias} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \psi \\ r_{bias} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} r_m + w$$

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \psi \\ 1/s_r \\ r_{bias}/s_r \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & r_m & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \psi \\ 1/s_r \\ r_{bias}/s_r \end{pmatrix} + w$$

$$\psi_m^{GPS} = [1 \quad 0] \begin{pmatrix} \psi \\ r_{bias} \end{pmatrix} + n$$

$$\psi_m^{GPS} = [1 \quad 0 \quad 0] (\psi \quad 1/s_r \quad r_{bias}/s_r)^T + n$$

Diszkrétidejű modell:

$$A_{d1} = \begin{bmatrix} 0 & -T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B_{d1} = \begin{bmatrix} T \\ 0 \end{bmatrix}; A_{d1} = I_3 + A_{c1}T, B_{d1} = 0_{3 \times 1}$$

Szögsebesség:

$$r = \hat{\psi}' := -\hat{r}_{bias} + r_m; \quad r = \hat{\psi}' := r_m(1/\hat{s}_r) - (\hat{r}_{bias}/\hat{s}_r)$$

Kalman-szűrő a második szinten

Folytonosidejű modell:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} u_x \\ a_{x,bias} \\ u_y \\ a_{y,bias} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -r & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ a_{x,bias} \\ u_y \\ a_{y,bias} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_{x,m} \\ a_{y,m} \end{pmatrix} + w$$

$$\begin{pmatrix} u_{x,m}^{GPS} \\ u_{y,m}^{GPS} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ a_{x,bias} \\ u_y \\ a_{y,bias} \end{pmatrix} + n$$

Diszkrétidejű modell:

$$A_{d2} = \begin{bmatrix} C(rT) & -S(rT)/r & S(rT) & -[1-C(rT)]/r \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S(rT) & [1-C(rT)]/r & C(rT) & S(rT)/r \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad B_{d2} = \begin{bmatrix} S(rT)/r & [1-C(rT)]/r \\ 0 & 0 \\ -[1-C(rT)]/r & S(rT)/r \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Állapotbecslés implementálása:

Time update: $x_-(t+1) = A_d x_+(t) + B_d u(t)$, $P_-(t+1) = A_d P_+(t) A_d^T + Q$

Measurement update: $x_+(t) = x_-(t) + K [y(t) - C x_-(t)]$, $K = P_-(t) C^T [C P_-(t) C^T + R]^{-1}$,
 $P_+(t) = [I - KC] P_-(t)$

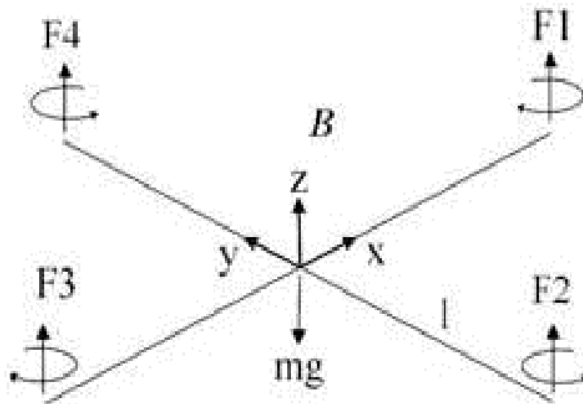
Mintavételi idők: $T_{INS} = T = 0.01s$ (100Hz), $T_{GPS,vel} = 0.1s$ (10Hz), $T_{GPS,att} = 0.2s$ (5Hz)

További becslések: $\hat{v}_G = \sqrt{\hat{u}_x^2 + \hat{u}_y^2}$, $\hat{\beta} = \text{atan2}(\hat{u}_x, \hat{u}_y)$

$$\hat{X} := \hat{X} + T \hat{v}_G \cos(\hat{\psi} + \hat{\beta}) \quad , \quad \hat{Y} := \hat{Y} + T \hat{v}_G \sin(\hat{\psi} + \hat{\beta})$$

6. Négyrotoros autonóm beltéri helikopter irányítása. Dinamikus modell, emelőerő és forgató nyomatékok, mozgásegyenletek. Backstepping irányítás az approximált modell alapján. A kétszintű backstepping irányítás blokkvázlata, a benne szereplő jelek értelmezése.

Dinamikus modell:



Emelő erő és forgatónyomatékok:

$$u = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 = b \sum_{i=1}^4 \Omega_i^2, \quad \tau = \begin{pmatrix} lb(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ lb(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ d(\Omega_2^2 + \Omega_4^2 - \Omega_1^2 - \Omega_3^2) \end{pmatrix}$$

Mozgásegyenletek:

$$m \ddot{\xi} = AF_{ext} + F_g, \quad I \dot{\omega} + \omega \times (I \omega) = \tau_{ext}$$

Approximált differenciálegyenlete:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= (C_\Phi S_\Theta C_\Psi + S_\Phi S_\Psi) \frac{u}{m} =: u_x \frac{u}{m} & \ddot{\Phi} &= \frac{I_y - I_z}{I_x} \dot{\Theta} \dot{\Psi} - \frac{I_r}{I_x} \dot{\Theta} \Omega + \frac{1}{I_x} \tau_x \\ \ddot{y} &= (C_\Phi S_\Theta S_\Psi - S_\Phi C_\Psi) \frac{u}{m} =: u_y \frac{u}{m} & \ddot{\Theta} &= \frac{I_z - I_x}{I_y} \dot{\Phi} \dot{\Psi} + \frac{I_r}{I_y} \dot{\Phi} \Omega + \frac{1}{I_y} \tau_y \\ \ddot{z} &= -g + C_\Phi C_\Theta \frac{u}{m} & \ddot{\Psi} &= \frac{I_x - I_y}{I_z} \dot{\Phi} \dot{\Theta} + \frac{1}{I_z} \tau_z \end{aligned}$$

Backstepping irányítás elve egy változó esetén:

$$\ddot{x} = f(x, \dot{x}) + bu$$

$$q_1 := x_d - x$$

$$q_2 := \dot{x} - \dot{x}_d - \alpha_1 q_1 = -\dot{q}_1 - \alpha_1 q_1 \Rightarrow \dot{q}_1 = -\alpha_1 q_1 - q_2$$

$$\dot{q}_2 = \ddot{x} - \ddot{x}_d - \alpha_1 \dot{q}_1 = \ddot{x} + \alpha_1 (q_2 + \alpha_1 q_1) =: q_1 - \alpha_2 q_2$$

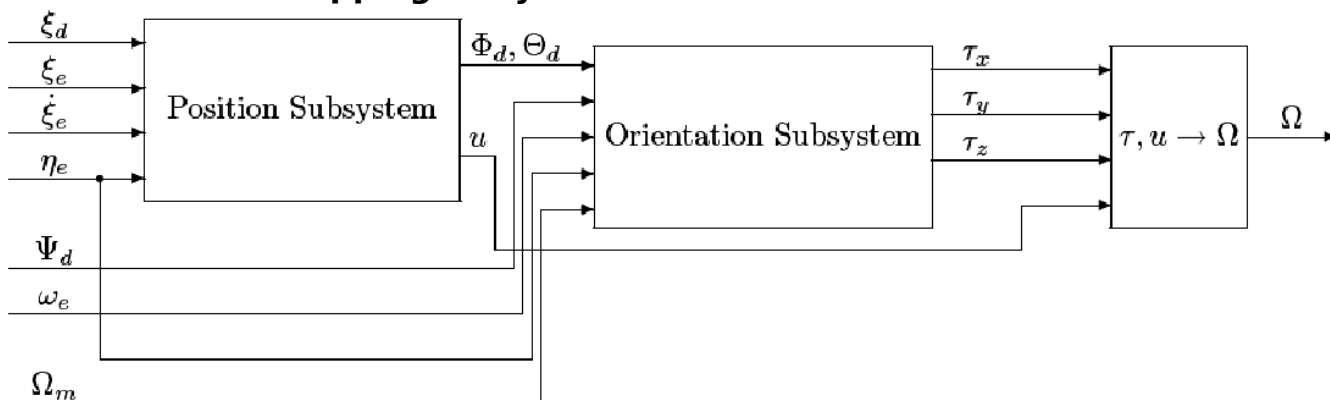
Irányítási törvény egy változóra:

$$u = \frac{1}{b} \{ q_1 - \alpha_2 q_2 - \alpha_1 (\alpha_1 q_1 + q_2) - f(x, \dot{x}) \}$$

$$V = \frac{1}{2} (q_1^2 + q_2^2) \Rightarrow \dot{V} = q_1 (-q_2 - \alpha_1 q_1) + q_2 [f(x, \dot{x}) + bu + \alpha_1 (q_2 + \alpha_1 q_1)]$$

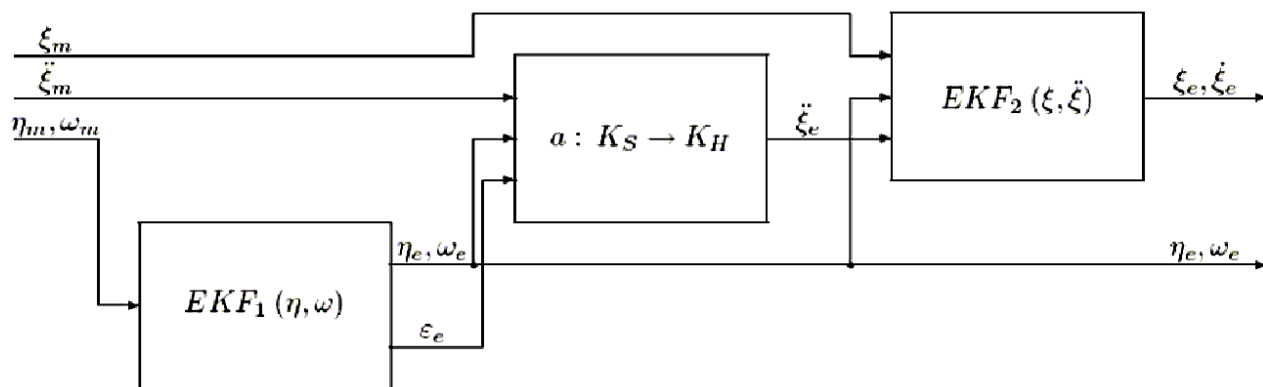
$$\dot{V} = -(\alpha_1 q_1^2 + \alpha_2 q_2^2) < 0 \Rightarrow \text{aszimptotikusan stabil}$$

Kétszintű backstepping irányítás:



7. Kétszintű állapotbecslés képfeldolgozás és IMU bevonásával. A kétszintű állapotbecslés blokkvázlata, a benne szereplő jelek értelmezése. Gyors prototípus tervezés, hardware-in-the-loop tesztelés. A tesztelési struktúra blokkvázlata, kommunikáció és szinkronizálás.

Kétszintű állapotbecslés: $\xi = (x, y, z)^T$, $\eta = (\Phi, \Theta, \Psi)^T$



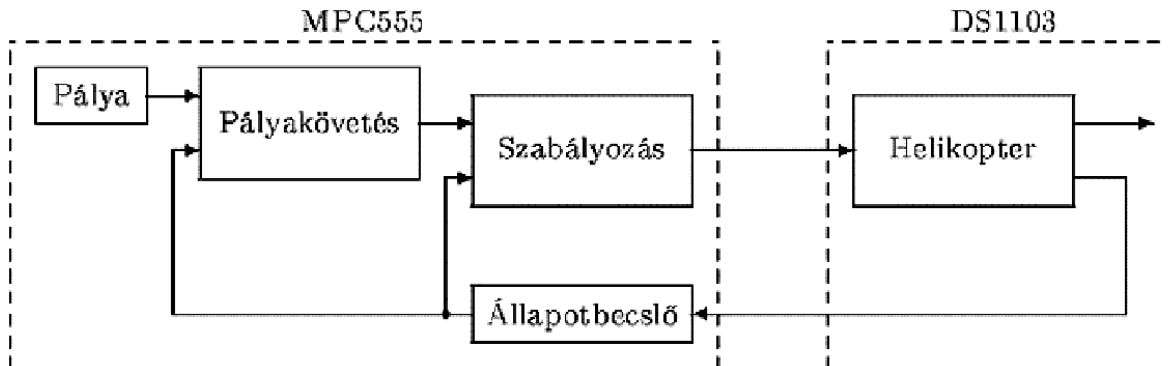
Gyors prototípus tervezés:

- Szabályozó, helikopter és szenzorok MATLAB/Simulink eszközökkel definiálva
- Tesztelt megoldások konverziója RTW és Target Compiler bevonásával MPC555 és dSPACE eszközökre
- MPC555 C compiler (Code Warrior)
- DS1103 Control Desk alatt fut

Hardware-in-the-loop test:

- Irányítási rendszer valós időben fut, $T_s=30ms$ mintavételi idő
- Irányítási algoritmus Freescale MPC555 mikroprocomputer-en implementálva
- Helikopter és szenzor rendszer DS1103 fejlesztőkártyán szimulálva valós időben
- Kommunikáció CAN-buszon valós időben

Tesztelési struktúra:



Kommunikáció szinkronizálás + Indítási feltételek

8. Formációban haladó autonóm járművek irányítása. Pályaparaméterezés egyetlen skaláris változóval. Kommunikációs kapcsolat, dinamikusan változó csoportok, kommunikációs gráf. A backstepping technikán és a passzivitás elméletén alapuló hierarchikus formáció irányítás elve. A szinkronizált pályakövetés blokkvázlata, a blokkvázlat részeinek feladatai.

Formációban haladó autonóm járművek irányítása:

- Vízszintes síkban mozgó járművek
- Járművek előírt pályája geometriailag egy skalár változóban paraméterezett
- Konstans közös haladási sebesség (v)
- Szinkronizációs hibák decentralizáltan szabályozandók (szűrt gradiens, SPR)
- Csoportba szerveződött járművek, korlátozott kommunikáció

Hierarchikus formáció irányítás elve:

- Backstepping technikával szabályozott járművek + kiegészítő szinkronizáció szabályozás
- A kommunikációs kapcsolat csak a csoporton belüli járművek szinkronizációs hibájára terjed ki ($v-w$)
- A kommunikációs topológiát egy D mátrix írja le
- Az irányítás hierarchikus
- Elméleti alap: passzivitás elmélet, Ljapunov direkt módszere, szigorúan pozitív valós rendszerek (SPR)

Szinkronizált pályakövetés blokkvázlata:

