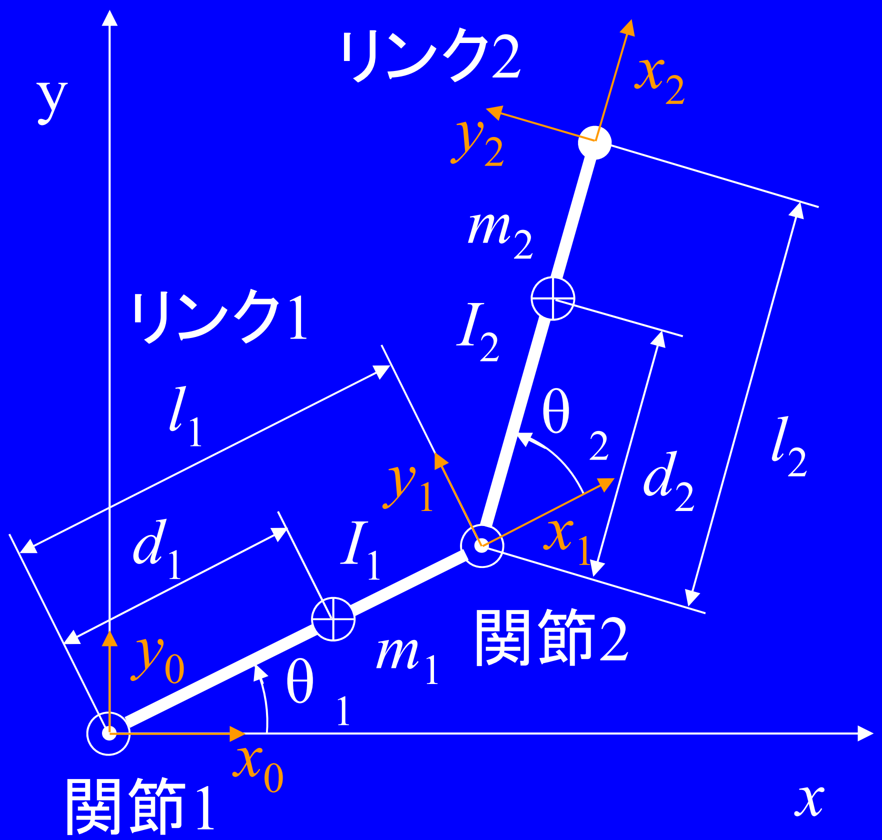
2DOF SCARA Robot



θ_i	関節 i の回転角度
m_i	リンク i の質量
I_i	リンク i の重心回りの慣性モーメント
l_i	リンク i の長さ
d_i	関節 i からリンク i の重心までの長さ
D_i	関節 i の粘性摩擦係数

$\boldsymbol{p} = [x \;\; y]^T$ 手先位置　　$\boldsymbol{q} = [\theta_1 \;\; \theta_2]^T$ 関節変数

DH表現リンクパラメータ $d_1 = d_2 = 0, \alpha_1 = \alpha_2 = 0, a_1 = l_1, a_2 = l_2$

順運動学
(Direct Kinematics)

座標変換

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & l_1C_1 \\ S_1 & C_1 & 0 & l_1S_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & l_2C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & l_2S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{12} & -S_{12} & 0 & l_1C_1 + l_2C_{12} \\ S_{12} & C_{12} & 0 & l_1S_1 + l_2S_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

手先座標　$\boldsymbol{p} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{q}),\ \ \dot{\boldsymbol{p}} = J(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}$

$$x = l_1C_1 + l_2C_{12}$$
$$y = l_1S_1 + l_2S_{12}$$

ヤコビ行列

$$J(\boldsymbol{q}) = \begin{bmatrix} -l_1S_1 - l_2S_{12} & -l_2S_{12} \\ l_1C_1 + l_2C_{12} & l_2C_{12} \end{bmatrix}$$

ただし，　$S_1 = \sin\theta_1,\quad C_1 = \cos\theta_1,\quad S_2 = \sin\theta_2,\quad C_2 = \cos\theta_2$

$S_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2),\quad C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$

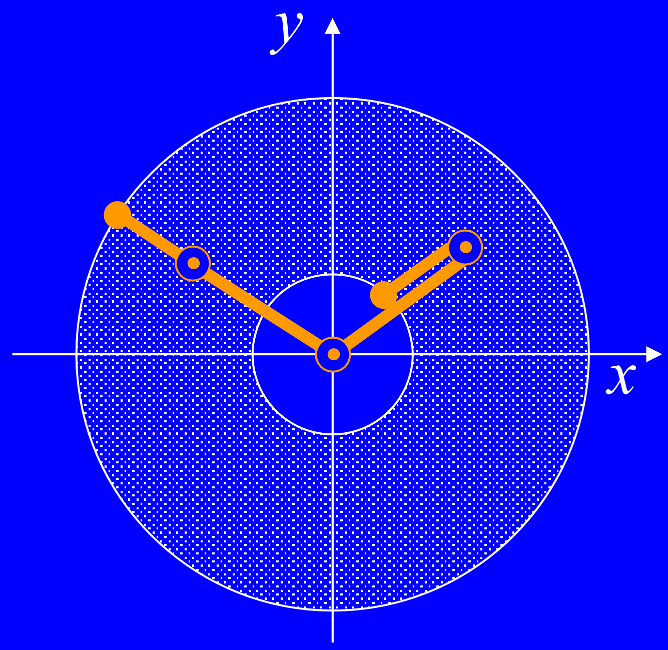
特異姿勢
(Singular Configuration)

$$\mathrm{rank}\ J(\boldsymbol{q}) < \max_{\boldsymbol{q}}\ \mathrm{rank}\ J(\boldsymbol{q})$$ 望みの手先速度を出せない

$$\boldsymbol{p} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{q}),\quad \dot{\boldsymbol{p}} = J(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}$$

$$J(\boldsymbol{q}) = \begin{bmatrix} -l_1S_1 - l_2S_{12} & -l_2S_{12} \\ l_1C_1 + l_2C_{12} & l_2C_{12} \end{bmatrix}$$

$$\det J(\boldsymbol{q}) = l_1 l_2 S_2 = 0 \quad \therefore \theta_2 = 0, \pi$$



逆運動学
(Inverse Kinematics)

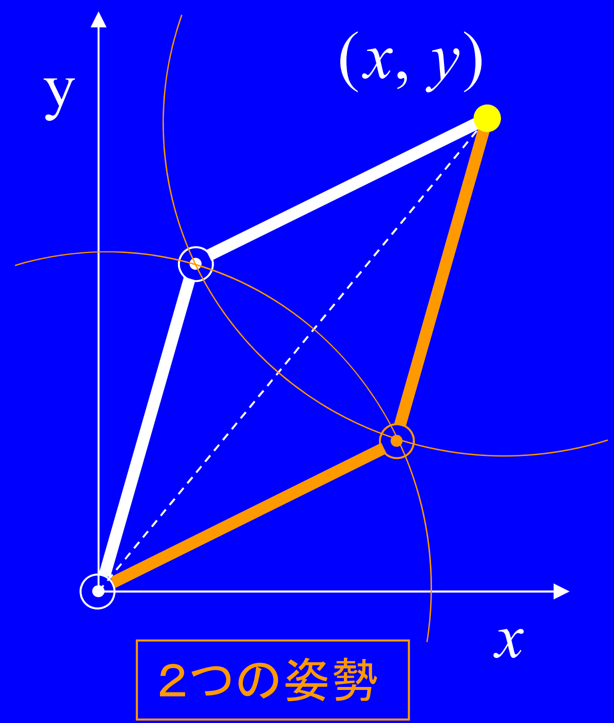
手先座標　$\boldsymbol{p} = [x \quad y]^T$

関節角　$\boldsymbol{q} = [\theta_1 \quad \theta_2]^T$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \pm \cos^{-1}\left(\frac{l_1^{\,2} + L^2 - l_2^{\,2}}{2 l_1 L}\right)$$

$$\theta_2 = \mp\left(\pi - \cos^{-1}\left(\frac{l_1^{\,2} + l_2^{\,2} - L^2}{2 l_1 l_2}\right)\right)$$

ただし，　$L = \sqrt{x^2 + y^2}$



原点中心，半径l_1の円と，中心(x, y)，半径l_2の円との交点として，求めることもできる

動力学(その1)

(Dynamics)

$$\boxed{\boldsymbol{\tau} = M(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) + D\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})}$$

関節変数 $\boldsymbol{q} = [\theta_1 \quad \theta_2]^T$

入力トルク $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \quad \tau_2]^T$

慣性行列

$$M(\boldsymbol{q}) = \begin{bmatrix} 2M_{12}C_2 + m_{11} & M_{12}C_2 + m_{22} \\ M_{12}C_2 + m_{22} & m_{22} \end{bmatrix}$$

遠心力・コリオリ力

$$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) = \begin{bmatrix} -M_{12}S_2(\dot{\theta}_2^{\,2} + 2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2) \\ M_{12}S_2\dot{\theta}_1^{\,2} \end{bmatrix}$$

重力

$$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) = \begin{bmatrix} g_1C_1 + g_2C_{12} \\ g_2C_{12} \end{bmatrix}$$

粘性摩擦係数

$$D = \begin{bmatrix} D_1 & 0 \\ 0 & D_2 \end{bmatrix}$$

ただし,

$$M_{12} = m_2 l_1 d_2$$
$$m_{11} = m_1 d_1^{\,2} + m_2(l_1^{\,2} + d_2^{\,2}) + I_1 + I_2$$
$$m_{22} = m_2 d_2^{\,2} + I_2$$
$$g_1 = (m_1 d_1 + m_2 l_1)g$$
$$g_2 = m_2 d_2 g$$

動力学（その2）
(Dynamics)

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\tau} &= M(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) + D\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) \\ &= M(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\underline{\dot{\boldsymbol{q}}} + D\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) \\ &= \zeta(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}},\underline{\dot{\boldsymbol{q}}},\ddot{\boldsymbol{q}})\boldsymbol{a}\end{aligned}$$

$$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) = \begin{bmatrix} -M_{12}S_2(\dot{\theta}_2{}^2 + 2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2) \\ M_{12}S_2\dot{\theta}_1{}^2 \end{bmatrix} = C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} \qquad C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) = \begin{bmatrix} -M_{12}S_2\dot{\theta}_2 & -M_{12}S_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ M_{12}S_2\dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$\dot{M}(\boldsymbol{q}) - 2C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})$ は歪対称行列 $\qquad \boldsymbol{q}^T\left(\dot{M}(\boldsymbol{q}) - 2C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\right)\boldsymbol{q} = 0$

例

$$\boldsymbol{a} = \begin{bmatrix} M_{12} & m_{11} & m_{22} & D_1 & D_2 & g_1 & g_2 \end{bmatrix}^T$$ パラメータ

$$\zeta(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}},\underline{\dot{\boldsymbol{q}}},\ddot{\boldsymbol{q}}) = \begin{bmatrix} C_2(2\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) - S_2\{\dot{\theta}_2\underline{\dot{\theta}_1} + (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\ \ \underline{\dot{\theta}_2}\} & \ddot{\theta}_1 & \ddot{\theta}_2 & \dot{\theta}_1 & 0 & C_1 & C_{12} \\ C_2\ddot{\theta}_1 + S_2\dot{\theta}_1\underline{\dot{\theta}_1} & 0 & \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 & 0 & \dot{\theta}_2 & 0 & C_{12} \end{bmatrix}$$

同定（その1）
(Identification)

(1) 静止試験..一定トルクを与え，重力と釣合せ，静止させる

$$\begin{bmatrix}\tau_1\\ \tau_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}g_1C_1+g_2C_{12}\\ g_2C_{12}\end{bmatrix}$$

(2) 運動試験..各関節を固定し， 各軸単独で重力補償＋入力を与える （$\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}},\ddot{\boldsymbol{q}}$が測定可なら，最小2乗法などを用いる）

(a) 関節1を固定

$$\bar{\tau}_2=m_{12}\ddot{\theta}_2+D_2\dot{\theta}_2$$

(b) 関節2を0°で固定

$$\bar{\tau}_1=(2M_{12}+m_{11})\ddot{\theta}_1+D_1\dot{\theta}_1$$

(c) 関節2を90°で固定

$$\bar{\tau}_1=m_{11}\ddot{\theta}_1+D_1\dot{\theta}_1$$

等角速度運動を行わせ，
粘性摩擦係を求めた後，
角加速度運動を行わせ，
慣性行列の係数を求める
方法などもある

同定（その2）
(Identification)

運動方程式　$\boldsymbol{\tau} = \zeta(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}, \underline{\dot{\boldsymbol{q}}}, \ddot{\boldsymbol{q}})\boldsymbol{a}$

パラメータ　$\boldsymbol{a} = \begin{bmatrix} M_{12} & m_{11} & m_{22} & D_1 & D_2 & g_1 & g_2 \end{bmatrix}^T$　に関して線形

$$\zeta(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}, \underline{\dot{\boldsymbol{q}}}, \ddot{\boldsymbol{q}}) = \begin{bmatrix} C_2(2\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) - S_2\{\dot{\theta}_2\underline{\dot{\theta}_1} + (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\ \underline{\dot{\theta}_2}\} & \ddot{\theta}_1 & \ddot{\theta}_2 & \dot{\theta}_1 & 0 & C_1 & C_{12} \\ C_2\ddot{\theta}_1 + S_2\dot{\theta}_1\underline{\dot{\theta}_1} & 0 & \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 & 0 & \dot{\theta}_2 & 0 & C_{12} \end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}, \ddot{\boldsymbol{q}}$ が測定可なら，いくつかの時刻で測定を行い，最小2乗法などを用いて一挙に推定

$$\hat{\boldsymbol{a}} = (A^T A)^{-1} A^T \boldsymbol{y} \qquad \text{ここで} \qquad A = \begin{bmatrix} \zeta(\boldsymbol{q}(t_1), \dot{\boldsymbol{q}}(t_1), \underline{\dot{\boldsymbol{q}}}(t_1), \ddot{\boldsymbol{q}}(t_1)) \\ \vdots \\ \zeta(\boldsymbol{q}(t_n), \dot{\boldsymbol{q}}(t_n), \underline{\dot{\boldsymbol{q}}}(t_n), \ddot{\boldsymbol{q}}(t_n)) \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{y} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}(t_1) \\ \vdots \\ \boldsymbol{\tau}(t_n) \end{bmatrix}$$

平衡点近傍での線形化
(Linearization)

重力補償をする平衡点 $\boldsymbol{q}_0$ の近傍で線形化

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \Delta\theta_1 & \Delta\theta_2 & \Delta\dot{\theta}_1 & \Delta\dot{\theta}_2 \end{bmatrix}^T, \quad \boldsymbol{u} = \begin{bmatrix} \Delta\tau_1 & \Delta\tau_2 \end{bmatrix}^T$$

状態方程式 $$\boxed{\dot{\boldsymbol{x}} = A\boldsymbol{x} + B\boldsymbol{u}}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I_2 \\ -J^{-1}K & -J^{-1}D \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ J^{-1} \end{bmatrix}$$

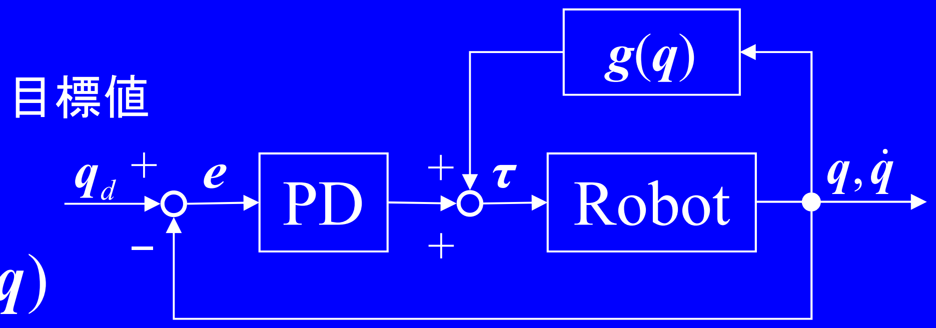
$J = M(\boldsymbol{q}_0)$, I_2 は2×2単位行列

$$K = -\begin{bmatrix} m_1 g d_1 \sin\theta_{10} + m_2 g\{l_1 \sin\theta_{10} + d_2 \sin(\theta_{10}+\theta_{20})\} & m_2 g d_2 \sin(\theta_{10}+\theta_{20}) \\ m_2 g d_2 \sin(\theta_{10}+\theta_{20}) & m_2 g d_2 \sin(\theta_{10}+\theta_{20}) \end{bmatrix}$$

ただし，重力項が無い場合（ $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) = 0$ ）は、$K = 0$

重力補償+PDフィードバック
(Gravity Compensation & PD Control)

関節角PTP制御



制御則

$$\boldsymbol{\tau} = -K_p(\boldsymbol{q} - \boldsymbol{q}_d) - K_d\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})$$

K_p, K_d 正定対角行列

安定性

$$V(t) = \frac{1}{2}\left\{\dot{\boldsymbol{q}}^T M(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} + (\boldsymbol{q} - \boldsymbol{q}_d)^T K_p(\boldsymbol{q} - \boldsymbol{q}_d)\right\} > 0$$

$$\dot{V}(t) = -\dot{\boldsymbol{q}}^T(K_d + D)\dot{\boldsymbol{q}} \le 0$$

また、$\dot{\boldsymbol{q}} = 0$ の時のみ $\dot{V}(t) = 0$

$\Downarrow$

平衡点 $(\boldsymbol{q}_d, 0)$ は漸近安定

（補）Liapunovの安定判別

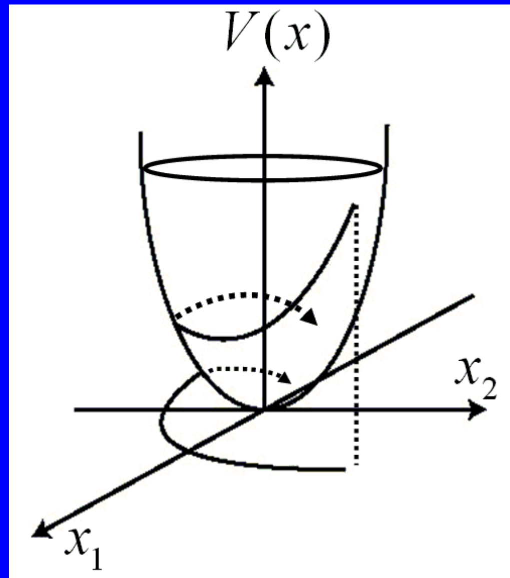
リアプノフ関数

$\dfrac{\partial V(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}}$ が連続であり，ベクトル $\boldsymbol{x}(t)$

について恒等的に $V(\boldsymbol{x}) > 0$ となり，

かつ，システムにそっての時間微分が

$\dot{V}(\boldsymbol{x}) \leq 0$ となるスカラー関数 $V(\boldsymbol{x})$



非線形システム $\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(t))$ の平衡点 $\boldsymbol{x} = 0$

リアプノフ関数が存在 $\Longrightarrow$ リアプノフ安定

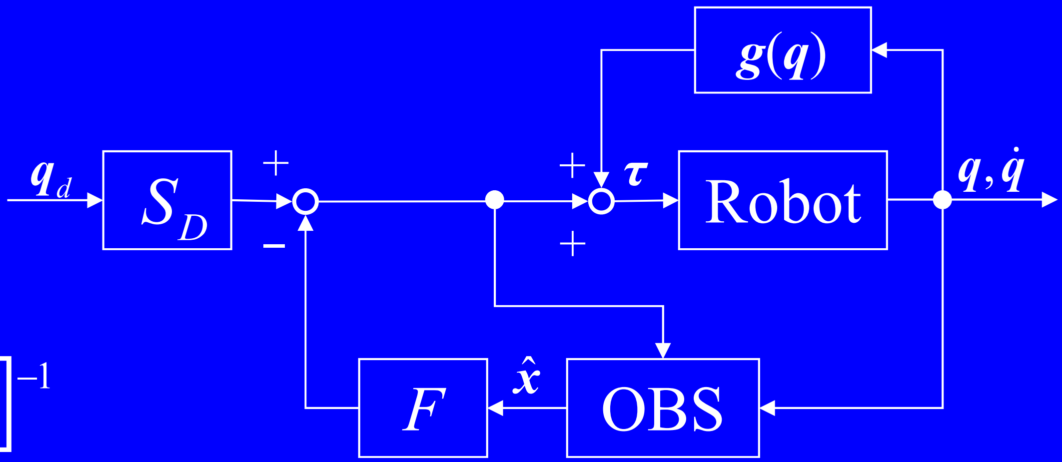
リアプノフ関数が存在して，$\dot{V}(\boldsymbol{x}) < 0$ $\Longrightarrow$ 漸近安定

状態フィードバック
(State Feedback)

制御則

$$\boldsymbol{\tau} = S_D \boldsymbol{q}_d - F\hat{\boldsymbol{x}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})$$

$$S_D = \left[C(-A+BF)^{-1} B \right]^{-1}$$



F：状態フィードバックゲイン

状態が全て得られるならばオブザーバ（OBS）は必要ない

動的補償(FF)
(Inverse Dynamics Method)

関節角追従制御

目標軌道

$$q_d,\dot{q}_d,\ddot{q}_d \longrightarrow \boxed{\mathrm{ID}} \xrightarrow{\ \tau\ } \boxed{\mathrm{Robot}} \longrightarrow q,\dot{q}$$

制御則

$$\tau = \hat{\tau}(q_d,\dot{q}_d,\ddot{q}_d)$$

$$\hat{\tau}(q,\dot{q},\ddot{q}) = \hat{M}(q)\ddot{q} + \hat{h}(q,\dot{q}) + \hat{D}\dot{q} + \hat{g}(q)$$

ID：逆動力学モデル

（“^”は推定値を表す）

誤差　$e = q - q_d$

$$M(q)\ddot{e} + D\dot{e} = \varepsilon_{ff}$$

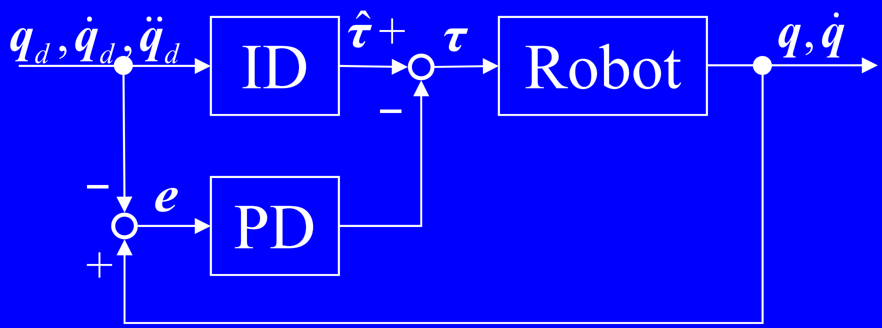
ε_{ff}　パラメータ誤差、軌道誤差など

動的補償(FF)+PDフィードバック
(Inverse Dynamics & PD Control)

制御則

$$\boldsymbol{\tau} = \hat{\boldsymbol{\tau}}(\boldsymbol{q}_d, \dot{\boldsymbol{q}}_d, \ddot{\boldsymbol{q}}_d) - K_p \boldsymbol{e} - K_d \dot{\boldsymbol{e}}$$

$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{q} - \boldsymbol{q}_d$$



誤差

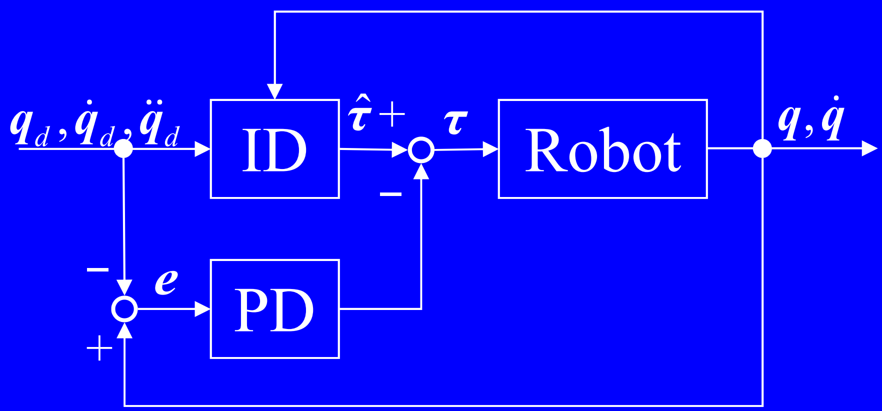
$$M(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{e}} + (K_d + D)\dot{\boldsymbol{e}} + K_p \boldsymbol{e} = \boldsymbol{\varepsilon}_{fc}$$

動的補償(FB)+PDフィードバック
(Inverse Dynamics & PD Control)

制御則

$$\boldsymbol{\tau} = \hat{\boldsymbol{\tau}}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}, \ddot{\boldsymbol{q}}_d) - K_p \boldsymbol{e} - K_d \dot{\boldsymbol{e}}$$

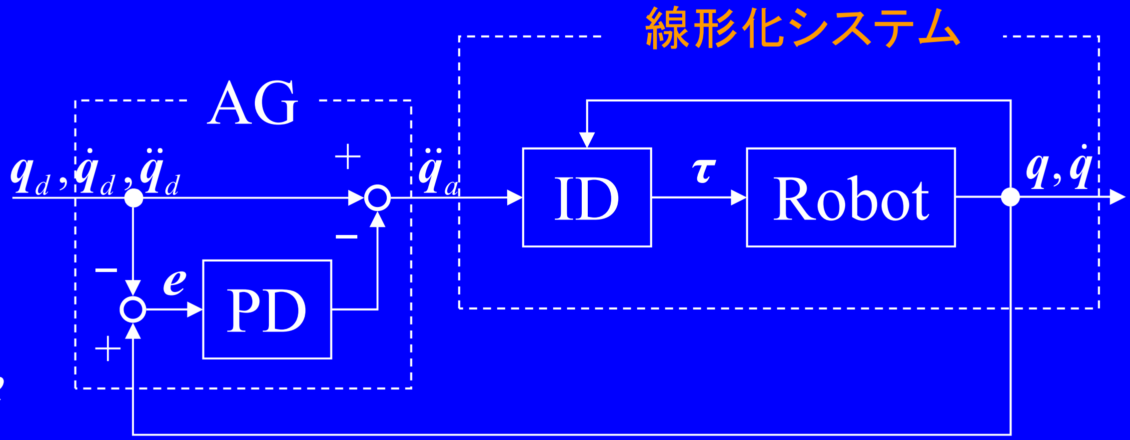
$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{q} - \boldsymbol{q}_d$$



誤差

$$M(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{e}} + K_d \dot{\boldsymbol{e}} + K_p \boldsymbol{e} = \boldsymbol{\varepsilon}_{bc}$$

計算トルク法
(Computed Torque Method)



制御則

$$\boldsymbol{\tau} = \hat{\boldsymbol{\tau}}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}, \ddot{\boldsymbol{q}}_a)$$

$$\ddot{\boldsymbol{q}}_a = \ddot{\boldsymbol{q}}_d - K_d \dot{\boldsymbol{e}} - K_p \boldsymbol{e}$$

$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{q} - \boldsymbol{q}_d$$

フィードバックによる線形化
とサーボ補償

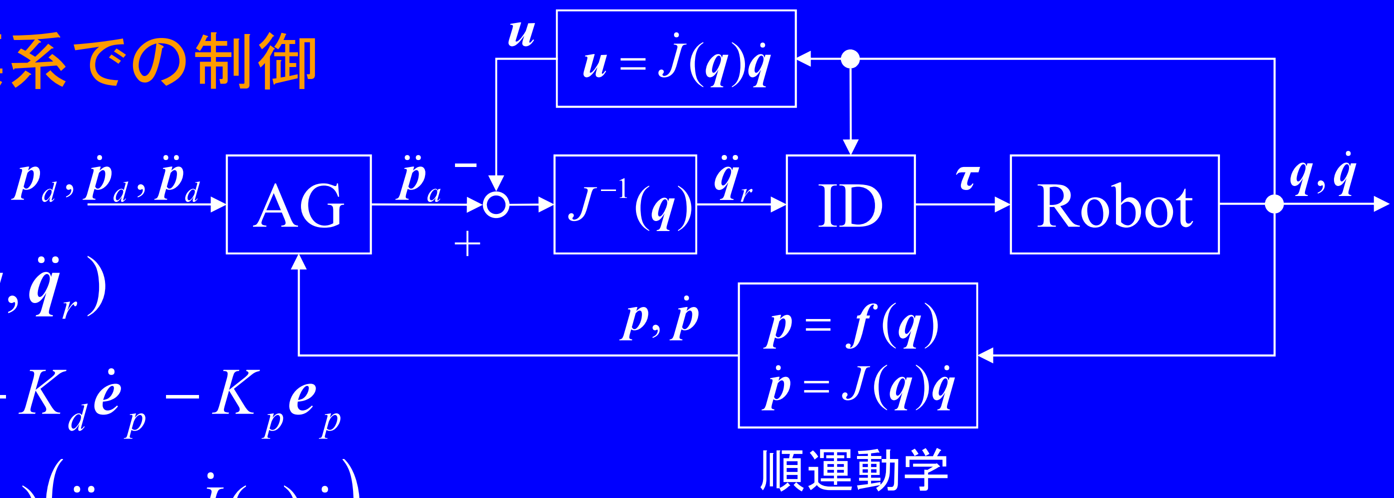
誤差

$$M(\boldsymbol{q})(\ddot{\boldsymbol{e}} + K_d \dot{\boldsymbol{e}} + K_p \boldsymbol{e}) = \boldsymbol{\varepsilon}_{ct}$$

$$\therefore \ddot{\boldsymbol{e}} + K_d \dot{\boldsymbol{e}} + K_p \boldsymbol{e} = \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ct}$$

分解加速度制御
(Resolved Acceleration Control)

基準座標系での制御



制御則

$$\boldsymbol{\tau} = \hat{\boldsymbol{\tau}}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}, \ddot{\boldsymbol{q}}_r)$$

$$\ddot{\boldsymbol{p}}_a = \ddot{\boldsymbol{p}}_d - K_d \dot{\boldsymbol{e}}_p - K_p \boldsymbol{e}_p$$

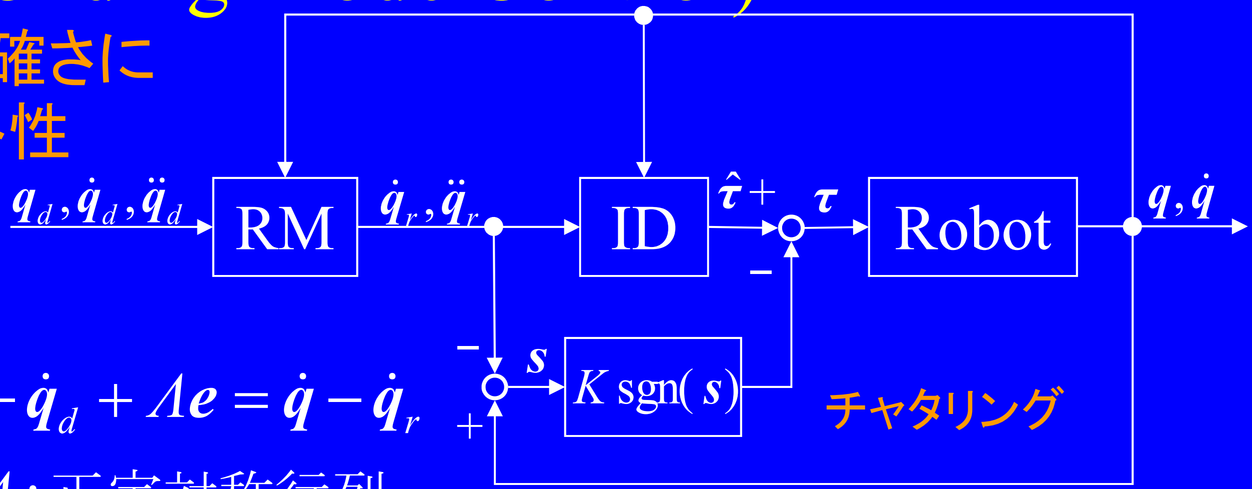
$$\ddot{\boldsymbol{q}}_r = J^{-1}(\boldsymbol{q})\left(\ddot{\boldsymbol{p}}_a - \dot{J}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}\right)$$

誤差　$\boldsymbol{e}_p = \boldsymbol{p} - \boldsymbol{p}_d$

$$\ddot{\boldsymbol{e}}_p + K_d \dot{\boldsymbol{e}}_p + K_p \boldsymbol{e}_p = \boldsymbol{\varepsilon}_{ra}$$

スライディングモード制御
(Sliding Mode Control)

モデルの不正確さに
対するロバスト性



制御則

$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{q} - \boldsymbol{q}_d$$

$$\boldsymbol{s} = \dot{\boldsymbol{e}} + \Lambda \boldsymbol{e} = \dot{\boldsymbol{q}} - \dot{\boldsymbol{q}}_d + \Lambda \boldsymbol{e} = \dot{\boldsymbol{q}} - \dot{\boldsymbol{q}}_r$$

$$\dot{\boldsymbol{q}}_r = \dot{\boldsymbol{q}}_d - \Lambda \boldsymbol{e},\ \ \Lambda: \text{正定対称行列}$$

$$\boldsymbol{\tau} = \hat{\boldsymbol{\tau}} - K\,\mathrm{sgn}(\boldsymbol{s}),\ \ \mathrm{sgn}(\boldsymbol{s}): \text{符号関数},\ \ K = \mathrm{diag}(K_i)$$ （VSSの一種）

$$\hat{\boldsymbol{\tau}} = \hat{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}}_r + \hat{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}_r + \hat{D}\dot{\boldsymbol{q}} + \hat{\boldsymbol{g}}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{\zeta}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}, \dot{\boldsymbol{q}}_r, \ddot{\boldsymbol{q}}_r)$$

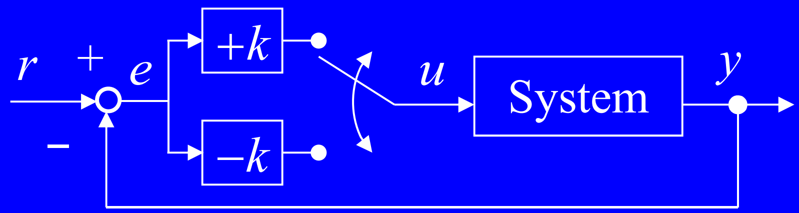
$$V(t) = \frac{1}{2}\boldsymbol{s}^T M(\boldsymbol{q})\boldsymbol{s},\quad \dot{V}(t) = \boldsymbol{s}^T\left(\tilde{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}}_r + \tilde{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}_r + \tilde{D}\dot{\boldsymbol{q}} + \tilde{g}(\boldsymbol{q})\right) - \sum_{i=1}^{n} K_i |s_i|$$

$$K_i \ge \left| \left[\tilde{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}}_r + \tilde{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}_r + \tilde{D}\dot{\boldsymbol{q}} + \tilde{g}(\boldsymbol{q})\right]_i \right| + \eta_i,\ \ \eta_i > 0 \text{ とれば } \dot{V}(t) \le -\sum_{i=1}^{n} \eta_i |s_i|$$

ただし、$\tilde{M} = \hat{M} - M,\ \tilde{C} = \hat{C} - C,\ \tilde{D} = \hat{D} - D,\ \tilde{g} = \hat{g} - g$

（補）スライディングモード制御

2次系の例



$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = a x_2 + u, \quad a > 0$$

$$u = -\phi x_1 \qquad k > 0$$

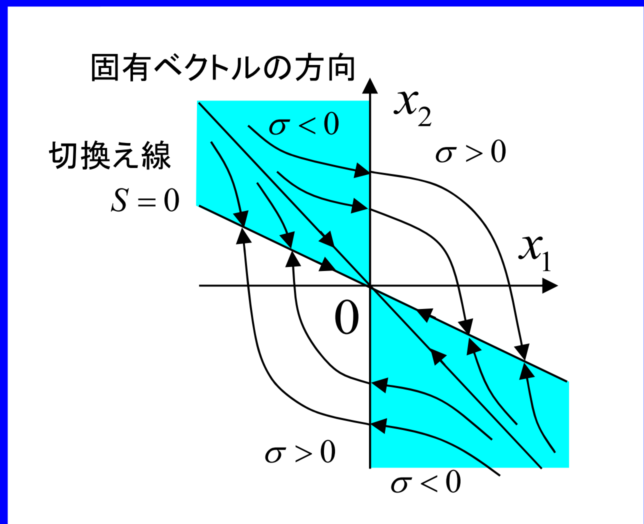
$$\phi = \begin{cases} +k & \sigma(x_1, x_2) > 0 \\ -k & \sigma(x_1, x_2) < 0 \end{cases} \qquad \begin{aligned} \sigma(x_1, x_2) &= x_1 S \\ S &= \alpha x_1 + x_2 \end{aligned}$$

領域I: $\sigma > 0$不安定渦状点

領域II: $\sigma < 0$ 固有ベクトル方向のみ安定な鞍形点

ともに不安定であるが，ゲインの切り替えにより安定

切換え線S=0の傾きが小さいと，切替え線に到達した状態は，この直線上に拘束されて，原点へ向かう

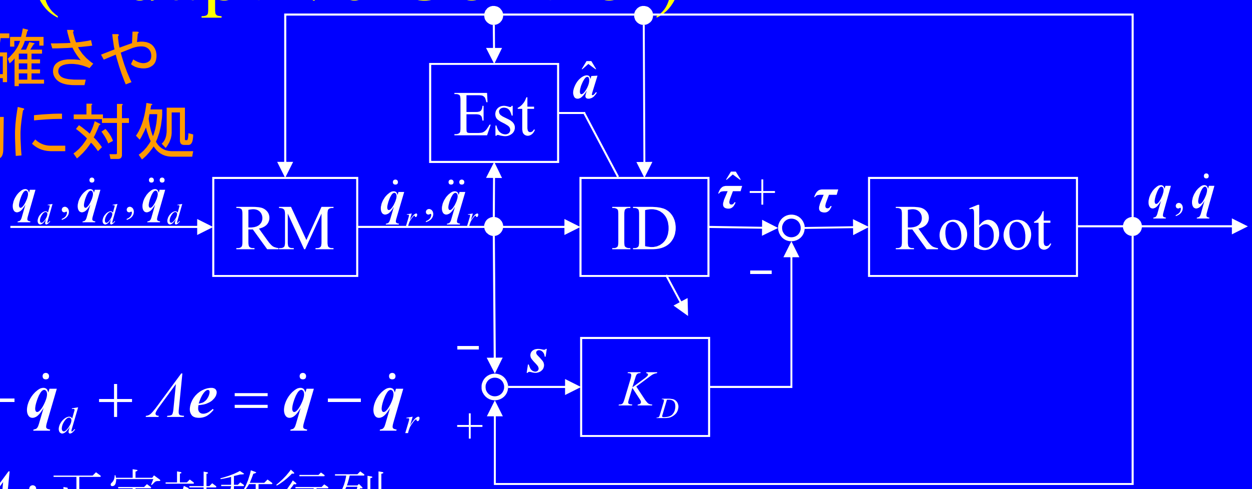


位相面軌道

適応制御

(Adaptive Control)

モデルの不正確さや
パラメータ変動に対処



制御則

$$e = q - q_d$$

$$s = \dot{e} + \Lambda e = \dot{q} - \dot{q}_d + \Lambda e = \dot{q} - \dot{q}_r$$

$$\dot{q}_r = \dot{q}_d - \Lambda e,\ \ \Lambda: \text{正定対称行列}$$

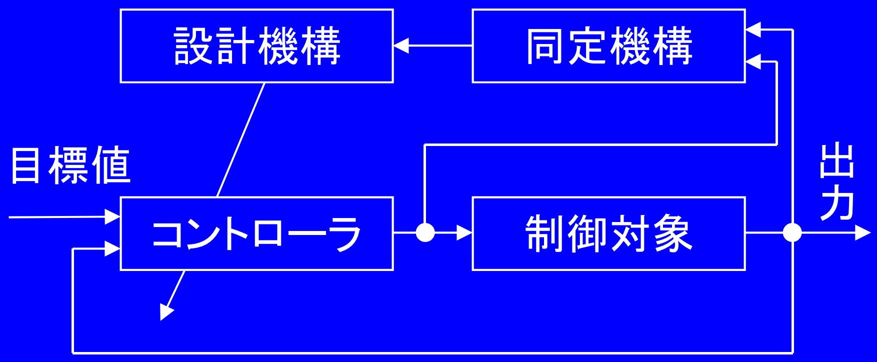
$$\tau = \hat{\tau} - K_D s,\ K_D: \text{正定対称行列}$$

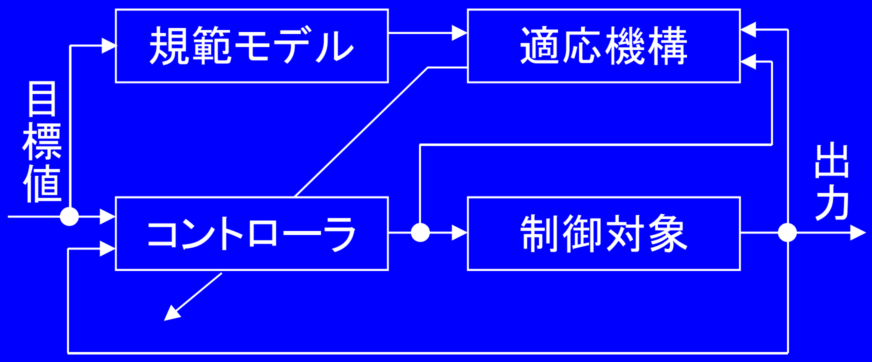
$$\hat{\tau} = \hat{M}(q)\ddot{q}_r + \hat{C}(q,\dot{q})\dot{q}_r + \hat{D}\dot{q} + \hat{g}(q) = \zeta(q,\dot{q},\dot{q}_r,\ddot{q}_r)\hat{a}$$

調整則　$\dot{\hat{a}} = -\Gamma \zeta^T(q,\dot{q},\dot{q}_r,\ddot{q}_r)s,\ \ \Gamma: \text{正定対称行列}$　オンライン推定

$$V(t) = \frac{1}{2}\left(s^T M(q)s + \tilde{a}^T \Gamma^{-1}\tilde{a}\right),\quad \dot{V}(t) = -s^T K_D s \le 0 \qquad \text{ただし、}\tilde{a} = \hat{a} - a$$

（補）適応制御





セルフチューニング
コントローラ

モデル規範型
適応制御