

MBD中部コンファレンス

平成26年12月18日(木):15:10-15:25

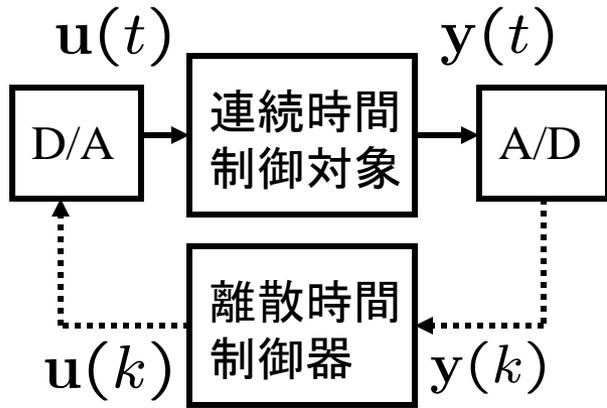
刈谷市総合文化センター

# 船舶のサンプル値軌道追従制御適用事例

静岡大学 工学部 電気電子工学科

片山 仁志

# 非線形サンプル値(SD)制御 (1/2)



$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)), \quad y(k) = h(\mathbf{x}(kT))$$

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}(k), \quad t \in [kT, (k+1)T)$$

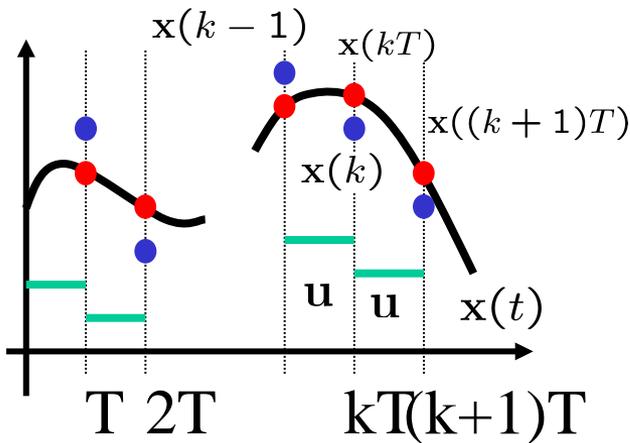
↓ 制御器設計のための離散化

**厳密モデル:**  $\mathbf{x}(k+1) = F_T^e(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k))$

**近似モデル:**  $\mathbf{x}(k+1) = F_T^a(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k))$

$$F_T^e(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) = \mathbf{x}(k) + \int_{kT}^{(k+1)T} f(\mathbf{x}(s), \mathbf{u}(k)) ds$$

↓ 離散化: 赤丸の挙動  
 $\mathbf{x}(k) = \mathbf{x}(kT)$



↓

厳密モデル(線形制御の離散時間モデル)は  
 制御系設計に利用できない

→ 近似モデルによる制御系設計が必要

# 非線形サンプル値(SD)制御 (2/2)

## 制御系設計の枠組み

$$F_T^a(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{x} + T f(\mathbf{x}, \mathbf{u})$$

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))$$

非線形サンプル値系

近似

$$\mathbf{x}(k+1) = F_T^a(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k))$$

オイラー近似モデル

$$\uparrow \mathbf{u}(k) = \mathbf{u}_T(\mathbf{x}(kT))$$

厳密モデル

SPA安定化の組  $(\mathbf{u}_T(\mathbf{x}), \mathbf{V}_T(\mathbf{x}))$

$\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}_T(\mathbf{x}(k))$  厳密モデルを安定化

- 1) オイラー近似モデルに対するSPA安定化の組の見つけ方
- 2) 車両などの機械系の一般化である厳密フィードバック形のSD系に対し具体的な設計法が提案
- 3) 厳密フィードバック形+位置観測(GPS)の場合、オイラー近似モデルから簡単な速度推定用オブザーバを設計可能

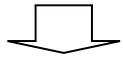
# 劣駆動船舶の直線軌道追従制御 (1/6)

3DOF 劣駆動  
船舶モデル

$$\dot{\mathbf{x}} = R(x_3)\mathbf{z}$$

$$M\dot{\mathbf{z}} + C(\mathbf{z})\mathbf{z} + D\mathbf{z} = \mathbf{f}$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{x}(kT)$$

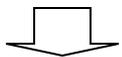


$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= z_1 \cos x_3 - z_2 \sin x_3, \\ \dot{x}_2 &= z_1 \sin x_3 + z_2 \cos x_3, \\ \dot{x}_3 &= z_3, \end{aligned} \quad \begin{bmatrix} d_1(\mathbf{z}) \\ d_2(\mathbf{z}) \\ d_3(\mathbf{z}) \end{bmatrix} = -M^{-1}[C(\mathbf{z}) + D]\mathbf{z},$$

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= d_1(\mathbf{z}) + \tau, \\ \dot{z}_2 &= d_2(\mathbf{z}) + \omega_{21}(\mathbf{z})\delta + \omega_{22}(\mathbf{z}), \\ \dot{z}_3 &= d_3(\mathbf{z}) + \omega_{31}(\mathbf{z})\delta + \omega_{32}(\mathbf{z}) \end{aligned} \quad \begin{bmatrix} \tau \\ \omega_{21}(\mathbf{z})\delta + \omega_{22}(\mathbf{z}) \\ \omega_{31}(\mathbf{z})\delta + \omega_{32}(\mathbf{z}) \end{bmatrix} = M^{-1}\mathbf{f}$$

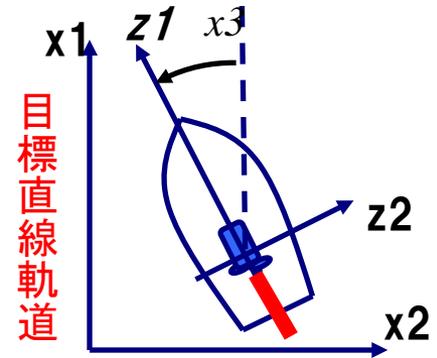
$$R(x_3) = \begin{bmatrix} \cos x_3 & -\sin x_3 & 0 \\ \sin x_3 & \cos x_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & d_{23} \\ 0 & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix}, \quad C(\mathbf{z}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}z_2 - m_{23}z_3 \\ 0 & 0 & m_{11}z_1 \\ m_{22}z_2 + m_{23}z_3 & -m_{11}z_1 & 0 \end{bmatrix}$$



$$(\mathbf{x}_2(t), \mathbf{x}_3(t), z_1(t) - \bar{z}_1, z_2(t), z_3(t)) \rightarrow 0, \quad (t \rightarrow \infty)$$

を達成する離散時間OF制御器の設計



# 劣駆動船舶の直線軌道追従制御 (2/6)

**B1:**  $\exists t_0 \geq 0$  s.t.  $0 < z_1^{\min} \leq z_1(t) \leq z_1^{\max}, \forall t \geq t_0$

**B2:**  $|z_2(t)| \leq \min\{z_1^{\max}, C_v z_1^{\max} |z_3(t)|\}, C_v > 0, \forall t \geq 0$

**B3:**  $\Delta > \max\{C_v z_1^{\max}, |\omega_{21}(\mathbf{z})/\omega_{31}(\mathbf{z})|\}, \forall \mathbf{z}$

LOS 角:  $\theta_1(x_2) = \tan^{-1}\left(-\frac{x_2}{\Delta}\right)$

目標surge速度:  $\bar{z}_1 \in (z_1^{\min}, z_1^{\max})$

$\Downarrow$   $\tilde{z}_1 = z_1 - \bar{z}_1, \tilde{x}_3 = x_3 - \theta_1(x_2)$

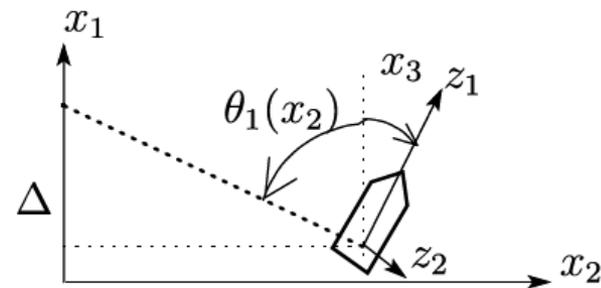
誤差ダイナミクス:

$$\dot{\tilde{z}}_1 = d_1(\mathbf{z}) + \tau,$$

$$\dot{\tilde{x}}_3 = -\hat{k}_2 \tilde{z}_3 + \tilde{z}_3$$

$$\dot{\tilde{z}}_3 = \kappa(x_2, x_3, \mathbf{z}) + \Gamma(x_2)\tau \sin x_3 + \Phi(x_2, x_3, \mathbf{z})\delta$$

$\Downarrow$   $p = x_2^2/2$ , 比較補助定理



# 劣駆動船舶の直線軌道追従制御 (3/6)

$$\tilde{z}_3 = z_3 - \theta_2(x_2, x_3, z),$$

$$\Gamma(x_2) = \Delta(\Delta^2 + x_2^2)^{-1},$$

$$\theta_2(x_2, x_3, z) = -\hat{k}_2[x_3 - \theta_1(x_2)] - \Gamma(x_2)(z_1 \sin x_3 + z_2 \cos x_3),$$

$$\kappa(x_2, x_3, z) = \sum_{i=1}^3 \kappa_i(x_2, x_3, z),$$

$$\begin{aligned} \kappa_1(x_2, x_3, z) = & d_3(z) + \omega_{32}(z) \\ & + \hat{k}_2\{-\hat{k}_2[x_3 - \theta_1(x_2)] + z_3 - \theta_2(x_2, x_3, z)\}, \end{aligned}$$

$$\kappa_2(x_2, x_3, z) = -\frac{2}{\Delta}\Gamma(x_2)^2 x_2 (z_1 \sin x_3 + z_2 \cos x_3)^2,$$

$$\begin{aligned} \kappa_3(x_2, x_3, z) = & \Gamma(x_2)\{d_1(z) \sin x_3 + [d_2(z) + \omega_{22}(z)] \cos x_3 \\ & + (z_1 \cos x_3 - z_2 \sin x_3)z_3\}, \end{aligned}$$

$$\Phi(x_2, x_3, z) = \omega_{31}(z) + \omega_{21}(z)\Gamma(x_2) \cos x_3,$$

$\hat{k}_2 > 0$ : design parameter

# 劣駆動船舶の直線軌道追従制御 (4/6)

$$p = x_2^2/2,$$

$$\Downarrow \begin{aligned} \sin \theta_1(x_2) &= -x_2/\sqrt{\Delta^2 + x_2^2}, \\ \Pi_2 &> \Pi_1 > 0 \end{aligned}$$

$$\dot{p} \leq -\alpha(p)p + \Pi_2\sqrt{2pq}(\zeta)$$

$\Downarrow$  比較補助定理

$$\dot{\eta} = -\alpha(\eta)\eta + \Pi_2\sqrt{2\eta q}(\zeta)$$

$$\alpha(\eta) = \frac{2\bar{z}_1\Pi_1}{\sqrt{\Delta^2 + 2\eta}},$$

$$\zeta = [\tilde{z}_1 \quad \tilde{x}_3 \quad \tilde{z}_3]^T,$$

$$q(\zeta) = |\tilde{z}_1| + (2\bar{z}_1 + \hat{k}_2 C_v z_1^{max})|\tilde{x}_3| + C_v z_1^{max}|\tilde{z}_3|,$$

$$\Pi_1 = (1 + C_v z_1^{max}/\Delta)^{-1},$$

$$\Pi_2 = (1 - C_v z_1^{max}/\Delta)^{-1}$$

# 劣駆動船舶の直線軌道追従制御 (5/6)

**補助定理 3: B1-B3.**  $(\tau, \delta)(t) = (\tau, \delta)(k)$  が、

$$\dot{\eta} = -\frac{2\bar{z}_1 \Pi_1}{\sqrt{\Delta^2 + 2\eta}} \eta + \Pi_2 \sqrt{2\eta} q(\zeta) \quad (\text{SYS})$$

$$\dot{\tilde{z}}_1 = d_1(\mathbf{z}) + \tau,$$

$$\dot{\tilde{x}}_3 = -\hat{k}_2 \tilde{z}_3 + \tilde{z}_3$$

$$\dot{\tilde{z}}_3 = \kappa(x_2, x_3, \mathbf{z}) + \Gamma(x_2) \tau \sin x_3 + \Phi(x_2, x_3, \mathbf{z}) \delta$$

を SPUA 安定化すれば、 $(\tau, \delta)(t) = (\tau, \delta)(k)$  は、

$$\dot{x}_2 = z_1 \sin x_3 + z_2 \cos x_3,$$

$$\dot{\tilde{z}}_1 = d_1(\mathbf{z}) + \tau,$$

$$\dot{\tilde{x}}_3 = -\hat{k}_2 \tilde{z}_3 + \tilde{z}_3$$

$$\dot{\tilde{z}}_3 = \kappa(x_2, x_3, \mathbf{z}) + \Gamma(x_2) \tau \sin x_3 + \Phi(x_2, x_3, \mathbf{z}) \delta$$

を SPUA 安定化する。

$$\zeta = [\tilde{z}_1 \quad \tilde{x}_3 \quad \tilde{z}_3]^T$$

# 劣駆動船舶の直線軌道追従制御 (6/6)

(SYS) のオイラーモデル→離散時間SF則:

$$\tau_T(z(k)) = -\frac{k_1}{T + c_1}[z_1(k) - \bar{z}_1] - d_1(z(k)),$$

$$\delta_T(x_2, x_3, z)(k) = \frac{1}{\Phi(x_2, x_3, z)(k)} \left\{ -\kappa(x_2, x_3, z) - \frac{k_3}{T + c_3}[z_3 - \theta_2(x_2, x_3, z)] - \Gamma(x_2)\tau_T(z) \sin x_3 \right\}(k)$$

船舶モデル→厳密フィードバック系→低次元オブザーバを設計

$$\hat{z}(k+1) = (I - TH)\hat{z}(k)$$

$$+ T[H\Psi_T(y, \rho y) + \Pi(\Psi_T(y, \rho y), \tau, \delta)](k)$$

$$\Pi(z, \tau, \delta) = -M^{-1}[C(z) + D]z + f(z, \tau, \delta)$$

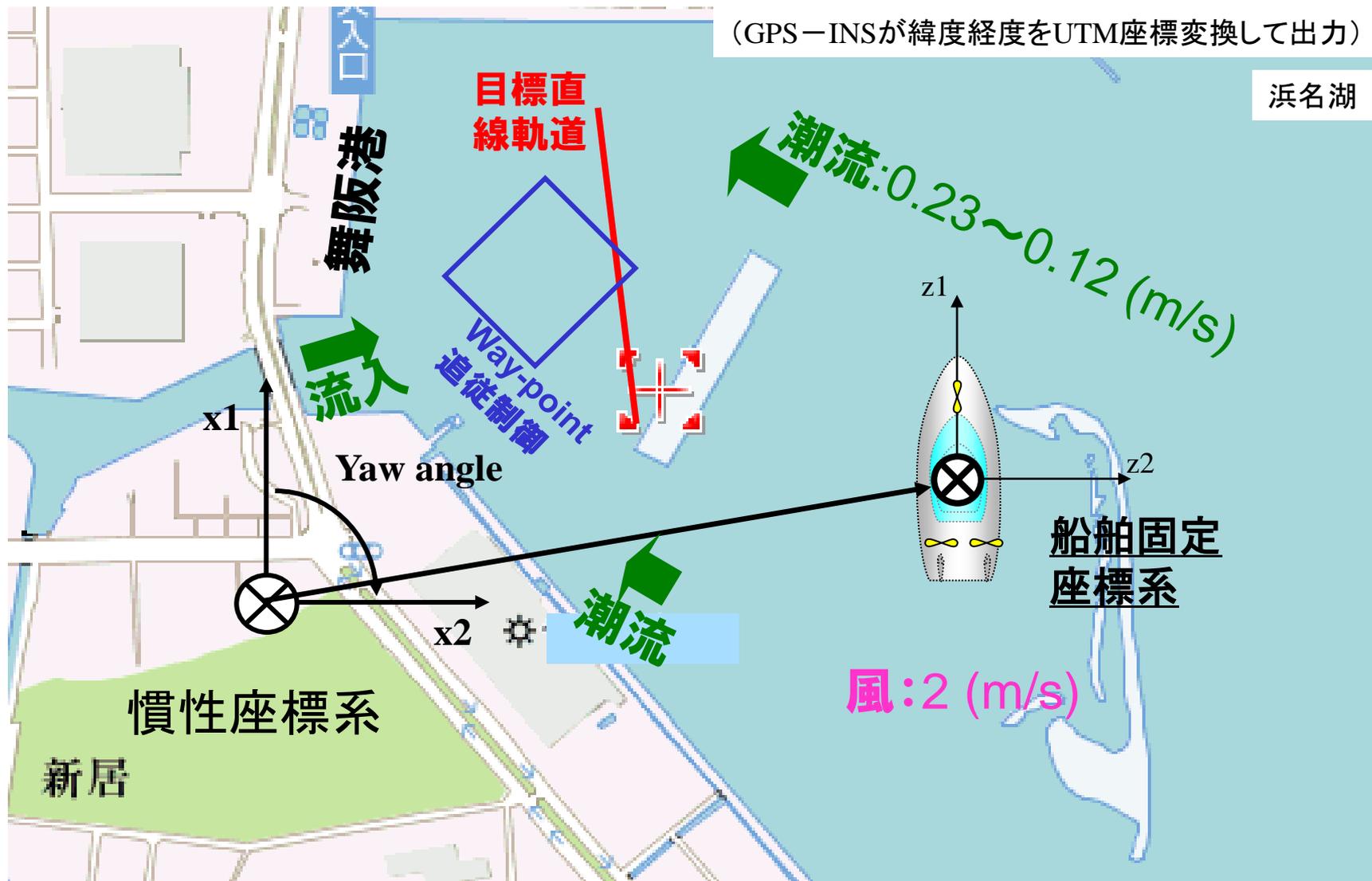
出力フィードバック制御器:  $(\tau_T(\hat{z}), \delta_T(y_2, y_3, \hat{z}))$ ,

$$k_1, k_2, k_3 \in (0, 2], c_1, c_2, c_3 > 0,$$

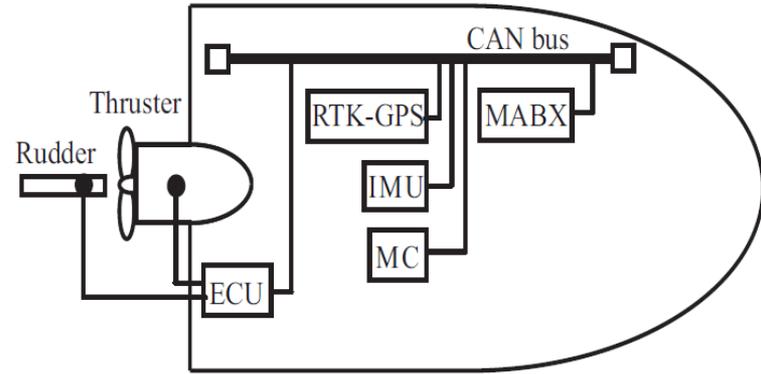
$$\hat{z}(k+1) = (I - TH)\hat{z}(k)$$

$$+ T[H\Psi_T(y, \rho y) + \Pi(\Psi_T(y, \rho y), \tau, \delta)](k)$$

# 実機試験 (1/4)



# 実機試験 (2/4)



設計パラメータ:

$$T = 0.2(\text{sec}), \Delta = 6 (\text{m}),$$

$$\bar{z}_1 = 0.8 (\text{m/s}) : \text{目標速度}$$

$$(k_1, k_2, k_3) = (1, 0.5, 0.1),$$

$$c_1 = c_2 = c_3 = 0.3$$

$$H = \text{diag}\{0.8, 2, 2\}$$

$$M = \begin{bmatrix} 198.8051 & 0 & 0 \\ 0 & 206 & 15.6 \\ 0 & 15.6 & 101.5 \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} 56.1 & 0 & 0 \\ 0 & 90.9 & -21.8 \\ 0 & -26.8 & 38.8 \end{bmatrix}.$$

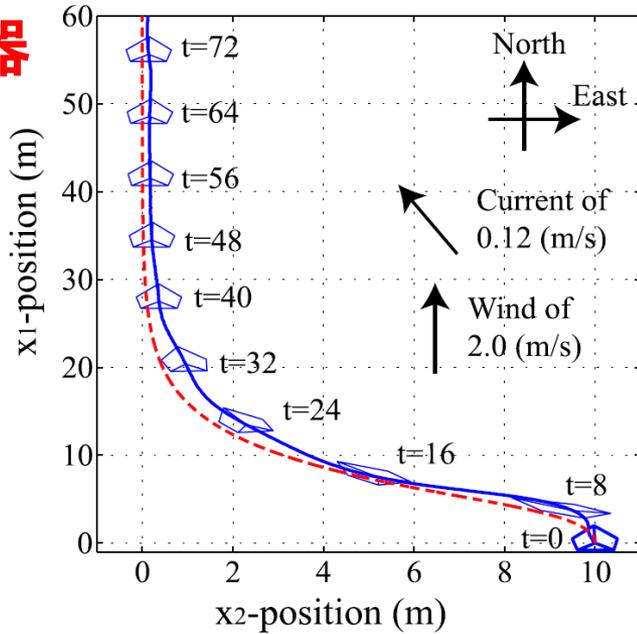
初期条件:

$$\mathbf{x}(0) \simeq [0 \quad 10 \quad \pi/2]^T, \mathbf{z}(0) \simeq [0.2 \quad 0 \quad 0]^T$$

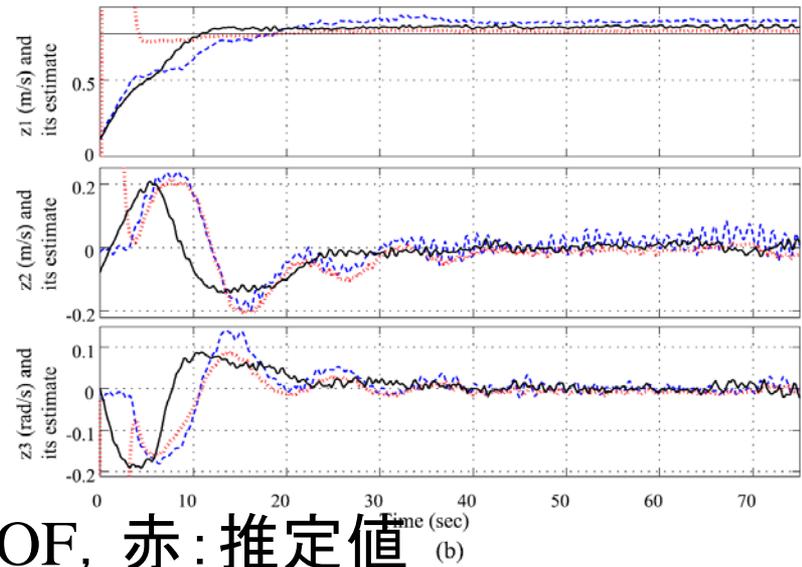
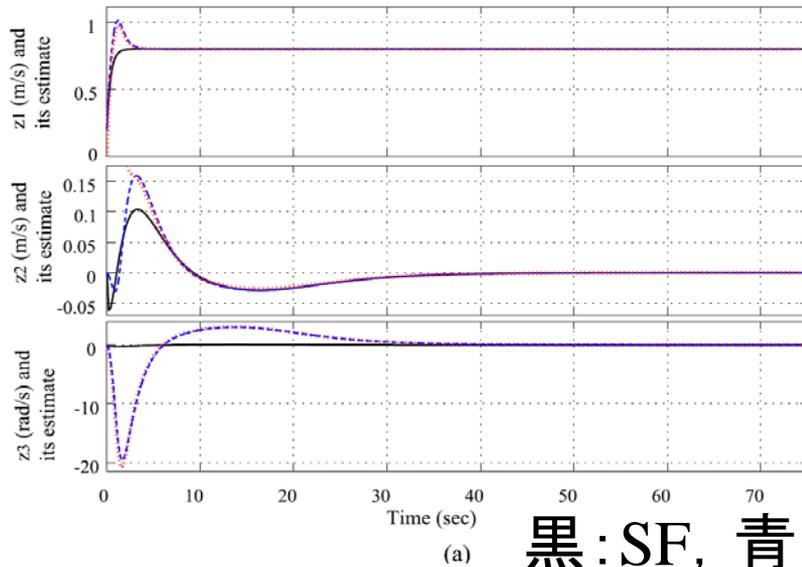
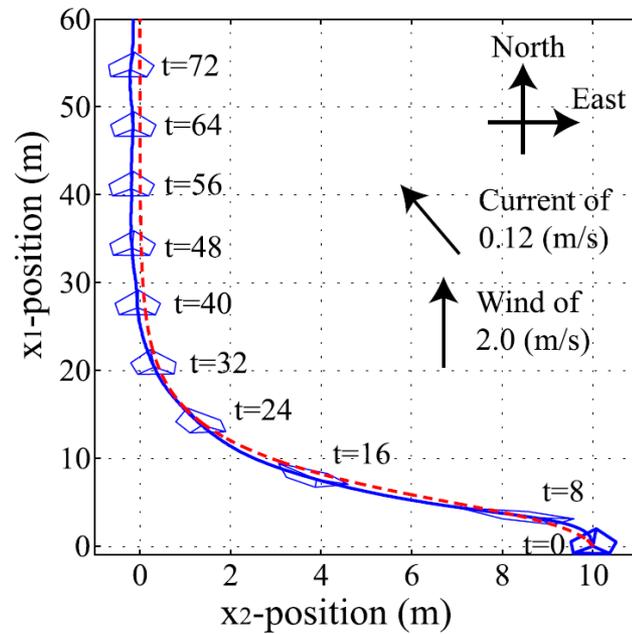
$$\hat{\mathbf{z}}(0) = 0$$

# 実機試験 (3/4)

**OF制御器  
( $T=0.2s$ )**



**SF制御器**

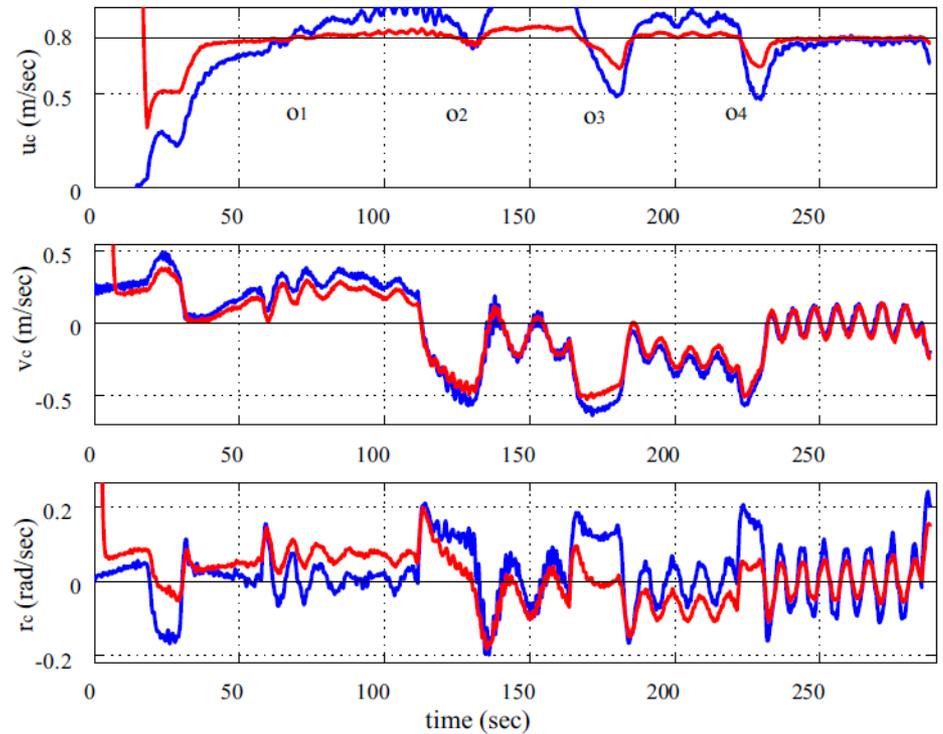
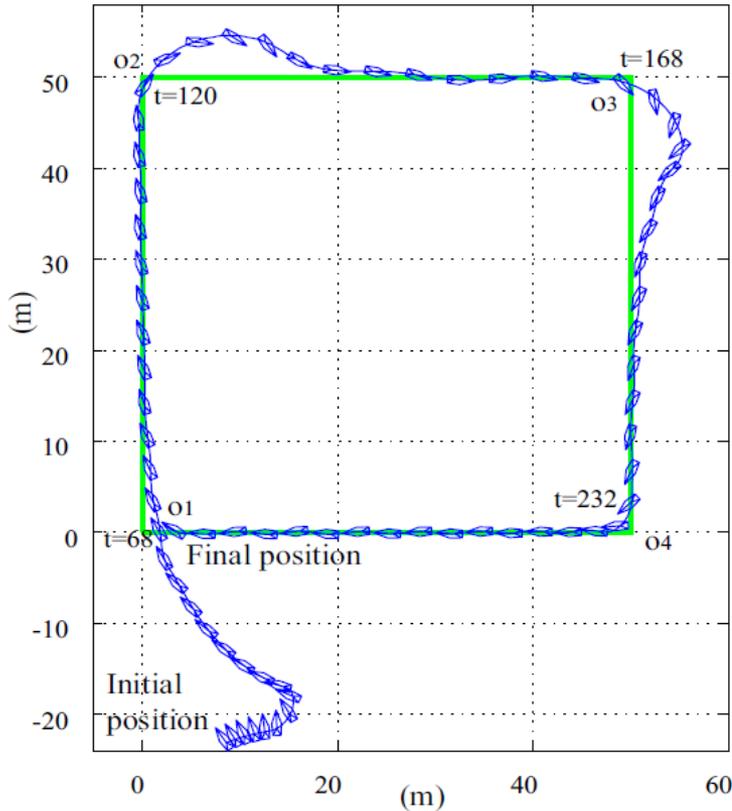


黒:SF, 青:OF, 赤:推定値

# 実機試験 (4/4)

## WP追従制御: OF制御器

青: 計測値, 赤: 推定値



目標直線軌道の切り替えによる  
OF 直線軌道追従制御器

H. Katayama and H. Aoki, IEEE TCST, pp. 1638-1645, 2014

## その他(実装上の観点)

- 1) 現時刻と1ステップ前の位置情報 (GPSデータ) を使うオブザーバの Simulink 表現と dSpace の実装が幾分複雑になる。データの保存にエラーが発生
- 2) 状態フィードバック制御と出力フィードバック制御の両方の実証実験を1つのプログラムで行うため、幾分複雑な制御系となっている。より簡単化な Simulink ブロックで実験可能

$$\begin{aligned}\hat{z}(k+1) &= (I - TH)\hat{z}(k) \\ &\quad + T[H\Psi_T(\mathbf{y}, \rho\mathbf{y}) + \Pi(\Psi_T(\mathbf{y}, \rho\mathbf{y}), \tau, \delta)](k) \\ \Pi(\mathbf{z}, \tau, \delta) &= -M^{-1}[C(\mathbf{z}) + D]\mathbf{z} + f(\mathbf{z}, \tau, \delta)\end{aligned}$$

H. Katayama and H. Aoki, IEEE TCST, pp. 1638-1645, 2014