

自動車技術会 車両運動性能部門委員会 2004.3.26

## 自動車の運動性能向上における 非線形適応制御の持つ可能性



京都大学 情報学研究科  
深尾 隆則

## 非線形制御の実用性

- すべての物理システムは**何らかの非線形性**を持つ  
 ⇒ **ロバスト性**を持つ線形制御か、非線形制御か
- 理論は発展中であるが、**適用可能範囲はまだ狭い**  
**高次, 時変, 不連続**など必要とされているが適用が難しいシステムは多い (低次元化, 仮定, 近似)
- 想定外のモデル化誤差や外乱の影響を受けやすい
  - 非線形制御は **Order-made, Tailor-made!**
  - 実システムへの適用は**観察力**が必要
  - 対象システムと理論の理解 大学と企業の連携

## ツール: バックステッピング法

$$\dot{x} = \cos x - x^3 + u$$

$$u = -c_1 x - \cos x + \dot{x}^3 \Rightarrow \dot{x} = -c_1 x$$

$$u = -c_1 x - \cos x \Rightarrow \dot{x} = -c_1 x - x^3$$

$$\dot{x} = \cos x - x^3 + \xi$$

$$\dot{\xi} = u$$

$$\xi_{des} = -c_1 x - \cos x \equiv \alpha(x) \Rightarrow 0$$

## バックステッピング法

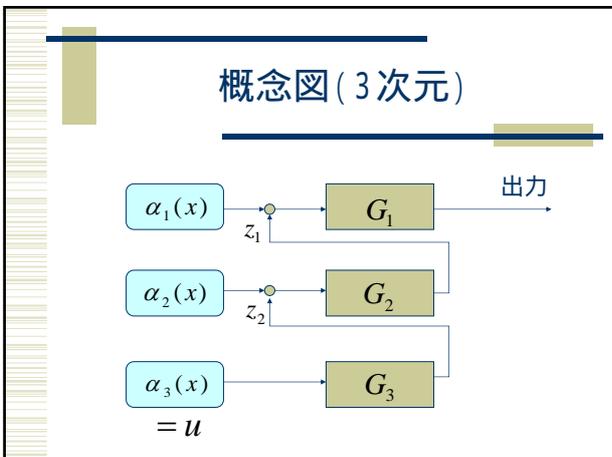
$$z = \xi - \xi_{des}$$

$$\dot{x} = -c_1 x - x^3 + z$$

$$\dot{z} = u + (c_1 - \sin x)(-c_1 x - x^3 + z)$$

$$u = -c_2 z - x - (c_1 - \sin x)(-c_1 x - x^3 + z)$$

$$\dot{z} = -c_2 z - x$$

$$V = \frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{2} z^2 \Rightarrow \dot{V} = -c_1 x^2 - x^4 - c_2 z^2$$


## 動的非線形フィードバック としての適応制御

$$\dot{x} = u + \theta x$$

未知パラメータ

未知パラメータの上界が分かていないなら, 安定化出来ない.  
 静的非線形コントローラでは漸近安定までは達成出来ない.

$$u = -(c + p)x$$

$$\dot{p} = x^2 \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$$

## 適応制御の可能性

$$\dot{x} = -cx + (\theta - p)x$$

$$\dot{p} = x^2$$

$$V(x, p) = \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{2}(\theta - p)^2$$

$$\dot{V} = -cx^2$$

パラメータ適応制御手法として達成

## 適応制御に対する誤解( ? )

- ◆ 推定パラメータが真値に収束する
- 推定パラメータが真値に収束しなくとも、目的は達成可能 (PEなら、真値に収束)
- ◆ 不安定になりやすい
- ロバスト化することで、外乱やノイズが存在しても不安定にはならない
- ◆ 過渡応答特性が悪い
- 特にバックステッピング法は過渡応答特性の改善に優れた性能を持つ

## 自動車のアクティブ制御

### 我々の研究

- ◆ アクティブサスペンション
- ◆ アクティブステアリング
- ◆ アクティブブレーキ
- ◆ ステアリングとブレーキの協調制御
- ◆ 多目的を達成するためのハイブリッド制御
- ◆ 自動操舵システム

## アクティブサスペンション

$$M_b \ddot{x}_s + K_a(x_s - x_w) + C_a(\dot{x}_s - \dot{x}_w) - \dot{u}_0 = 0$$

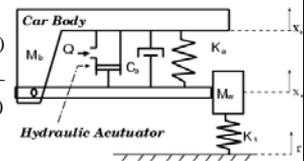
$$M_w \ddot{x}_w - K_a(x_s - x_w) - C_a(\dot{x}_s - \dot{x}_w) + K_t(x_w - r) + \dot{u}_0 = 0$$

$$\dot{u}_0 = AP_L$$

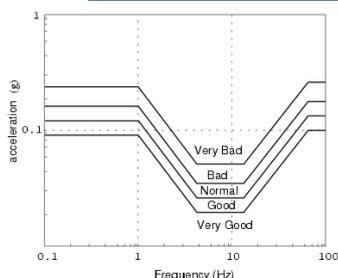
$$\frac{V_t}{4\beta_c} \dot{P}_L = Q - C_{sp}P_L - A(\dot{x}_s - \dot{x}_w)$$

$$Q = C_a \omega_{sv} \sqrt{\frac{1}{\rho}} (P_s - \text{sgn}(x_v) P_L)$$

$$\dot{x}_v = \frac{1}{\tau} (-x_v + u)$$

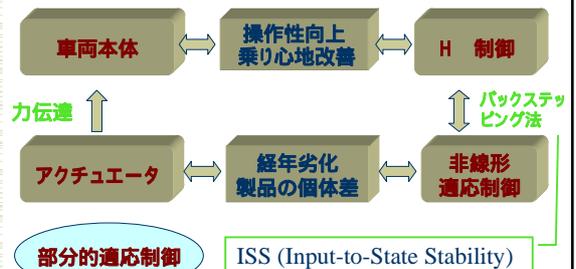


## アクティブサスペンションの目的



乗り心地線図

## 設計思想



## アクティブサスペンション

$$M_b \ddot{x}_s + K_a(x_s - x_w) + C_a(\dot{x}_s - \dot{x}_w) - U_a = 0$$

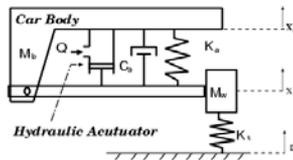
$$M_w \ddot{x}_w - K_a(x_s - x_w) - C_a(\dot{x}_s - \dot{x}_w) + K_t(x_w - r) + U_a = 0$$

$$U_a = AP_L$$

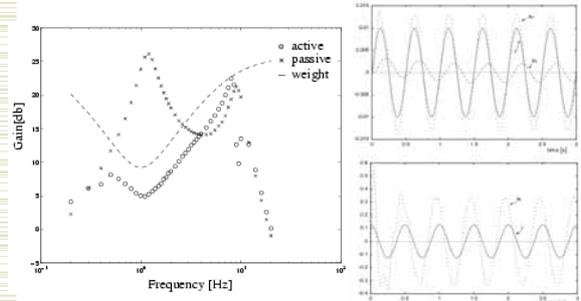
$$\frac{V_t}{4\beta_c} \dot{P}_L = Q - C_{ip} P_L - A(\dot{x}_s - \dot{x}_w)$$

$$Q = C_a W x_w \sqrt{\frac{1}{\rho} (P_s - \text{sgn}(x_w) P_L)}$$

$$\dot{x}_v = \frac{1}{\tau} (-x_v + u)$$

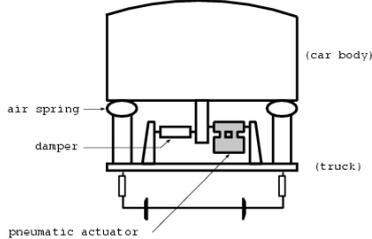


## 制御結果



## 電車のアクティブサスペンション

- ◆ 空気圧アクチュエータ

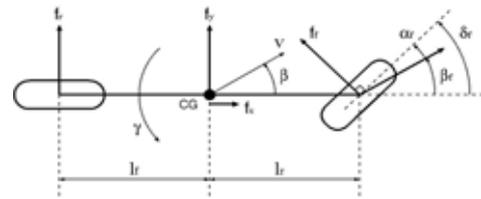


スライディングモード制御 + 適応制御の組み合わせ

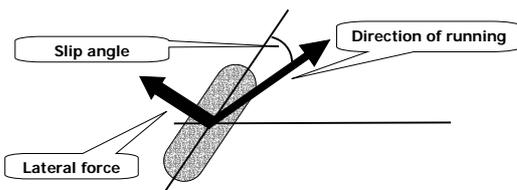
## アクティブステアリング

single-track model

左右輪を中心線上に1つのものとして簡単化

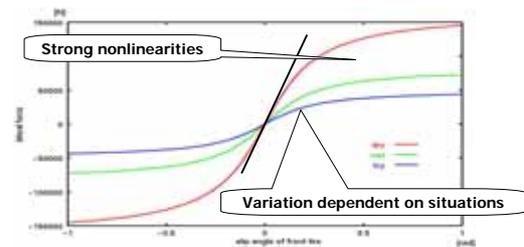


## タイヤにかかる横力



## 横力の非線形性

スリップ角と横力の関係



## 制御目的

- ◆ 運転安全性と操縦快適性
- ◆ 横力に存在する強い**非線形性**
- ◆ 路面状況の**不確定性**



ハンドルとタイヤの間に物理的なリンクがない

- ◆ ステアバイワイヤ技術によるアクティブステアリング
- ◆ 非線形性と不確定性を考慮する**非線形適応制御**
- ◆ 理想的な自動車性能を表す**規範モデル**

モデル規範型非線形適応制御

## ダイナミクス

自動車の速度は一定を仮定

$$\begin{bmatrix} mv(\dot{\beta} + \gamma) \\ J\dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\beta \sin\delta_f + \cos\beta \cos\delta_f & \cos\beta \\ l_f \cos\delta_f & -l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_f(\alpha_f) \\ f_r(\alpha_r) \end{bmatrix}$$



$\beta, \delta_f$  は十分小さく、これらの非線形性は無視できる

ただし、線形制御の時のように横力はそのまま、かつ、 $a_f, \alpha_r$  を状態変数にして変換

## 横力

$$\begin{cases} f_f(\alpha_f) = \frac{c_f}{c_1} \tan^{-1}(c_1 \alpha_f) \\ f_r(\alpha_r) = \frac{c_r}{c_2} \tan^{-1}(c_2 \alpha_r) \end{cases}$$

$c_1, c_2$ : Positive constants  
 $c_1 \frac{2}{\pi}, c_2 \frac{2}{\pi}$ : Maximum lateral forces



$C1, C2, C_f, C_r$  を未知パラメータとして扱いたいですが、既知関数に関して線形に表れず、既存の理論は使えない

## 横力の近似

$$f_f(\alpha_f) = \frac{a_{f_1}}{b_{f_1}} \tan^{-1}(b_{f_1} \alpha_f) + \frac{a_{f_2}}{b_{f_2}} \tan^{-1}(b_{f_2} \alpha_f)$$

ここで  $a_{f_1} > 0, a_{f_2} > 0, b_{f_1} > 0, b_{f_2} > 0$



$a_{f_1}, a_{f_2}$  は未知パラメータ

線形領域の傾きと、飽和領域の大きさ

## 非線形制御モデルへの変換

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \alpha_f \\ \alpha_r \\ \delta_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-l}{mvl} & 0 \\ 0 & \frac{-l}{mvl} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_f(\alpha_f) \\ f_r(\alpha_r) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-v}{l} & \frac{v}{l} & \frac{v}{l} & -\frac{1}{T_v} \\ -\frac{v}{l} & \frac{v}{l} & \frac{v}{l} & \frac{1}{T_v} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_v} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_f \\ \alpha_r \\ \delta_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_v}{T_v} \\ 0 \\ \frac{K_v}{T_v} \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \Delta_f(\alpha_f) \\ \Delta_r(\alpha_r) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$\Delta_f(\alpha_f), \Delta_r(\alpha_r)$ : モデル化誤差

## D\* control

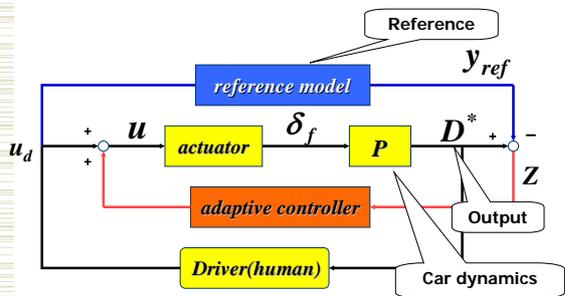
$$y = jv(\dot{\beta} + \gamma) + (1-j)v\gamma \quad (0 < j \leq 1)$$

横加速度                      ヨーレート

### なぜD\*を使うのか？

- > 通常時: ヨーレートを意識した運転
- 緊急時: 横方向の移動(横加速度)を意識した運転
- > ヨーレートだけを使うものも多いが、非線形モデルの場合、ヨーレートでは(仮想)入力に関してアフィンにならず、コントローラの導出が困難

## モデル規範型適応D\*制御



## 規範モデル

$$y_{ref} = \frac{K_Y(v)}{T_Y s + 1} u_d$$

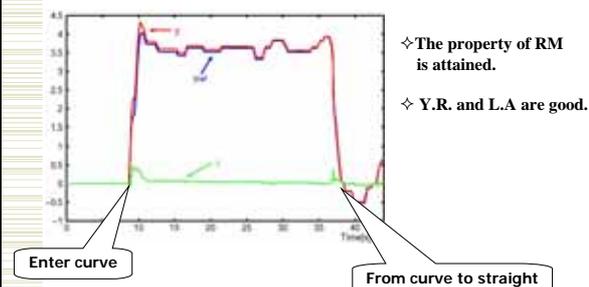
Driver's steering angle

$K_Y(v)$  定常特性から決定

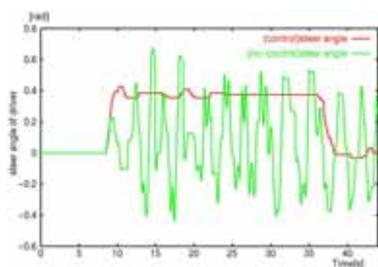
## リアルタイムシミュレーション



## 実験結果(出力)



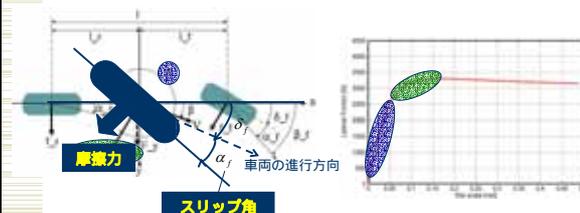
## 実験結果(操舵角)



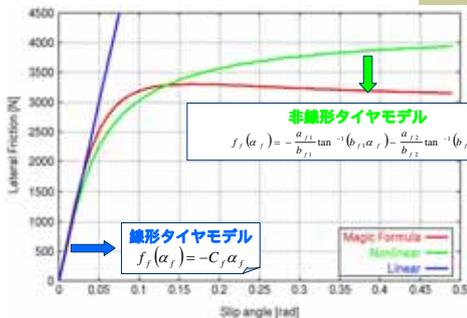
## ハイブリッド制御の導入

タイヤ摩擦力: 非線形性・不確定性

- 通常時は線形領域 ヨーレート(車両重心点の回転角速度)を重視
- 急激なハンドル操作を行うような緊急時は非線形領域 横加速度を重視

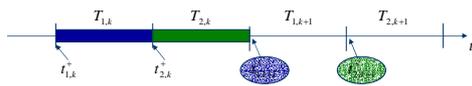
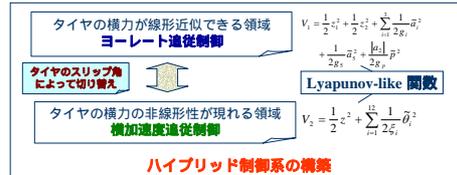


## タイヤモデル



## ハイブリッド制御系設計

- ◆ それぞれの状況に適するように制御系を切り替える  
**操縦安定性の向上**
- ◆ 単なる切り替えでは達成できない **critical な状況での切り替え**
- ◆ Multiple Lyapunov 関数の概念を参考にシステムを安定化
- ◆ 規範モデルの設定とコントローラの切り替え条件に対する指標



### ◆ システム1 (ヨーレート追従制御系)

$$V_1(t_{1,k}^+) \geq V_1(t_{1,k}^+ + T_{1,k}) \quad V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} z_2^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2g_i} \tilde{a}_i^2 + \frac{1}{2g_s} \tilde{a}_s^2 + \frac{|a_2|}{2g_p} \tilde{p}^2$$

$$V_1(t_{1,k}^+ + T_{1,k}) \geq V_1(t_{1,k+1}^+)$$

$$z_1(t_{1,k+1}^+) = z_2(t_{1,k+1}^+) = 0$$

$$\tilde{a}_i(t_{1,k+1}^+) = \tilde{a}_i(t_{1,k}^+ + T_{1,k}) \quad \tilde{p}(t_{1,k+1}^+) = \tilde{p}(t_{1,k}^+ + T_{1,k})$$

規範モデルの  
区分期間値を  
出力と一致させる

### ◆ システム2 (横加速度追従制御系)

$$V_2(t_{2,k}^+) \geq V_2(t_{2,k}^+ + T_{2,k}) \quad V_2 = \frac{1}{2} z_1^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2g_i} \tilde{a}_i^2$$

$$V_2(t_{2,k}^+ + T_{2,k}) \geq V_2(t_{2,k+1}^+)$$

$$z_1(t_{2,k+1}^+) = 0$$

$$\tilde{a}_i(t_{2,k+1}^+) = \tilde{a}_i(t_{2,k}^+ + T_{2,k})$$

推定パラメータの値は  
切り替わる直前の値を  
区分期間値とする

### ◆ 規範モデル 車両のダイナミクスを基に設定

- NS車両の**定常円旋回時のヨーレート**、**横加速度**を基に設定

定常円旋回時のヨーレート  $\gamma = \frac{V}{l} \delta_f = \frac{V}{l} K_U \delta_s$

定常円旋回時の横加速度  $V(\beta + \gamma) = V\gamma = \frac{V^2}{l} \delta_f = \frac{V^2}{l} K_U \delta_s$

- 規範モデルのゲイン

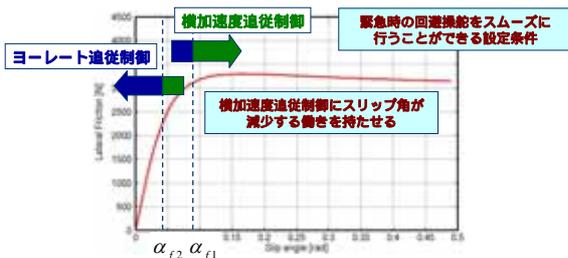
ヨーレート規範モデル  $\gamma_r = \frac{K_G(V)}{(T_{G1}s + 1)(T_{G2}s + 1)} \delta_s$   $K_G(V) = \frac{V}{l} K_U$

横加速度規範モデル  $y_r = \frac{K_Y(V)}{T_Y s + 1} \delta_s$   $K_Y(V) = \frac{V^2}{l} K_U$

### ◆ 切り替え条件

$$y_r = \frac{K_Y(V)}{T_Y s + 1} \delta_s \quad K_Y(V) = \frac{(\eta V)^2}{l} K_U$$

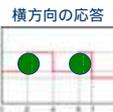
$$\eta < 1 \quad \eta > \sqrt{\frac{\alpha_{f2}}{\alpha_{f1}}} \quad \begin{matrix} \alpha_{f1}: \text{システム1} \Rightarrow \text{システム2} \\ \alpha_{f2}: \text{システム2} \Rightarrow \text{システム1} \end{matrix}$$



## シミュレーション結果

- ◆ 多自由度車両モデルを用いたシミュレーション
- ◆ Magic Formula タイヤモデル
- ◆ 乾燥路面において以下のような操舵入力を与える
  - 線形領域から非線形領域に入るような急激な操舵を想定
  - システムの切り替え状況

$$\delta_s = \begin{cases} 0.15[\text{rad}] & 0 \leq t \leq 2.0[\text{s}] \\ 0.10[\text{rad}] & 2.0 \leq t \leq 6.0[\text{s}] \\ 0.10[\text{rad}] & 7.0 \leq t \leq 10.0[\text{s}] \end{cases}$$



### ◆ 規範モデル

ヨーレート追従制御系  

$$K_G(V) = \frac{V}{l} K_U$$

$$T_{G1} = 0.15, T_{G2} = 0.1$$

横加速度追従制御系  

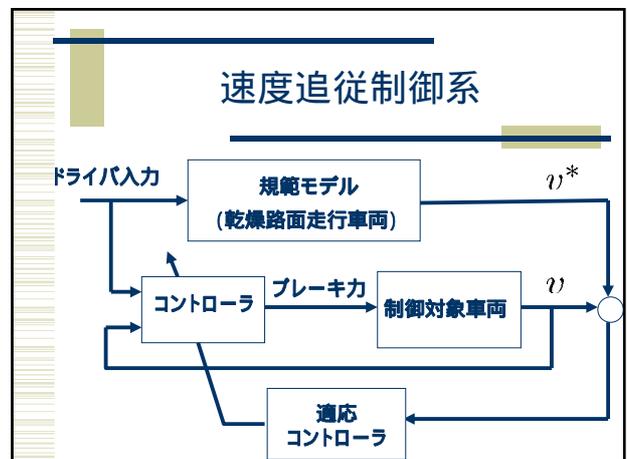
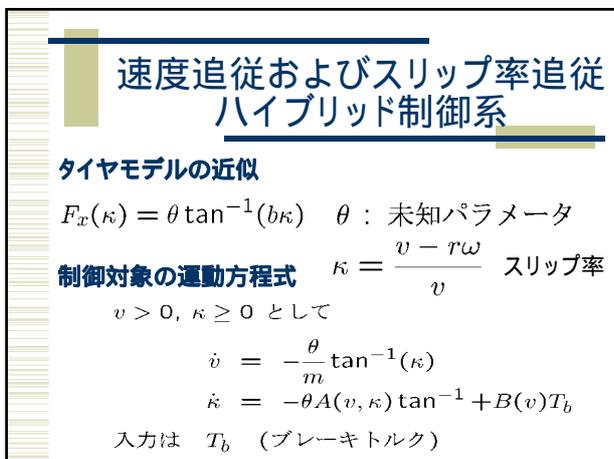
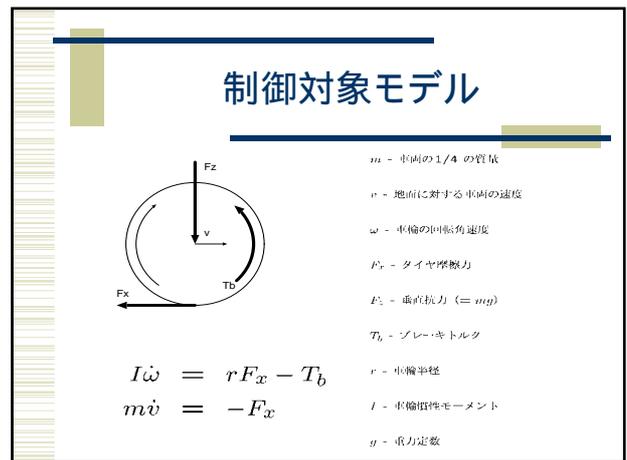
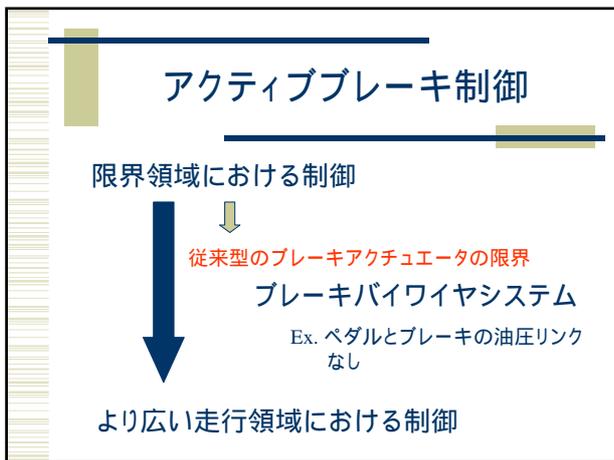
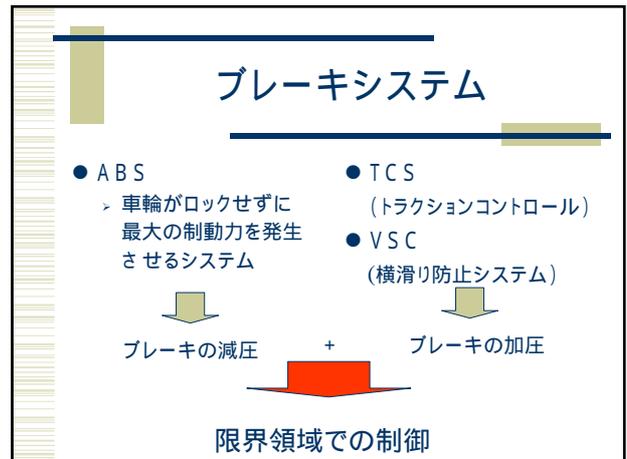
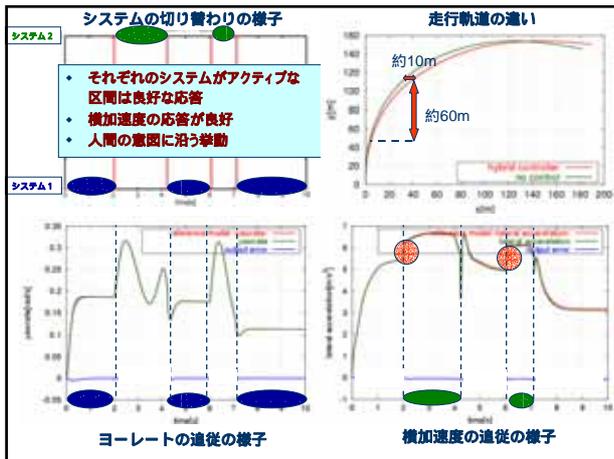
$$K_Y(V) = \frac{(\eta V)^2}{l} K_U$$

$$T_Y = 0.8$$

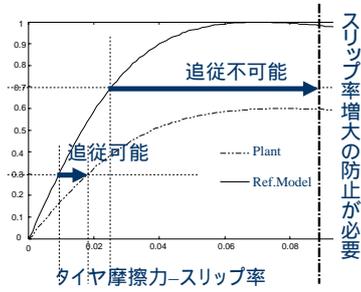
### ◆ 切り替え条件

システム1 システム2:  $\alpha_{f1} = 0.08[\text{rad}]$

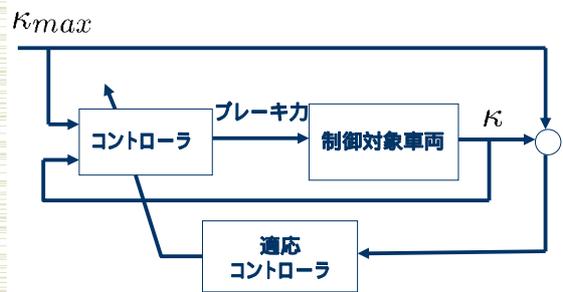
システム2 システム1:  $\alpha_{f2} = 0.048[\text{rad}]$



## 速度追従制御系の問題点



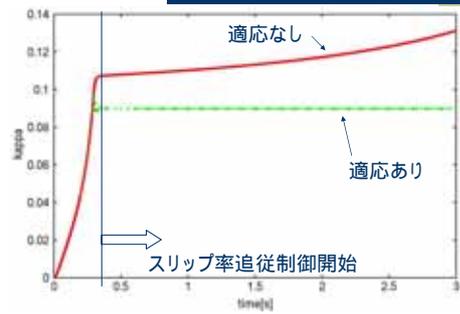
## スリップ率追従制御系



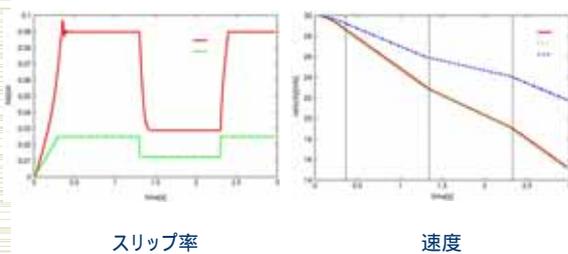
## ハイブリッド制御系



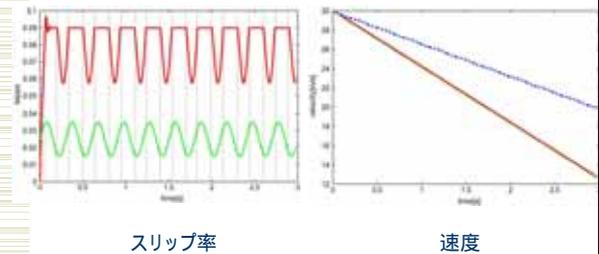
## 適応制御の有効性



## 結果 1



## 結果 2



## ステアリングとブレーキの協調制御

- ◆ 自動車の操安性向上の制御技術
  - アクティブブレーキ技術
    - ABS, TCS, VSC など
    - アクチュエータ制御、ブレーキバイワイヤ
  - アクティブステアリング技術
    - 4WS, ステアバイワイヤ

両技術の協調制御

## モデル規範型制御

- ◆ 車両の出力  $D^*$ 

$$D^* = jV(\dot{\beta} + \gamma) + (1 - j)V\gamma$$

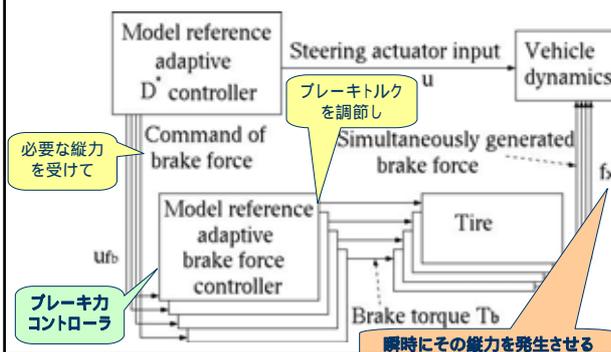
横加速度とヨーレートの線形結合

- ◆ 規範モデル

$$y_{ref} = \frac{K_Y(V)}{T_Y s + 1} \delta_s$$

$z = D^* - y_{ref} \rightarrow 0$  にする制御を行う

## ステアリング入力とブレーキ力コントローラ



## ブレーキ力コントローラ

- ◆ 規範モデル

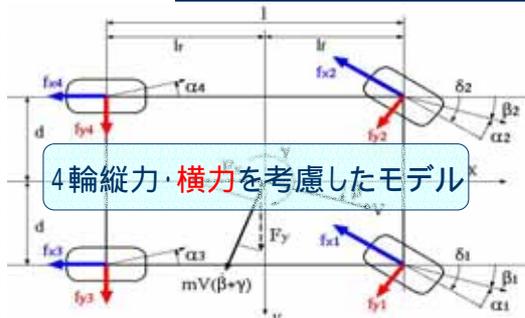
$$f_{xref} = \frac{1}{T_{fx} s + 1} u_{fb}$$

$u_{fb}$  : 指令ブレーキ力

$T_{fx}$  : 時定数

適度に時定数を小さく取れば必要な縦力が瞬時に得られる

## 車両4輪モデル



## 車両モデル

- ◆ 横加速度

$$mV(\dot{\beta} + \gamma) = f_{y1} + f_{y2} + f_{y3} + f_{y4}$$

横力  
 $< + \Delta a_y$   
 外乱として扱う

- ◆ ヨーレート

$$J\dot{\gamma} = l_f(f_{y1} + f_{y2}) - l_r(f_{y3} + f_{y4}) + d\delta_f(f_{y1} - f_{y2})$$

横力  
 $+ u_{fx}$  縦力  
 全体をブレーキ入力として扱う

## コントローラ

- ◆ ステアリング入力

$$u = j_u Q_u$$

$Q_u, Q_{fx}$  :  
必要な制御量

- ◆ ブレーキ力

$$u_{fx} = j_{\Delta} Q_{fx}$$

$j_u, j_{\Delta}$  の変化は

$$j_u + j_{\Delta} = 1 \text{ を満たすようにとる}$$

## コントローラ

- ◆ 各車輪への配分

$$\begin{array}{ll} \text{右前輪} & u_{fb1} = j_1 Q_{fx} + X_f \\ \text{右後輪} & u_{fb3} = j_3 Q_{fx} + X_r \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{左前輪} & u_{fb2} = j_2 Q_{fx} + X_f \\ \text{左後輪} & u_{fb4} = j_4 Q_{fx} + X_r \end{array}$$

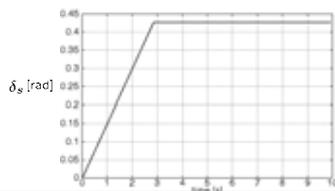
$$j_1 - j_2 + j_3 - j_4 = j_{\Delta}$$

を満たすように各車輪へ配分

$X_f, X_r$  : 前、後輪へ追加するブレーキ力

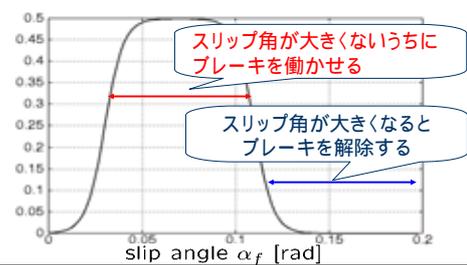
## シミュレーション

- ◆ 後輪横滑りは操舵コントローラで抑制可
- ◆ 前輪横滑り抑制シミュレーション
  - 人間の操舵入力



## 前輪横滑り抑制シミュレーション

$j_{\Delta}$  ブレーキへの配分



## シミュレーション

- ◆ 右旋回を考慮して配分

$$\begin{array}{ll} \text{右前輪} & j_1 = 0.6j_{\Delta} \\ \text{右後輪} & j_3 = 0.4j_{\Delta} \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{左前輪} & j_2 = 0.0 \\ \text{左後輪} & j_4 = 0.0 \end{array}$$

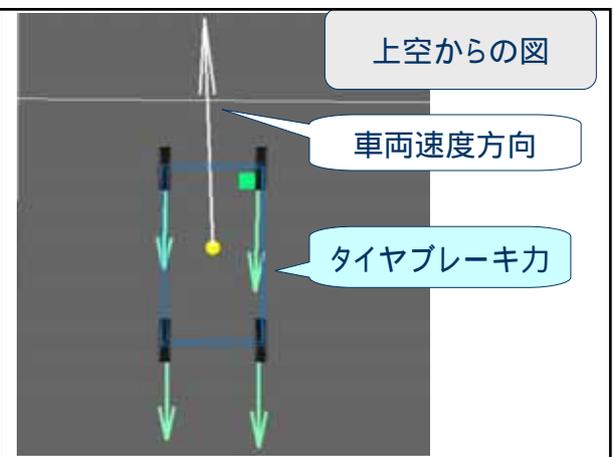
- ◆ 追加ブレーキ力

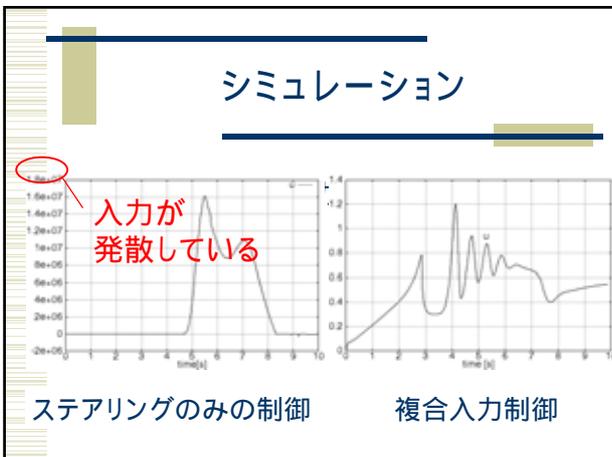
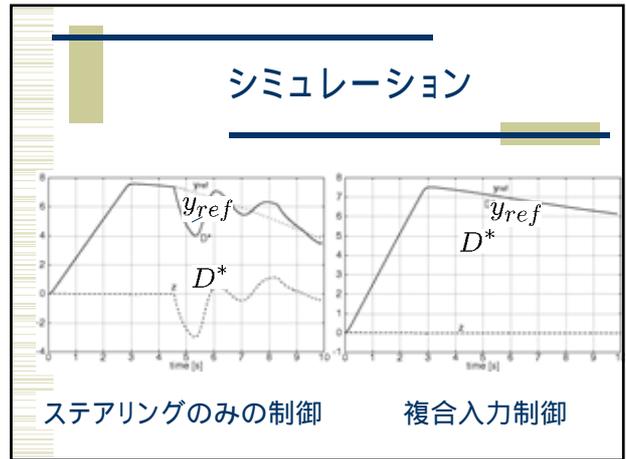
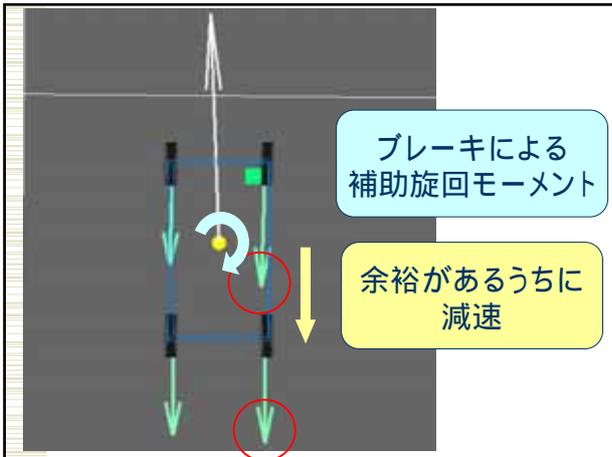
$$X_f = 100j_{\Delta}, X_r = 100j_{\Delta}$$

上空からの図

車両速度方向

タイヤブレーキ力





- ### まとめ
- ◆ 非線形制御と適応制御、ハイブリッド制御を車両の運動性能向上のために用いた結果、シミュレーションによって効果が確認された
  - ◆ 部分的適応制御(非線形制御)の考えは多くの機械システムに有効と考える
  - ◆ 未知パラメータ表現による非線形タイヤモデルと非線形 Single-Track モデルの状態表現は様々な応用が考えられる

## 今後の課題

- ◆ 規範モデルは線形モデルで良いか？
- ◆ ハイブリッド制御の切り替えタイミングと路面状況の判断
- ◆ サスペンション、ステアリング、ブレーキをさらに統合すべきか？
- ◆ 実機実験による検証と新たな課題発見

## 著者らによる関連発表論文

- T. Fukao, A. Yamawaki and N. Adachi:  
Adaptive control of partially known systems using backstepping: Application to H-infinity design of active suspension, In Proc. 37th IEEE Conference on Decision and Control (1998/12)
- 深尾 隆則, 山脇 明, 足立 紀彦:  
H 制御と非線形適応制御機構を有するアクティブサスペンションシステム, 平成11年度計測自動制御学会関西支部シンポジウム (1999/10)
- Takanori FUKAO, Akira YAMAWAKI and Norihiko ADACHI:  
Nonlinear and H-infinity Control of Active Suspension Systems with Hydraulic Actuators, In Proc. 38th IEEE Conference on Decision and Control (1999/12)
- T.Fukao, A.Yamawaki and N.Adachi:  
Adaptive control for active steering of cars, 3rd Asian Control Conference(2000/7)
- 深尾 隆則, 山脇 明, 足立 紀彦:  
モデル規範型適応制御によるアクティブステアリング, SICE 関西支部シンポジウム (2000/10)
- 深尾, 足立:  
非線形性と不確定性を考慮したアクティブステアリングのモデル規範型適応制御, SICE第1回適応学習制御シンポジウム (2001/1)
- T.Fukao, K.Mori, S.Miyasaka, N.Adachi and K.Osuka:  
Automated Steering Systems Based on Model Reference Control, IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2001, 195-200 (2001/5)

- 宮坂, 森, 深尾, 足立, 大須賀:  
モデル規範型非線形適応制御を用いたアクティブステアリング, 第45回システム制御情報学会研究発表講演会, 255-256 (2001/5)
- 深尾, 宮坂, 森, 足立, 大須賀:  
二輪操舵車のモデル規範型適応D\*制御系設計, SICE第1回制御部門大会, 311-314 (2001/5)
- T.Fukao, S.Miyasaka, K.Mori, N.Adachi and K.Osuka:  
Active Steering Systems Based on Model Reference Adaptive Nonlinear Control, IEEE 4th Int. Conf. on Intelligent Transportation Systems (2001/8)
- 森, 宮坂, 深尾, 足立, 大須賀:  
モデル規範型D\*制御による軌道追従自動操舵システム Dynamics and Design Conference 2001 (2001/8)
- 森 堅史, 宮坂 匠吾, 深尾 隆則, 足立 紀彦, 大須賀 公一:  
モデル規範型制御を用いたアクティブ操舵システムと自動操舵システム, 平成13年度計測自動制御学会関西支部シンポジウム (2001/10)
- 深尾 隆則, 足立 紀彦:  
部分的適応制御, 計測と制御, Vol.40, No.10, pp. 711-716, (2001/10)
- 深尾 隆則, 山脇 明, 足立 紀彦:  
H-infinity 制御と非線形適応制御機構を有するアクティブサスペンション 計測自動制御学会論文集, Vol.37, No.11 pp. 1034-1039 (2001/11)

- Takanori Fukao, Akira Yamawaki and Norihiko Adachi:  
Adaptive Control of Partially Known Systems and Application to Active Suspensions, Asian Journal of Control, Vo.4, No.2, pp.199-205 (2002)
- 宮坂 匠吾, 森 堅史, 深尾 隆則, 足立 紀彦, 大須賀 公一:  
モデル規範型D\*制御を用いたアクティブ操舵と自動操舵システム, 計測自動制御学会制御部門大会 (2002/5)
- 森 堅史, 井上 博介, 宮坂 匠吾, 深尾 隆則, 足立 紀彦:  
操縦性向上のためのステアリングとブレーキのモデル規範型適応制御, 第8回運動と振動の制御シンポジウム (2003/10)
- 井上 博介, 森 堅史, 宮坂 匠吾, 深尾 隆則, 足立 紀彦:  
速度およびスリップ率追従のためのブレーキのハイブリッド制御, 第8回運動と振動の制御シンポジウム (2003/10)
- 深尾, 井上, 森, 宮坂, 足立:  
モデル規範型非線形適応制御に基づくアクティブステアリングとアクティブブレーキ, 計測自動制御学会制御部門大会(2004/5)
- 宮坂, 深尾, 足立:  
アクティブサスペンションのためのハイブリッド制御系設計, Dynamics and Design Conference 2004 (2004/9)
- T. Fukao, S. Miyasaka, K. Mori, N. Adachi and K. Osuka:  
Active Steering Systems Based on Model Reference Adaptive Nonlinear Control, Vehicle System Dynamics, to appear