

モデル誤差抑制補償器に基づく 自動車のロバスト経路追従制御系の設計

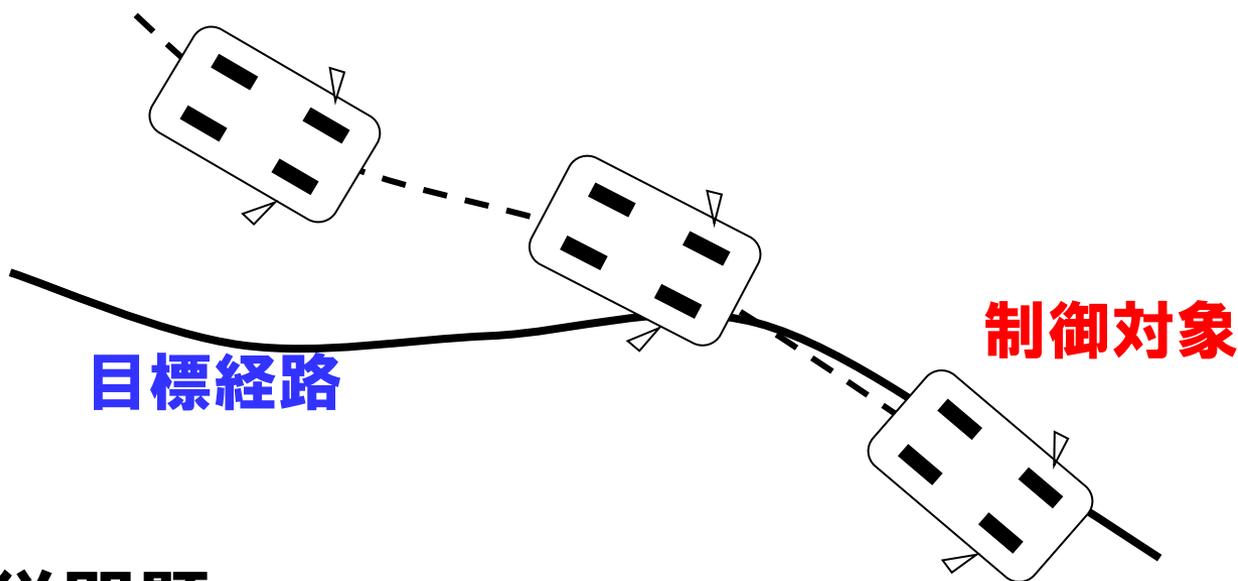
○岡島 寛 (熊本大学)

松永 信智 (熊本大学)

はじめに

自動車：安全性や快適性の確保

➡ 自動運転に向けての研究開発の取り組みが活発化

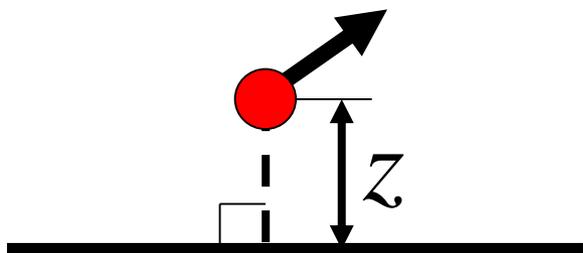


経路追従問題

目標経路に沿って走行する制御入力を求める問題

経路追従問題の従来研究

1. 直線経路への追従[三平 1992]



$\lim_{t \rightarrow \infty} z = 0$ とする制御によって
経路追従を達成

2. 曲線（直線も含む）への経路追従 [野中 2006, c. altafini 2003 et.al.]

3. 速度最適化を含む経路追従 [岡島 2008]

これらの従来研究は、状態フィードバック則の形で導かれる

従来の経路追従制御手法の課題

状態フィードバック則

直接計測が困難な状態量の計測を要する
モデル化誤差の影響を受けやすい

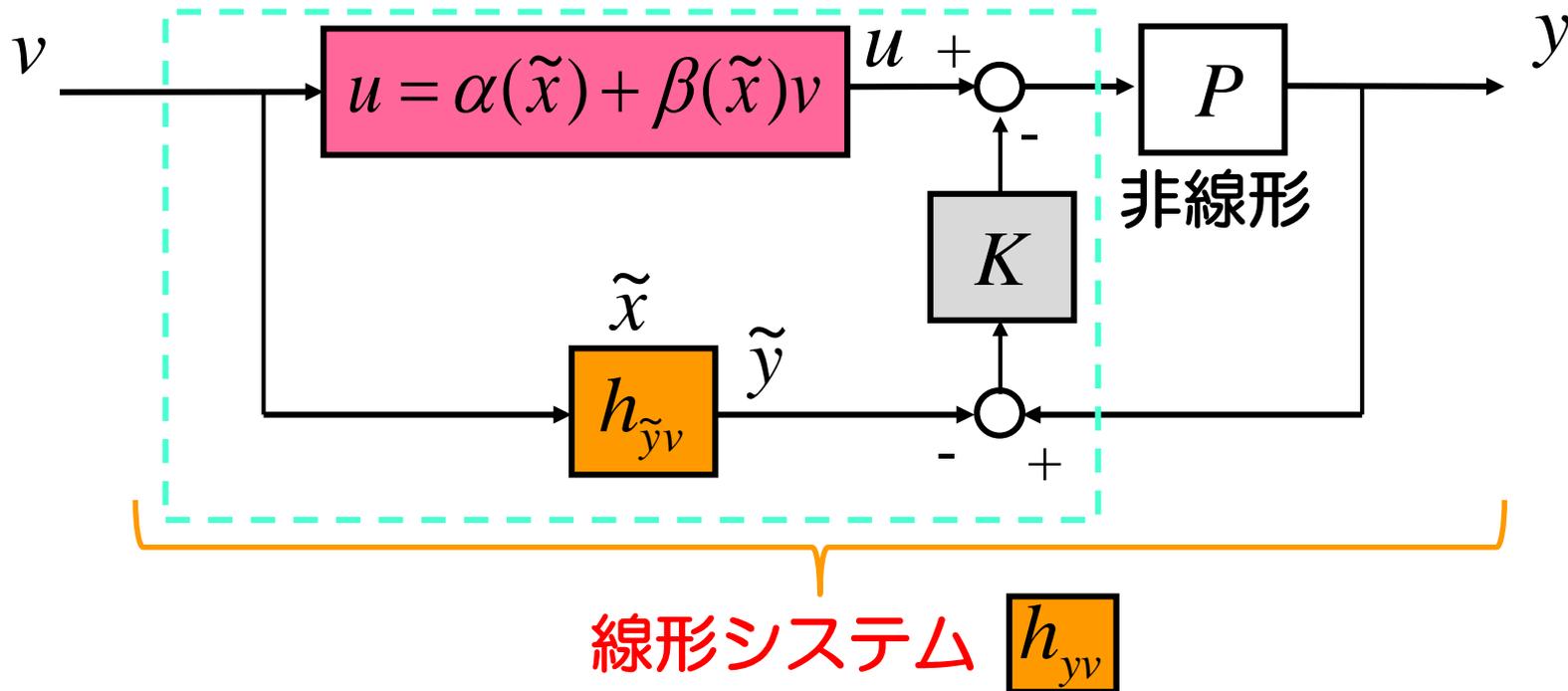
改善が必要

本研究

出力フィードバック型で、
モデル化誤差や外乱にロバストな
経路追従制御則を提案

1. はじめに
2. 先行研究
3. 問題設定・主結果
4. 数値例

ロバスト性の高い非線形システムの線形化手法



v から y の入出力ダイナミクスが線形化される

非線形制御対象 P

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u$$

$$y = h(x)$$

y : 出力 (1次)

u : 入力 (1次)

x : 状態 (n次)

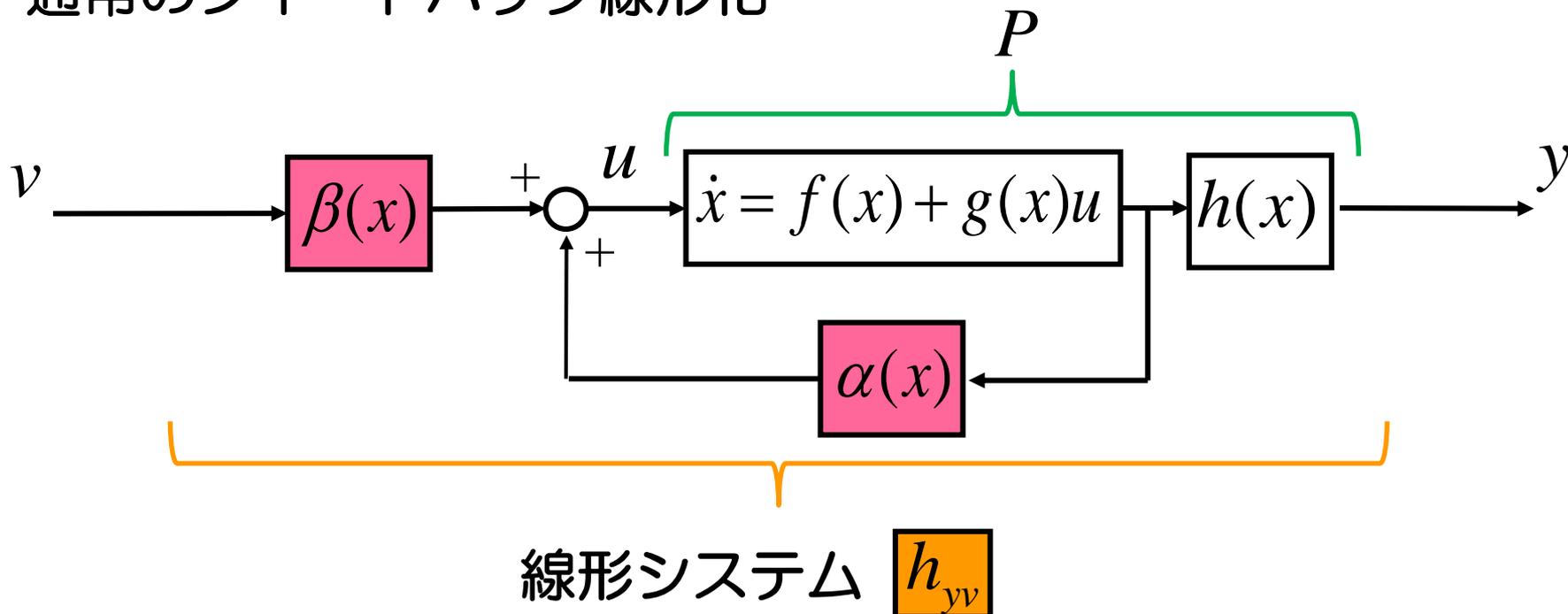
入力アフィンシステム

出力 y に対して**ゼロダイナミクスが安定**と仮定
(フィードバック線形化のための条件)

$f(x), g(x)$: x に関して必要な回数の微分可能

先行研究

通常のフィードバック線形化

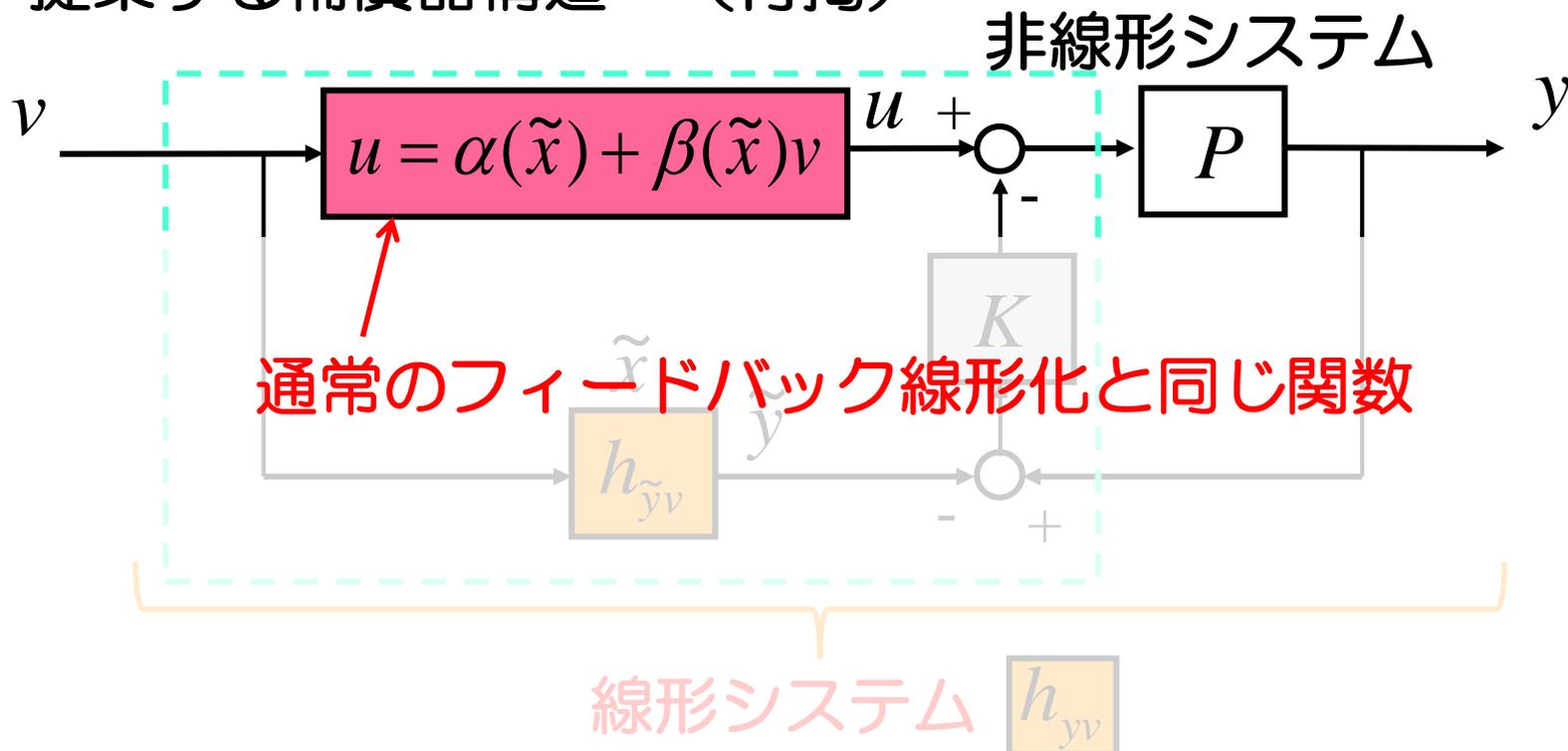


状態フィードバック $u = \alpha(x) + \beta(x)v$ を施すことで

v から y までの入出力特性を線形 h_{yv} にする

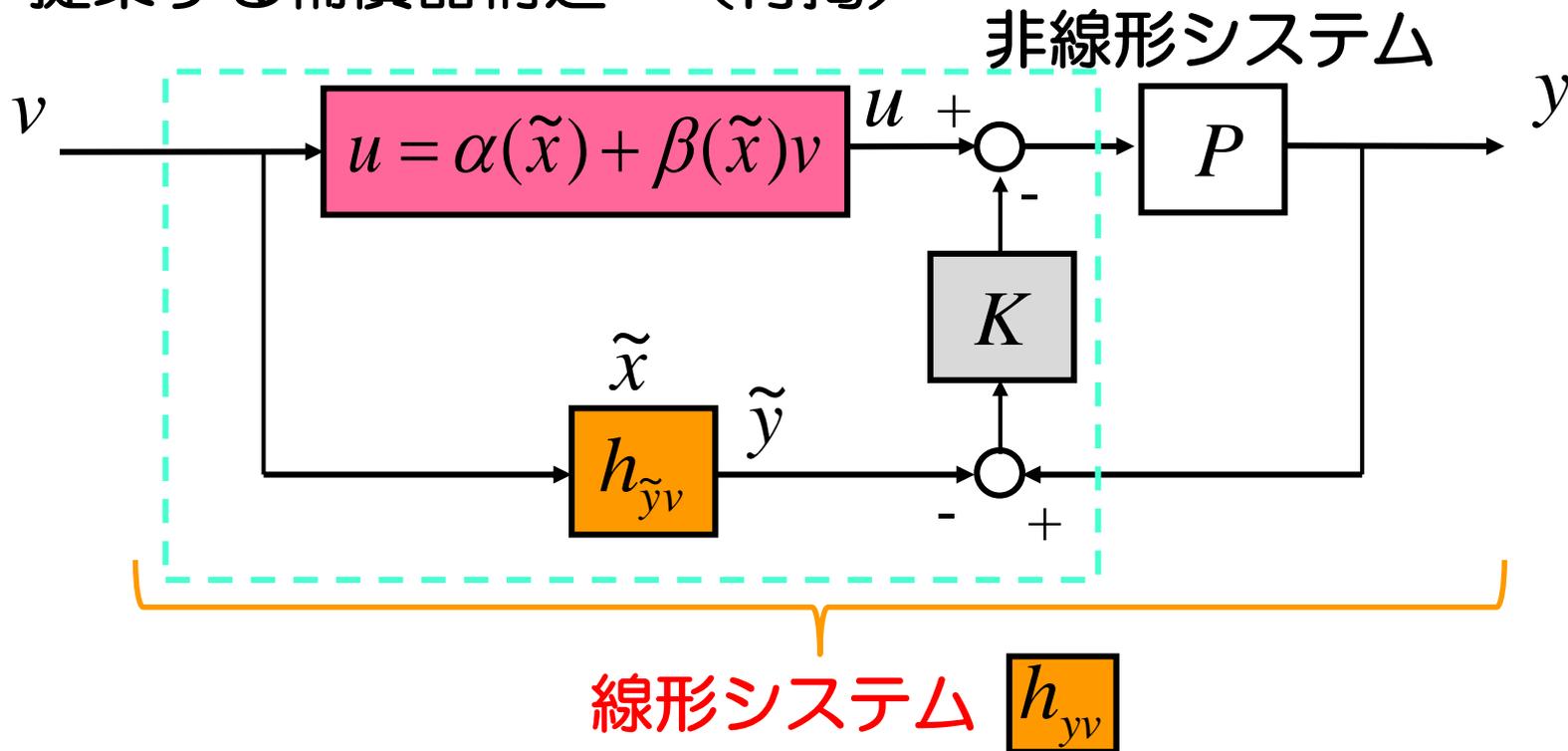
先行研究

提案する補償器構造 (再掲)



先行研究

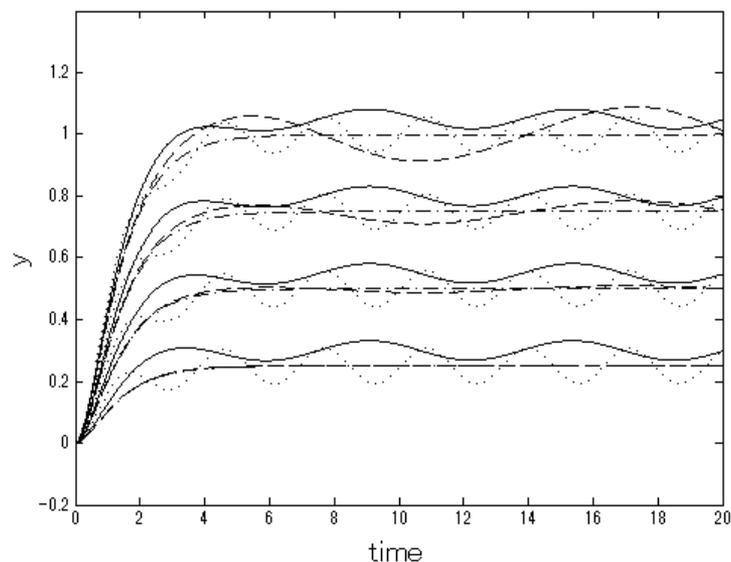
提案する補償器構造 (再掲)



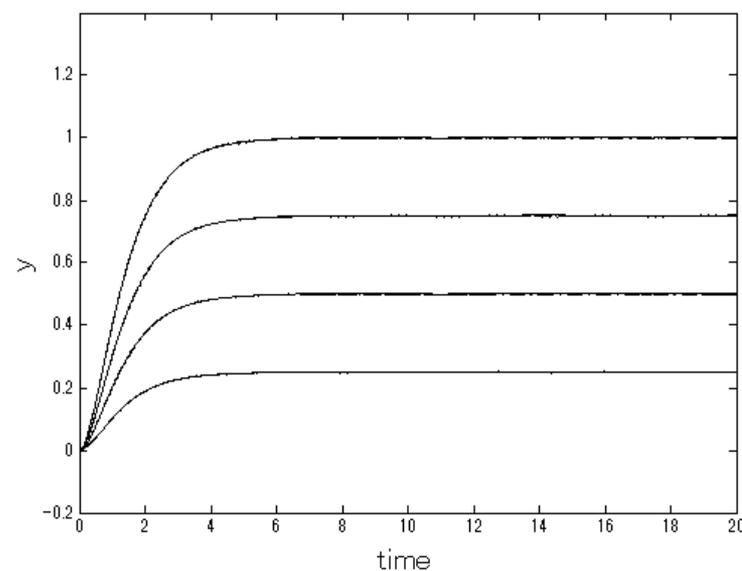
- v から y の入出力ダイナミクスが線形化される
- 出力フィードバックの構造になっている
- ロバスト性や外乱抑制性能のための調整用フィルタ K を有する

同じ非線形システム（モデル化誤差あり）への フィードバック線形化

従来法



提案法



提案法はモデル化誤差の影響を受けにくい

1. はじめに
2. 先行研究
3. 問題設定・主結果
4. 数値例

自動車の運動モデル

13

自動車の状態方程式

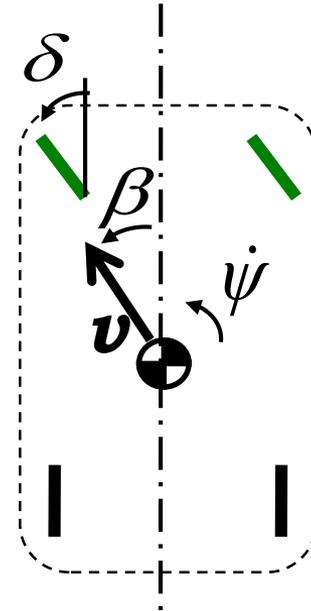
$$\dot{x} = Ax + B\delta$$

$$x = [\beta \quad \dot{\psi}]$$

2状態 $\left\{ \begin{array}{l} \beta : \text{車体すべり角} \\ \dot{\psi} : \text{ヨー角速度} \end{array} \right.$

1入力 δ : ハンドル操舵角

速度 v を一定と仮定

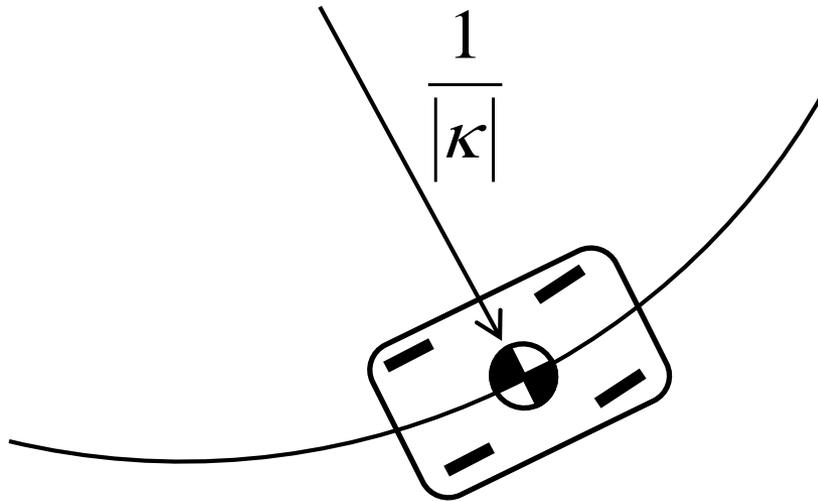


モデル化誤差は A, B 行列に出現する
(コーナリングパワ係数や車体質量など)

自動車の運動モデル

自動車が描く軌跡の極率 κ (極率半径の逆数)

$$\kappa = -2 \frac{K_f + K_r}{Mv^2} \beta - 2 \frac{l_f K_f - l_r K_r}{Mv^3} \dot{\psi} + \frac{2K_f}{Mv^2} \delta$$



極率 κ を制御出力とする

モデル化誤差

$$m' = m + \Delta m$$

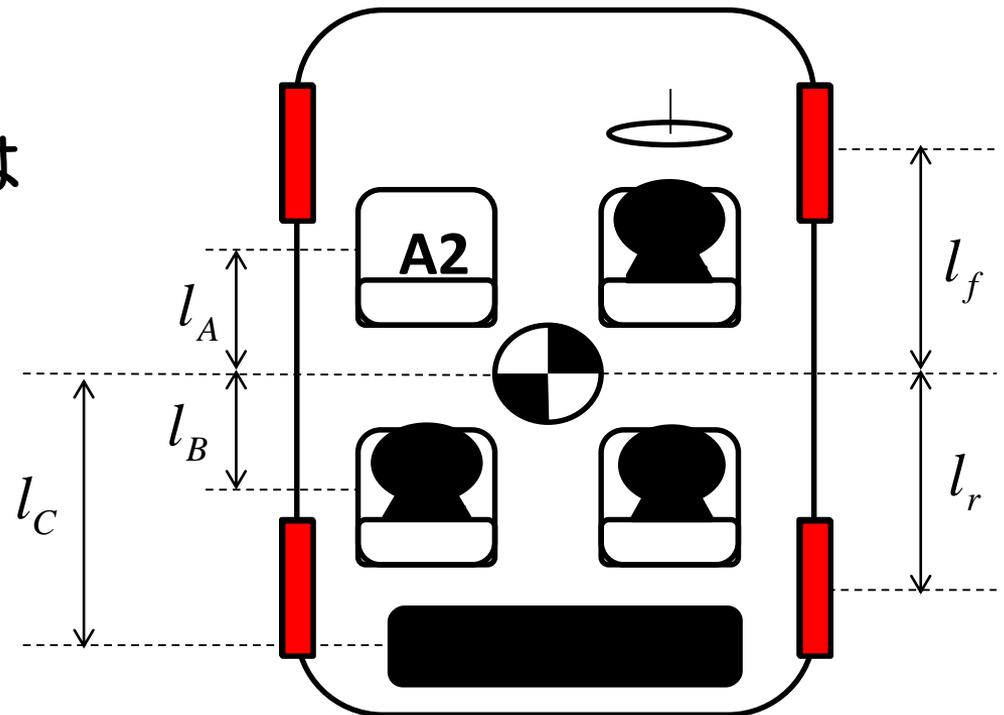
$$I' = I + \Delta I$$

車両の質量，慣性モーメントは
乗車人数や荷物に依存

タイヤのコーナリング係数は
路面状況（晴天，雨天）や
荷重分布等に依存

$$K'_f = K_f + \Delta K_f$$

$$K'_r = K_r + \Delta K_r$$



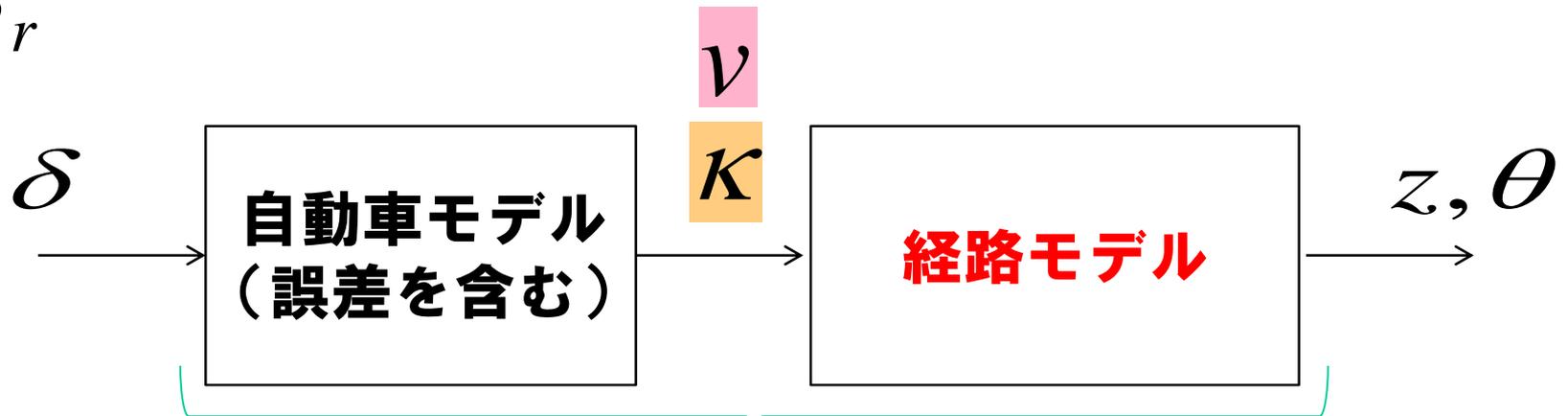
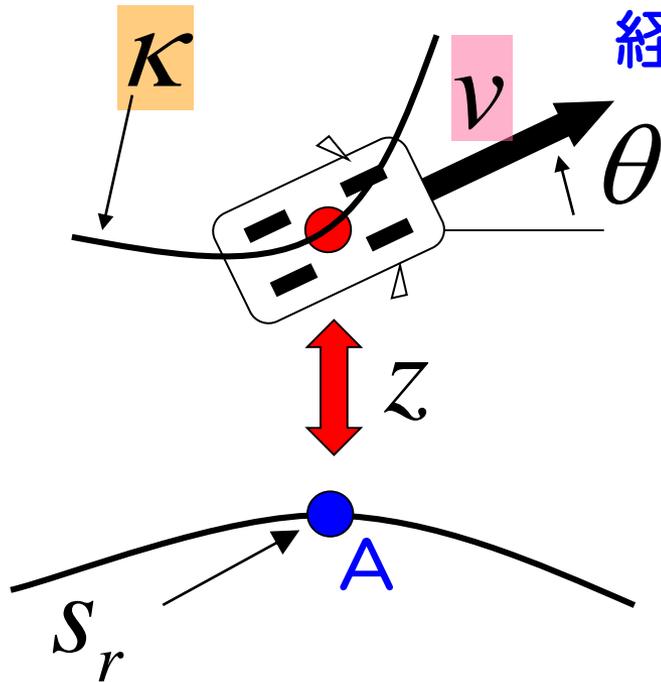
(例) 雨天時は力が伝わりにくい

目標経路との経路モデル

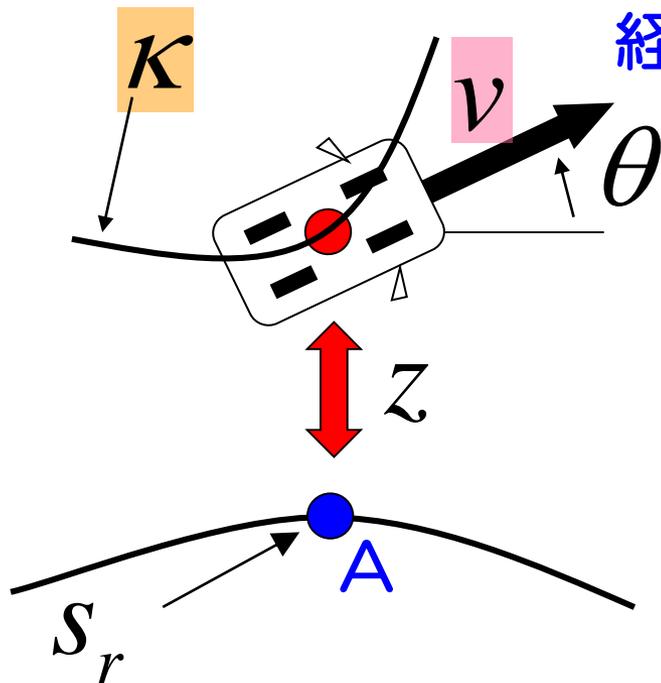
経路上の距離最小点Aのダイナミクス

$$\frac{dx_{re}}{dt} = f(x_{re}, v, K)$$

$$x_{re} = [\theta \quad s_r \quad z]^T$$



非線形システム P



経路上の距離最小点Aのダイナミクス

$$\frac{dx_{re}}{dt} = f(x_{re}, v, K)$$

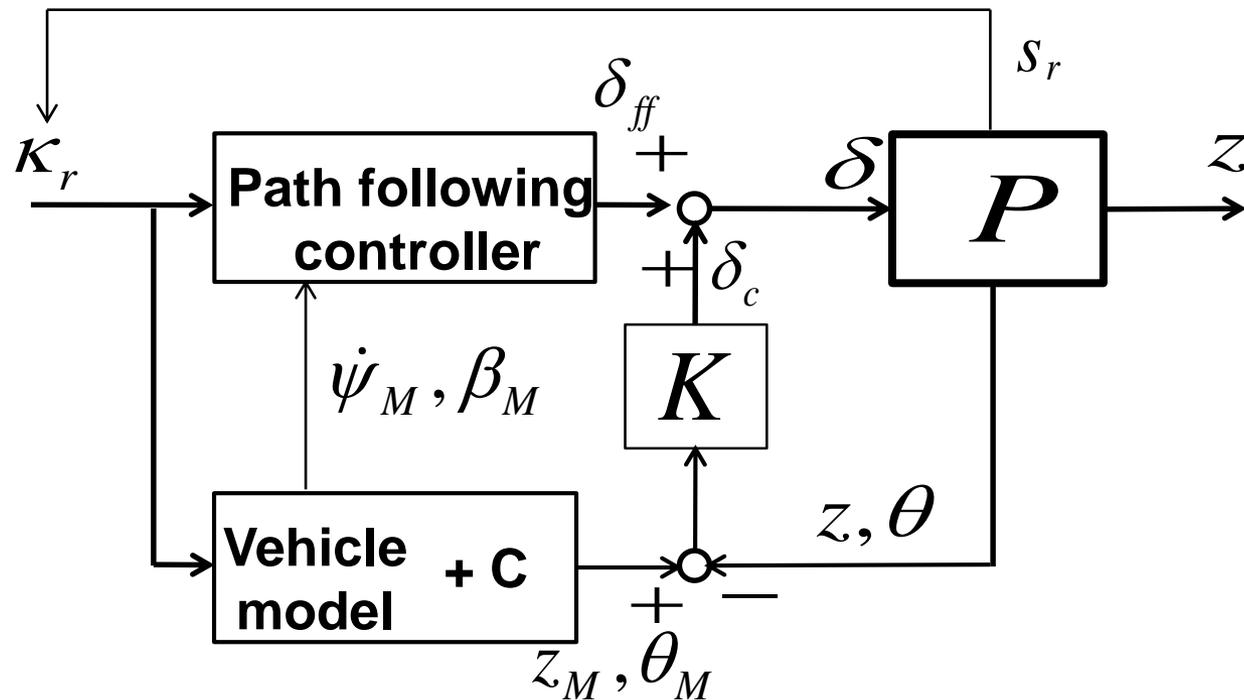
$$x_{re} = [\theta \quad s_r \quad z]^T$$

- $\lim_{t \rightarrow \infty} z = 0$ とする制御により経路追従を実現

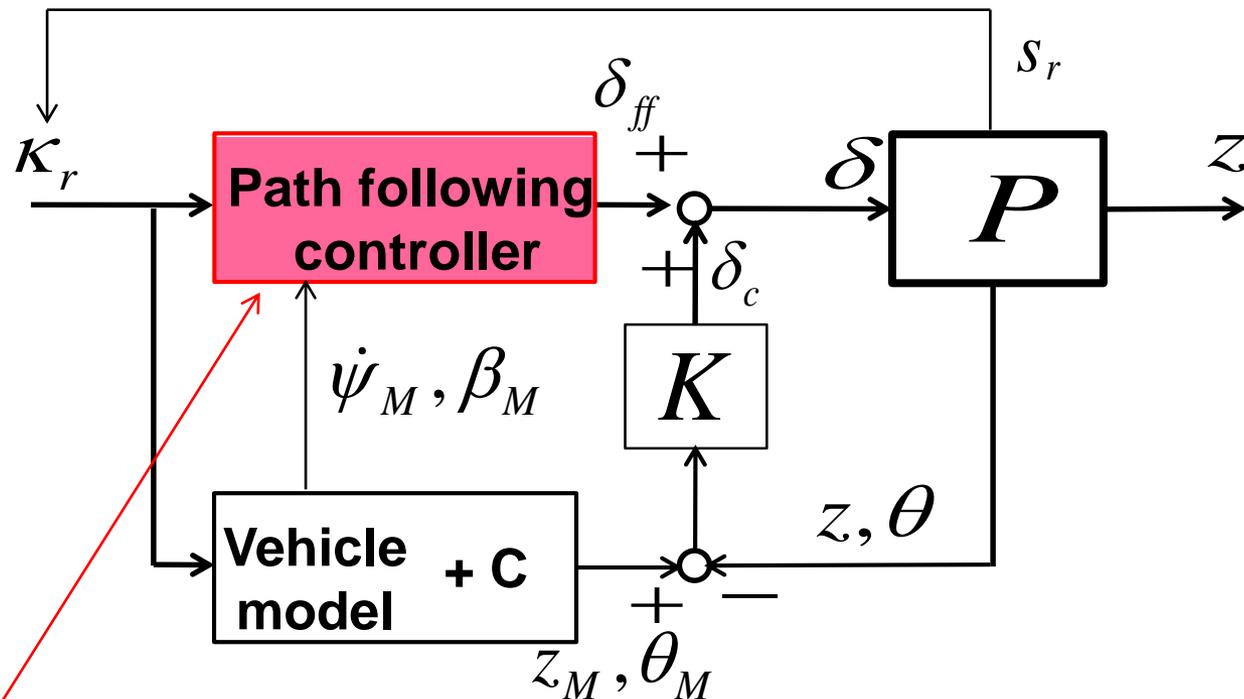
➡ 非線形状態フィードバック則として得られる

$$\delta = \frac{1}{a_{13}} \left(-\alpha_1 v \tan \theta - \alpha_0 z \cos \theta - a_{11} \beta - a_{12} \dot{\psi} + \frac{\kappa_r v^2 \cos \theta}{1 - \kappa_r z} \right)$$

提案するロバスト経路追従制御系の構成



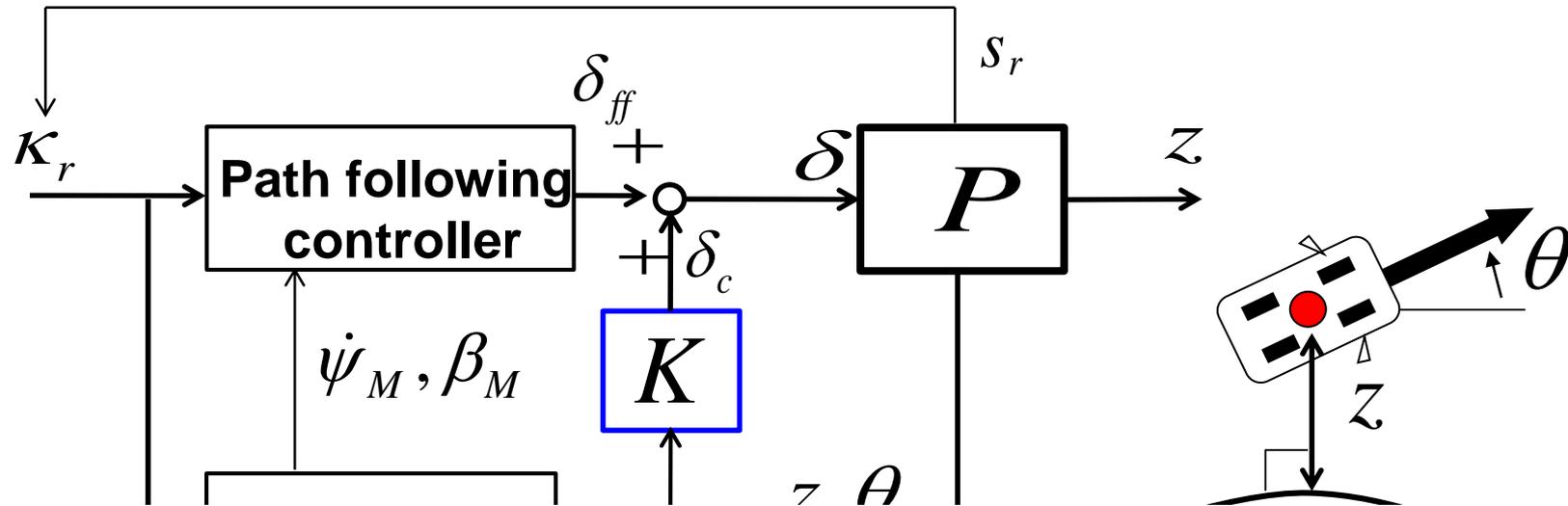
提案するロバスト経路追従制御系の構成



Vehicle model の状態を利用したフィードフォワード入力

$$\delta_{ff} = \frac{1}{a_{13}} \left(-\alpha_1 v \tan \theta_M - \alpha_0 z_M \cos \theta_M - a_{11} \beta_M - a_{12} \psi_M + \frac{K_r v^2 \cos \theta_M}{1 - K_r z_M} \right)$$

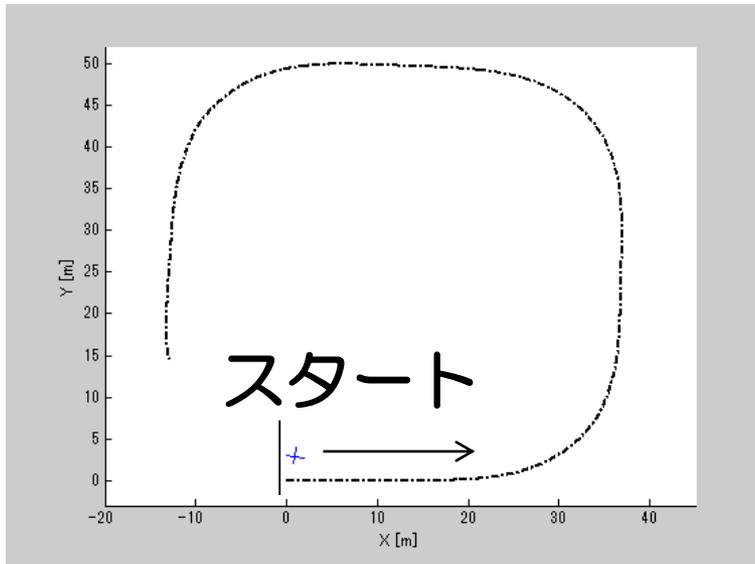
提案するロバスト経路追従制御系の構成



1. 出力フィードバック型
2. モデル化誤差や外乱の影響を K で抑制

$$o_c = \alpha_1 \left(\frac{\dots}{a_{13}} - \frac{\dots}{a_{13}} \right) + \alpha_0 \left(\frac{\dots}{a_{13}} - \frac{\dots}{a_{13}} \right)$$

1. はじめに
2. 先行研究
3. 問題設定・主結果
4. 数値例



四角形のコース

車両の初期誤差が存在

モデル化誤差

搭乗者3名+荷物

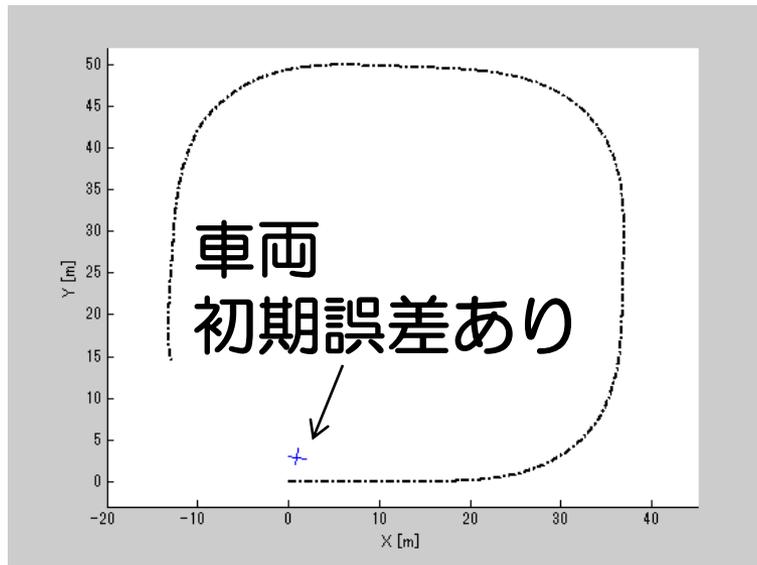
$$m' = m + \Delta m$$

$$I' = I + \Delta I$$

雨天により0.8倍を想定

$$K'_f = K_f + \Delta K_f$$

$$K'_r = K_r + \Delta K_r$$



四角形のコース

車両の初期誤差が存在

モデル化誤差

搭乗者3名+荷物

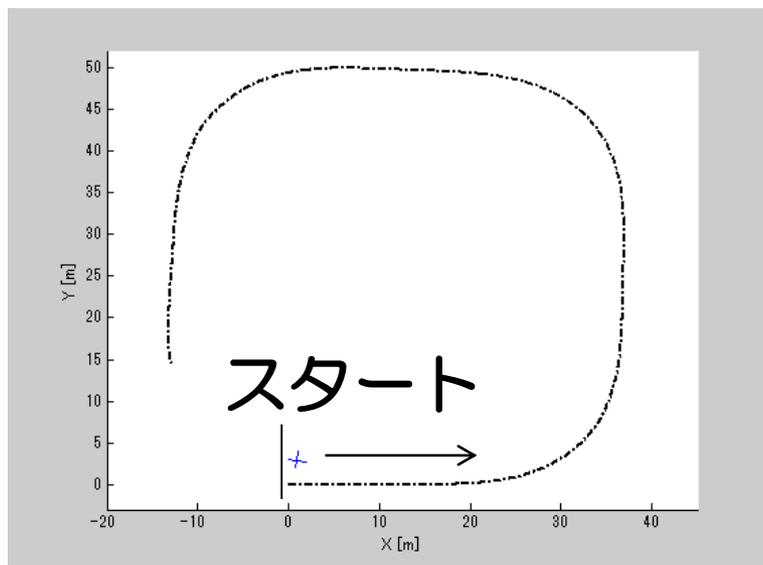
$$m' = m + \Delta m$$

$$I' = I + \Delta I$$

雨天により0.8倍を想定

$$K'_f = K_f + \Delta K_f$$

$$K'_r = K_r + \Delta K_r$$



四角形のコース

車両の初期誤差が存在

モデル化誤差

搭乗者3名+荷物

$$m' = m + \Delta m$$

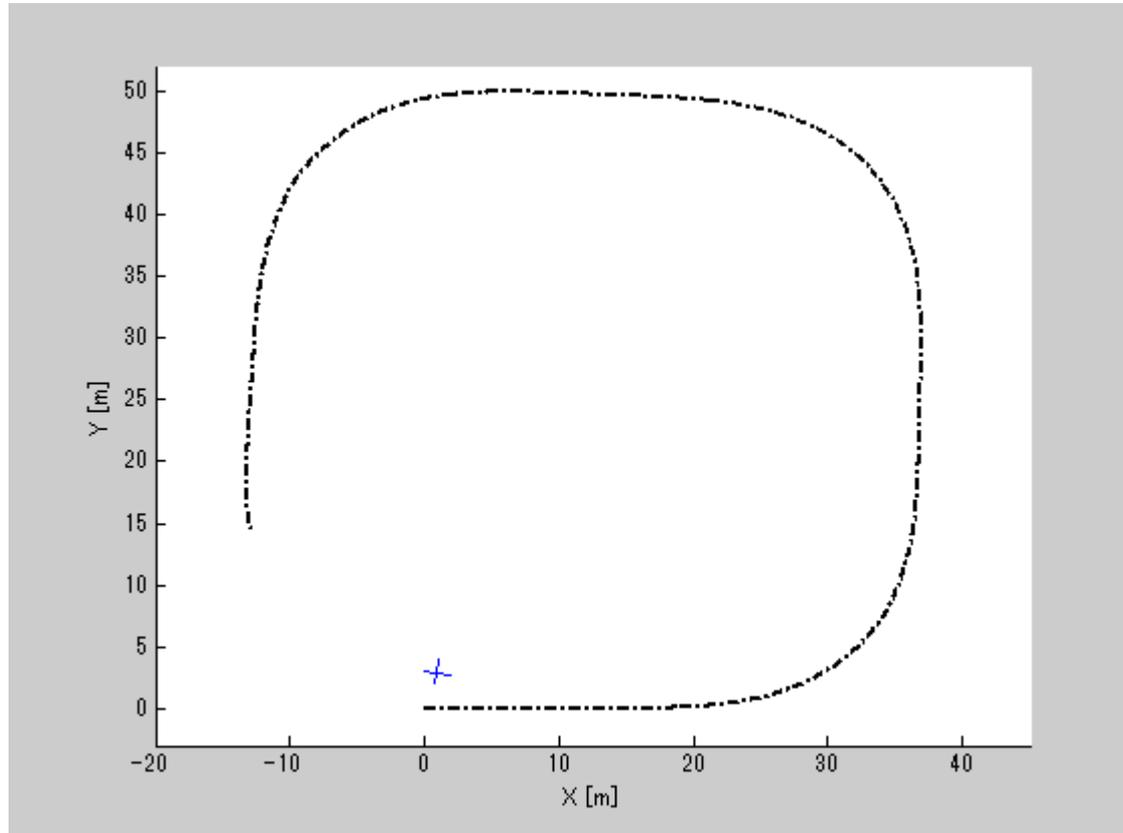
$$I' = I + \Delta I$$

雨天により0.8倍を想定

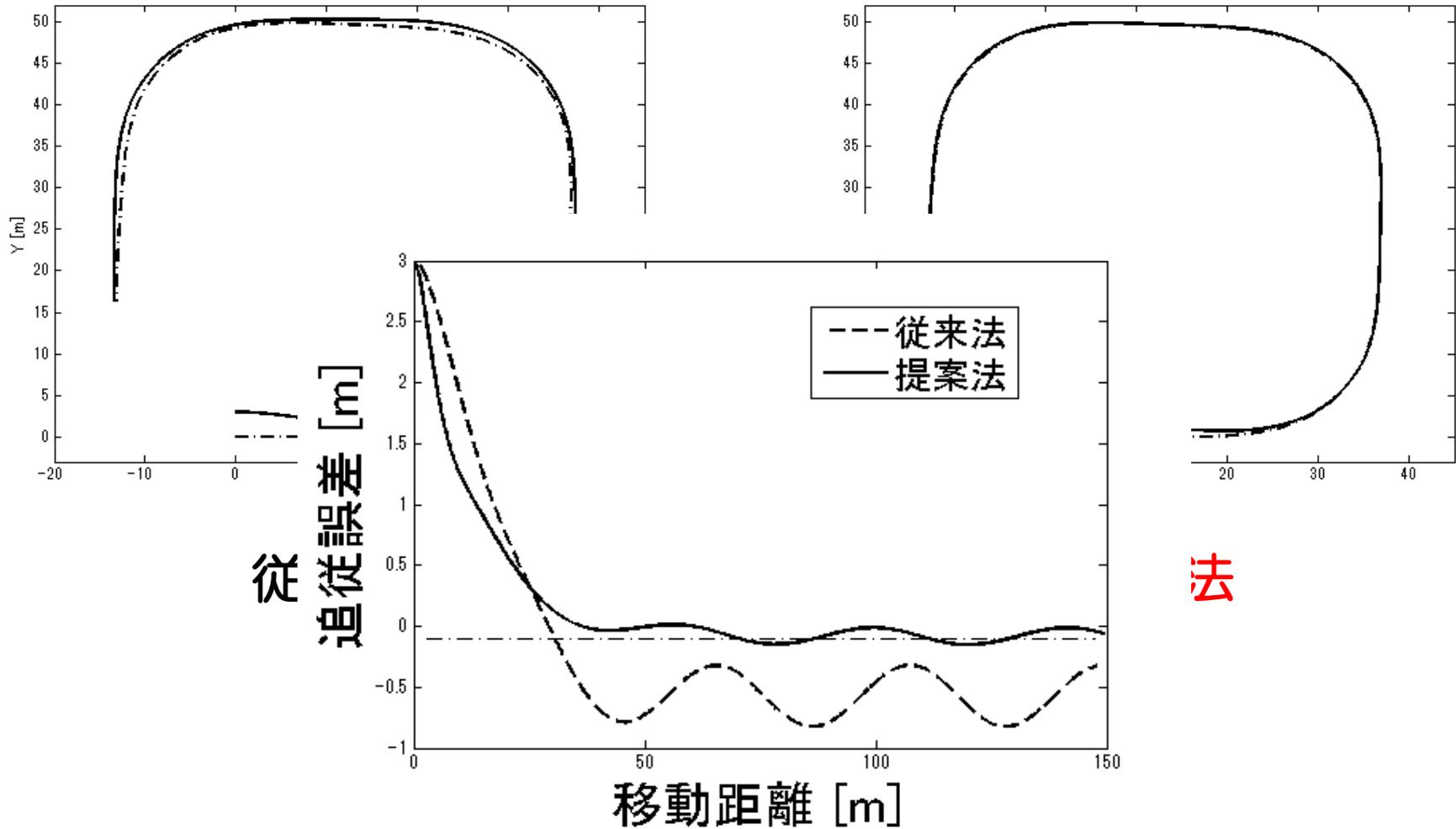
$$K'_f = K_f + \Delta K_f$$

$$K'_r = K_r + \Delta K_r$$

これらの条件のもと
従来法と提案法を比較



提案法の結果（アニメーション）

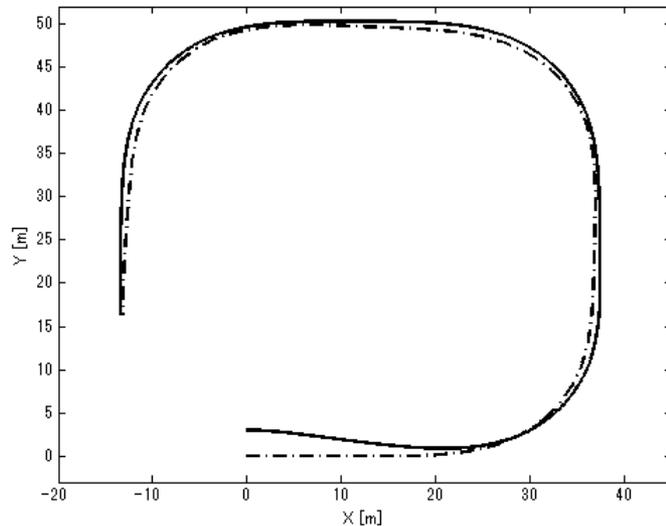


法

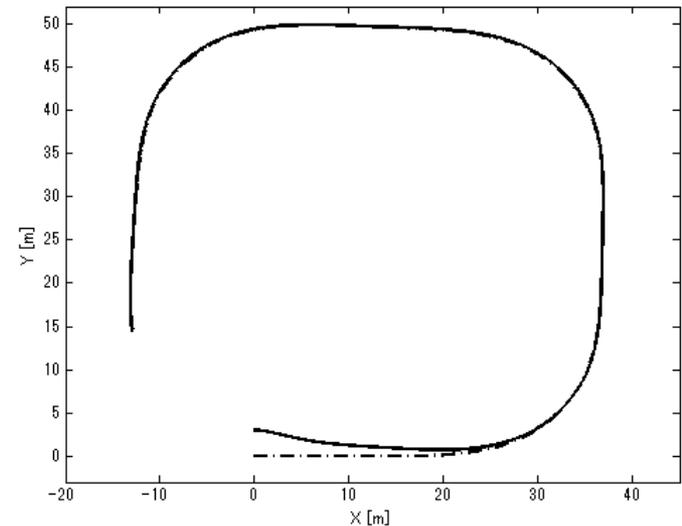
モデル化誤差の影響を低減

本発表の内容

- 出力フィードバック型で、モデル化誤差や外乱の影響を抑制する経路追従制御則を提案
- モデル化誤差を含む自動車モデルでのシミュレーションによる有効性の検証



従来法



提案法

自動車の運動モデル

自動車（左右独立駆動）の状態方程式（長井，電気D，1996）

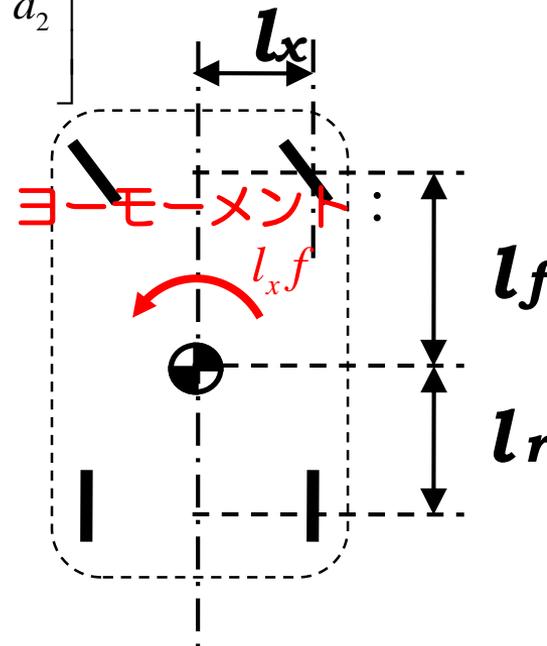
$$\dot{x} = A(v)x + B(v)u \quad x = [\beta, \psi, v]^T, u = [\delta, f, w]^T$$

$$A(v) = \begin{bmatrix} -2\frac{K_f + K_r}{Mv} & -1 - 2\frac{l_f K_f - l_r K_r}{Mv^2} & 0 \\ -2\frac{l_f K_f - l_r K_r}{I} & -2\frac{l_f^2 K_f + l_r^2 K_r}{Iv} & 0 \\ 0 & 0 & -a_1 \end{bmatrix}, B(v) = \begin{bmatrix} 2\frac{K_f}{Mv} & 0 & 0 \\ 2\frac{l_f K_f}{I} & \frac{l_x}{I} & 0 \\ 0 & 0 & a_2 \end{bmatrix}$$

M : 自動車質量
 I : 自動車慣性モーメント
 a_1 : 摩擦係数
 a_2 : 駆動力の係数

l_f, l_r : 重心から車軸までの距離

K_f, K_r : コーナリング係数



ヨーモーメントを直接制御 (DYC) できる自動車モデル

従来の経路追従制御手法の課題

状態フィードバック則



すべり角など、直接計測が困難な値を要する
モデル化誤差の影響を受けやすい

モデル化誤差の要因

- コーナリングパワは、路面状況で大きく変化する（雨天時減少）
- 車両の積載重量は乗車ごとに変化する
- タイヤ摩耗，経年劣化など