第３７回制御理論シンポジウム

ニュートラルステア特性実現のための直接ヨーモーメント制御

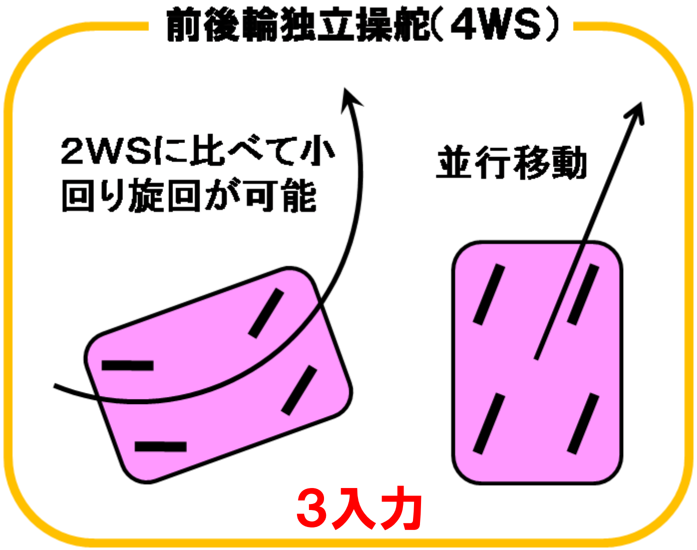
○岡島　寛，松永　信智，川路　茂保（熊本大学）

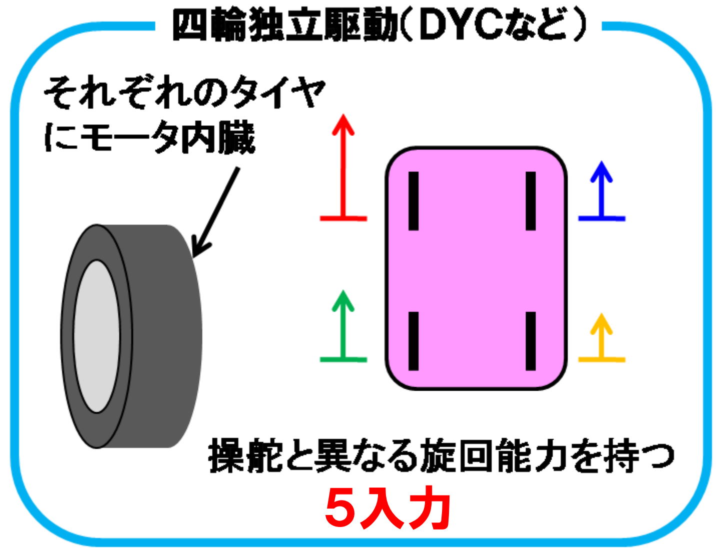
発表の流れ

- 研究背景，本研究の目的
- 問題設定
- 出力零化に基づくDYC則
- 数値例
- まとめ

研究背景

近年，自動車には前輪操舵のものだけでなく，4WSやDYCなど旋回に関する**複数の入力を持つ機構**が開発されている

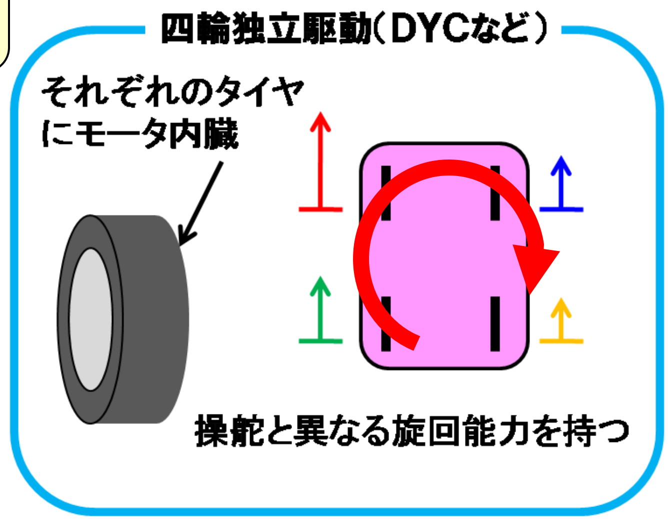




人が操作する（できる）ものは**ハンドル角，アクセル**の2つであるため，余ったアクチュエータの操作量は**制御アルゴリズムによって決められる**必要がある

研究背景

直接ヨーモーメント制御(DYC)



左右輪の駆動力差を利用してヨーモーメントを発生させる.

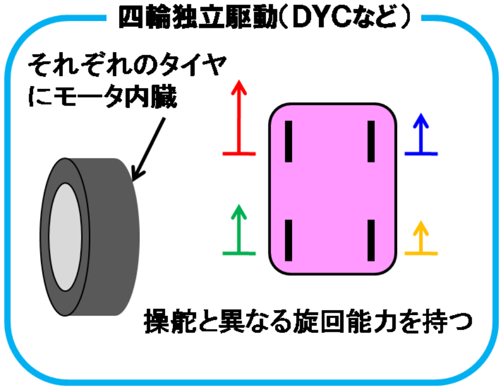
DYC制御および４輪独立駆動車両の従来研究

- タイヤ負荷の配分　(坂井ら2000, 西原ら2005)
- すべり角零化　(永井ら1996, 平岡ら2006)

主に車体の安定性の観点から, DYC則が提案されていた

研究目的

直接ヨーモーメント制御（DYC）



従来研究

車体の安定性を考慮したDYC則 （坂井ら2000，西原ら2005，永井ら1996，平岡ら2006）

本研究

“運転しやすさ”に着目したDYC則について考える.

（DYCを用いてニュートラルステア特性を実現）

（交通事故防止や運転時の精神的負担の軽減の観点から “運転しやすさ”を考慮することは重要）

ニュートラルステア特性

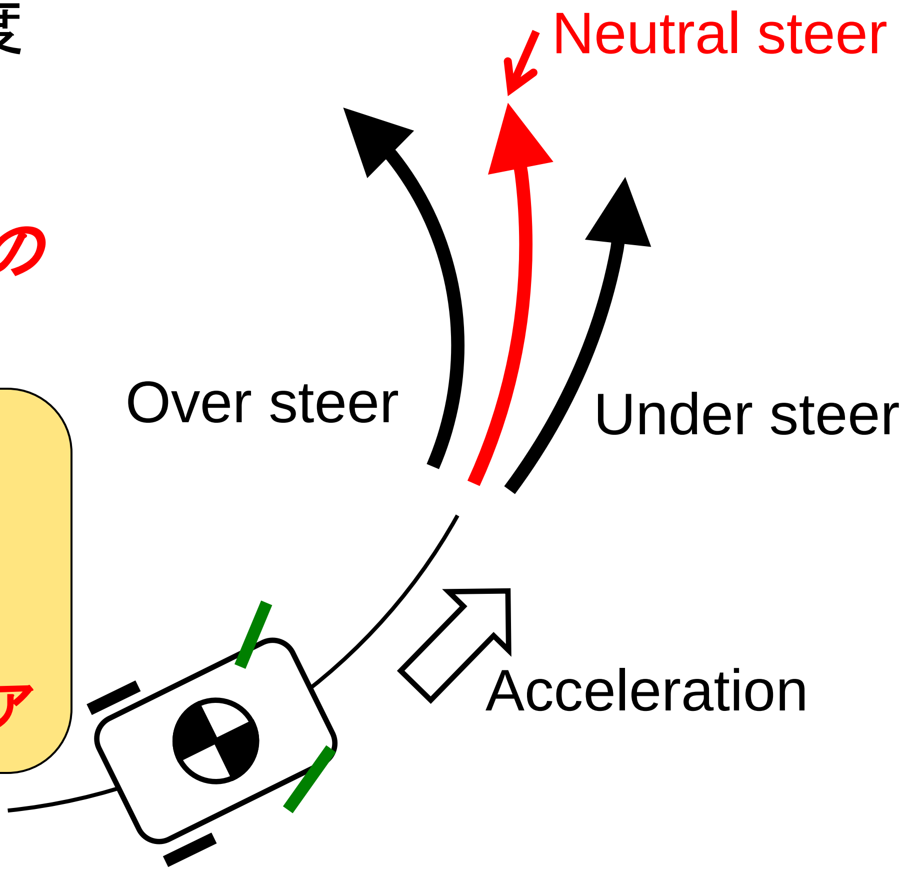
1. 操舵角 δ を一定とし，一定速度で走行

2. 操舵角 δ を一定のまま，***車体の加速***を行う

極率が**増大**：オーバーステア

極率が**減少**：アンダーステア

極率が**変わらない**：ニュートラルステア



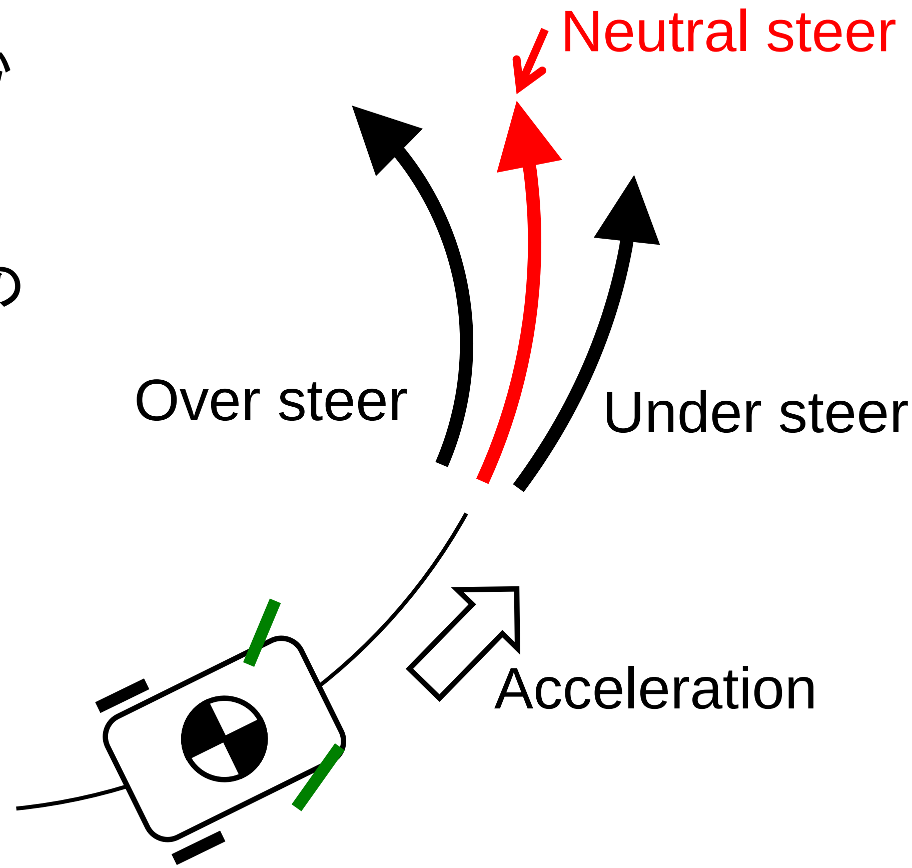
ニュートラルステア：基本的なステアリング特性の一つ

速度の大小に関らず旋回に必要な操舵角が変わらないため運転しやすい

ニュートラルステア特性

通常，ステアリング特性は自動車の重心位置やタイヤ幅などから決まる

本研究では，DYC則によって他の特性の自動車をニュートラルステアにする



関連研究

ニュートラルステアの実現可能性に言及
（福島，2005）

ヨーレート，すべり角の同時最適化
（福島，2006）目標ヨーレートをハンドル角と別途設定

具体的な制御手法は従来考えられていない

発表の流れ

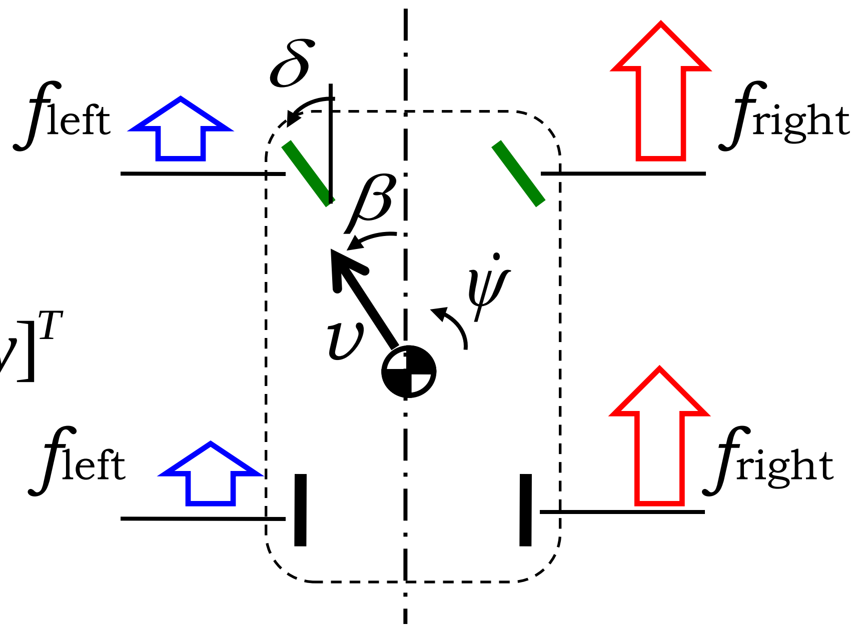
- 研究背景，本研究の目的
- 問題設定
- 出力零化に基づくDYC則
- 数値例
- まとめ

自動車の運動方程式

自動車（左右独立駆動）の状態方程式（長井，電気D，1996）

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

$$x = [\beta, \dot{\psi}, v]^T, u = [\delta, f, w]^T$$



3状態

$$\begin{cases} \beta(t) & \text{：車体すべり角} \\ \dot{\psi}(t) & \text{：ヨー角速度} \\ v(t) & \text{：自動車の車速} \end{cases}$$

3入力

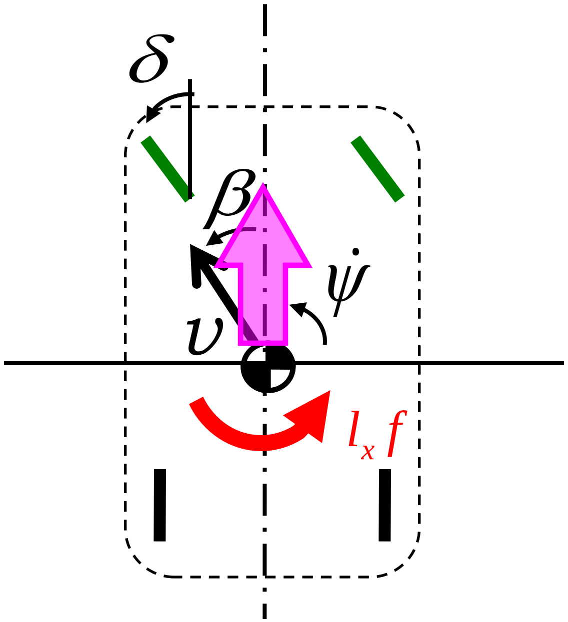
$$\begin{cases} \boxed{\delta(t)} \\ f(t) := 2(\boxed{f_{\mathrm{right}}(t)} - \boxed{f_{\mathrm{left}}(t)}) \\ w(t) := 2(\boxed{f_{\mathrm{right}}(t)} + \boxed{f_{\mathrm{left}}(t)}) \end{cases}$$

自動車の運動方程式

自動車(左右独立駆動)の状態方程式(長井, 電気D, 1996)

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

$$x = [\beta, \dot{\psi}, v]^T, u = [\delta, f, w]^T$$



3状態

$\beta(t)$:車体すべり角

$\dot{\psi}(t)$:ヨー角速度

$v(t)$:自動車の車速

3入力

$$\boxed{\delta(t)}$$

$$\boxed{f(t)} := 2(f_{\mathrm{right}}(t) - f_{\mathrm{left}}(t))$$

$$\boxed{w(t)} := 2(f_{\mathrm{right}}(t) + f_{\mathrm{left}}(t))$$

自動車の運動方程式

自動車（左右独立駆動）の状態方程式（長井，電気D，1996）

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

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

M ：自動車質量

I ：自動車慣性モーメント

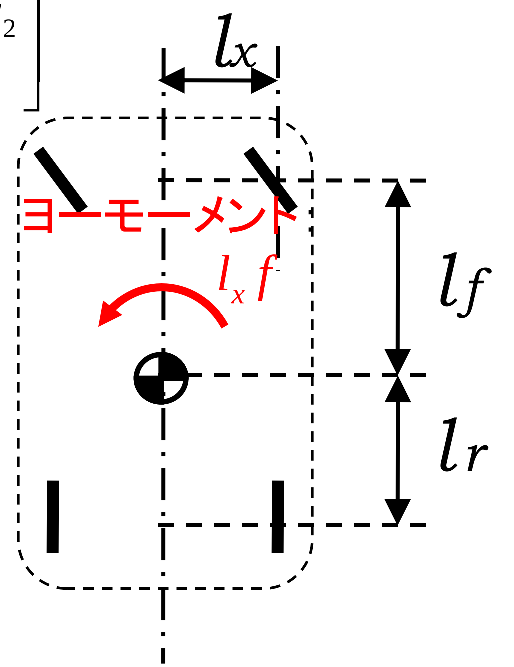
l_f, l_r ：重心から車軸までの距離

K_f, K_r ：コーナリング係数

a_1 ：摩擦係数

a_2 ：駆動力の係数

l_x ：車軸中心からタイヤの距離

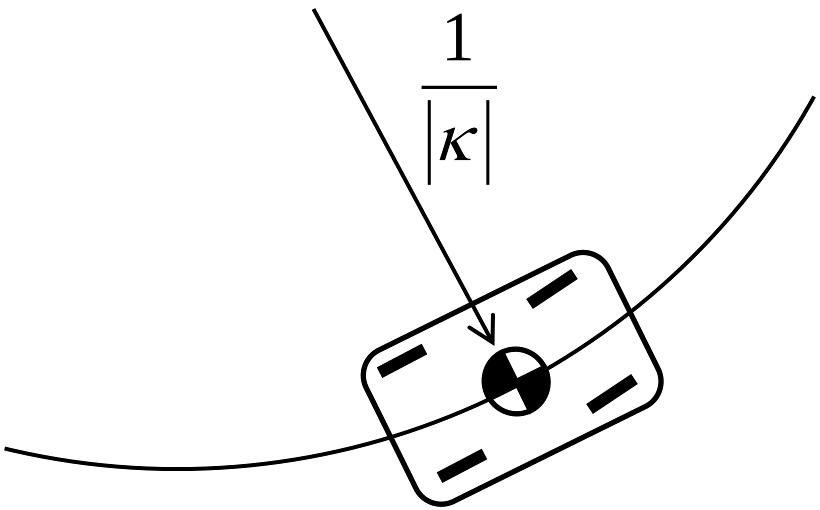


ヨーモーメントを直接制御（DYC）できる自動車モデル

自動車の評価出力

自動車が描く軌跡の極率 κ（極率半径の逆数）

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



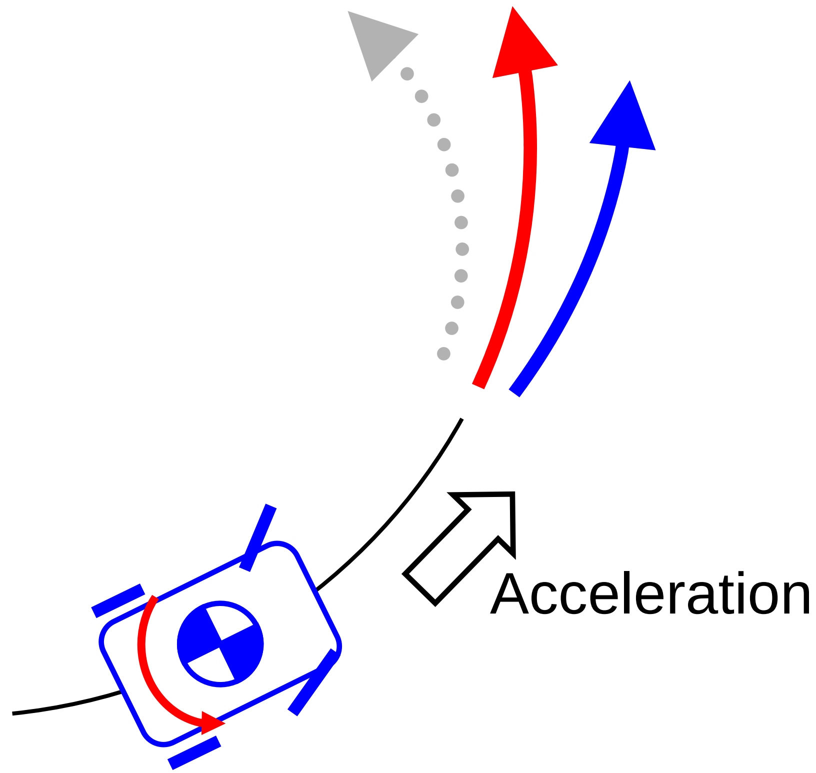
極率 κ を評価出力とする

DYCの制御問題

車体がニュートラルステア特性でない場合

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

$$3入力 \begin{cases} \delta(t): \\ \boxed{f(t):} \\ w(t): \end{cases}$$



ニュートラルステア特性を実現する f の制御則を求めよ

速度時系列に依らず，操舵角が一定ならば極率が一定となる f の制御則

発表の流れ

研究背景，本研究の目的

問題設定

出力零化に基づくDYC則

数値例

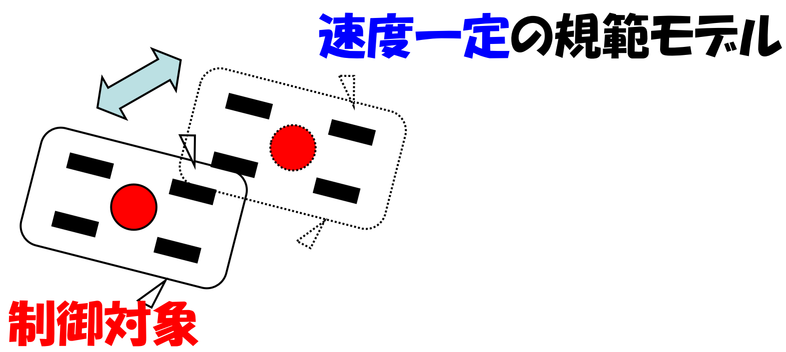
まとめ

制御則導出の概要

出力零化制御により制御則を導出する

- 一定速度V_c での自動車の運動モデルを規範モデルとして与える
- 自動車（制御対象）の極率と規範モデルの極率との差を零化することでニュートラルステアを実現

速度が変わっても規範モデルのダイナミクスと一致させることで
速度によらず V_cでの動特性に運動が支配される



極率偏差を零にする制御（出力零化）

規範モデル

自動車の運動方程式

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

規範モデル

$$\dot{x}_c = A(v_c)x_c + B(v_c)u_c \qquad x_c = [\beta_c, \dot{\psi}_c]^T, u_c = [\delta]^T$$

v_c :規範モデルの速度(一定値)

$$\kappa_c = -2\frac{K_f + K_r}{Mv_c^2}\beta_c - 2\frac{l_f K_f - l_r K_r}{Mv_c^3}\dot{\psi}_c + \frac{2K_f}{Mv_c^2}\delta$$

制御問題の定式化

自動車の運動方程式

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

規範モデル

$$\dot{x}_c = A(v_c)x_c + B(v_c)u_c \qquad x_c = [\beta_c, \dot{\psi}_c]^T, u_c = [\delta]^T$$

[**問題1**] 任意に与えられた$\delta(s), w(s)$に対し，次式を満足する
f の制御則を求めよ

$$\lim_{s \to \infty} e(s) = 0 \qquad e = \kappa - \kappa_c$$

ただし，S は移動距離であり，次式で与えられる（単調増加を仮定）

$$s = \int_{t_0}^{t} v(\tau) d\tau + s_0$$

[問題1]の解⇒ニュートラルステア特性を満足する

出力零化

$e\left(=\kappa-\kappa_c\right)$ を出力とした出力零化を考える

次式を満足する f を求める

$$\frac{d}{ds}e(s)+\alpha e(s)=0,\alpha>0$$

$$e(s)=e(0)\exp(-\alpha s)$$

すなわち

$\lim_{s\to\infty} e(s)=0$ **を満たす** （ **[問題1]** を満足する）

f の制御則（提案手法）

$\frac{d}{ds}e(s)+\alpha e(s)=0, \alpha>0$ を満足する f の制御則

問題1を満たす制御則

$$f=\frac{D}{N}$$

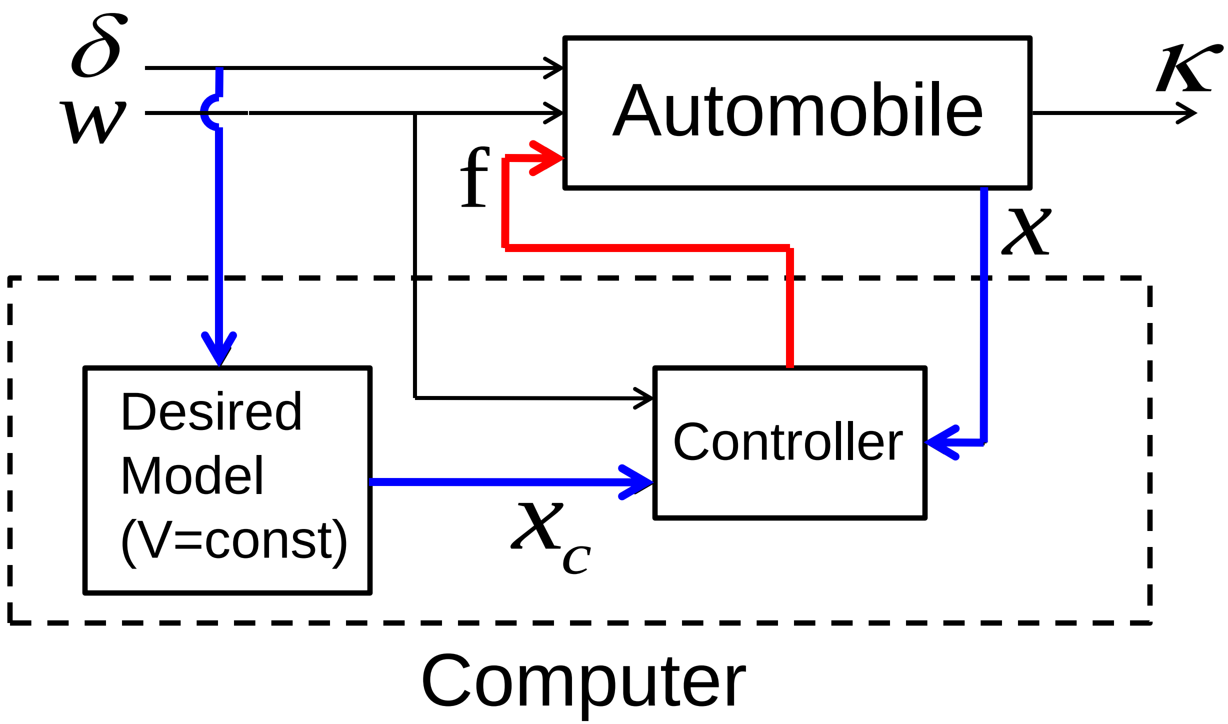
$$D=2\frac{K_f+K_r}{Mv^3}\dot{\beta}+2\frac{l_fK_f-l_rK_r}{Mv^4}\left([0\quad 1]A(v)x+\frac{2l_fK_f}{Mv^4}\delta\right)$$

$$-\frac{2K_f}{Mv^3}\dot{\delta}+\left(-4\frac{K_f+K_r}{Mv^4}\beta-6\frac{l_fK_f-l_rK_r}{Mv^5}\dot{\psi}+4\frac{K_f}{Mv^4}\delta\right)\dot{v}$$

$$+\frac{\dot{\kappa}_c}{v}-\alpha e$$

$$N=-2\frac{l_fK_f-l_rK_r}{Mv^4}\frac{l_x}{I}$$

制御系の構成


δ
w
Automobile
κ
f
x
Desired
Model
(V=const)
Controller
x_c
Computer

発表の流れ

研究背景，本研究の目的

問題設定

出力零化に基づくDYC則

数値例

まとめ

数値例

1．操舵角を一定とした場合
2．操舵角が変化する場合

制御対象

K_f	45372 [N/rad]	I	2205 $[\mathrm{kg \cdot m^2}]$
K_r	74405 [N/rad]	M	1507 [kg]
l_f	1.122 [m]	l_x	0.6 [m]
l_r	1.428 [m]		

軽自動車のパラメータ（川邊ら，槙書店，2004）

$$\dot{v} = -0.5v + 5w$$

アンダーステア特性を持つ自動車パラメータ

規範モデルの速度：

$$v_c = 12[\mathrm{m/s}] \quad (\approx 40[\mathrm{km/h}])$$

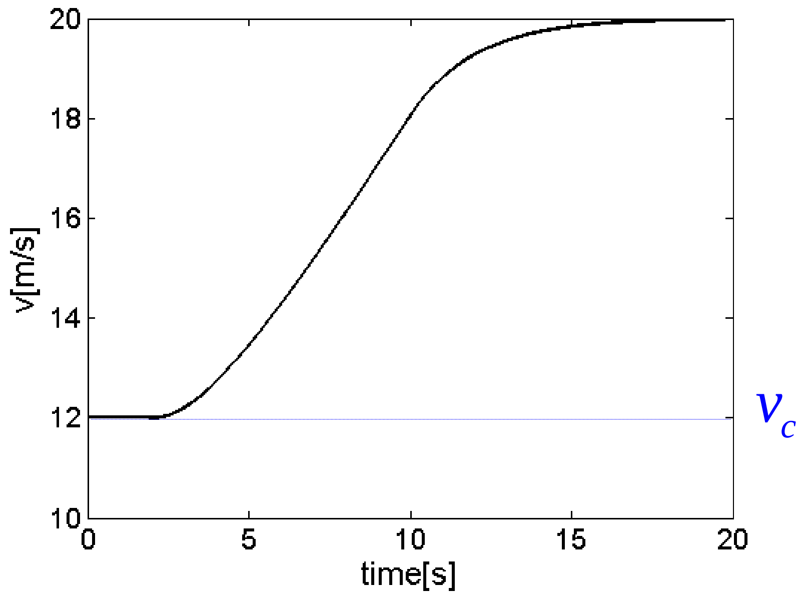
１．操舵角が一定の場合

シミュレーション条件

$$\delta(t) = 0.05$$ ：一定操舵角

$$w(t) = \begin{cases} 1.2 & t < 2 \\ 0.1t + 1 & 2 \le t < 10 \\ 2 & 10 \le t \end{cases}$$

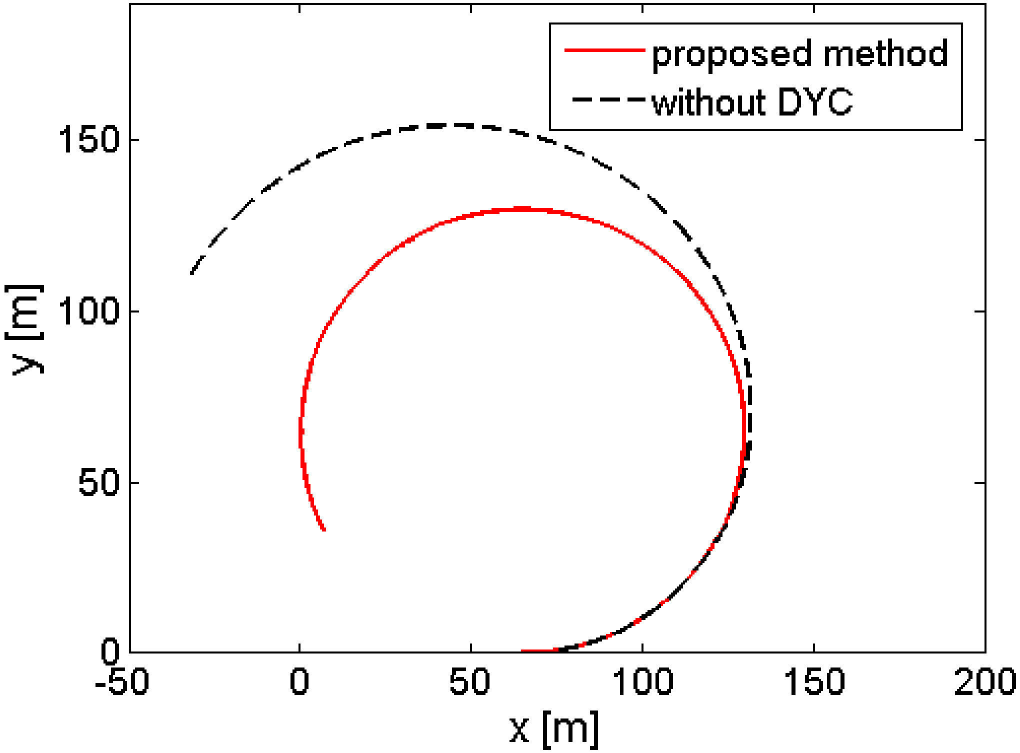
自動車速度の動特性



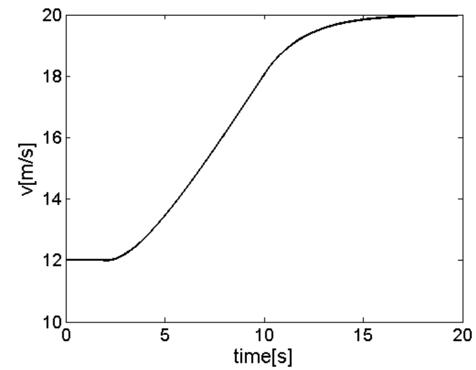
$w(t)$ ：自動車が規範モデルの速度 v_c と同じ速度からスタートし，加速させる入力

提案手法と f＝０（DYCなし）との比較

1．操舵角が一定の場合



提案手法
ｆ＝０（DYCなし）



- f=0ではアンダーステア特性を示す
- 提案手法では加速中も円旋回している

DYC則により**ニュートラルステア特性**を実現

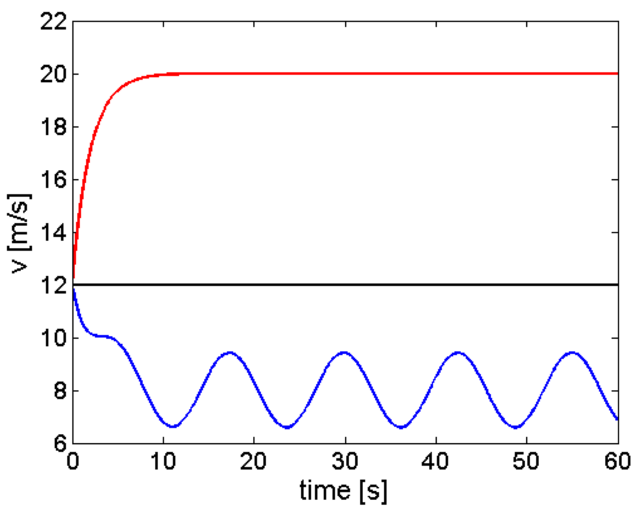
２．操舵角が変化する場合

シミュレーション条件

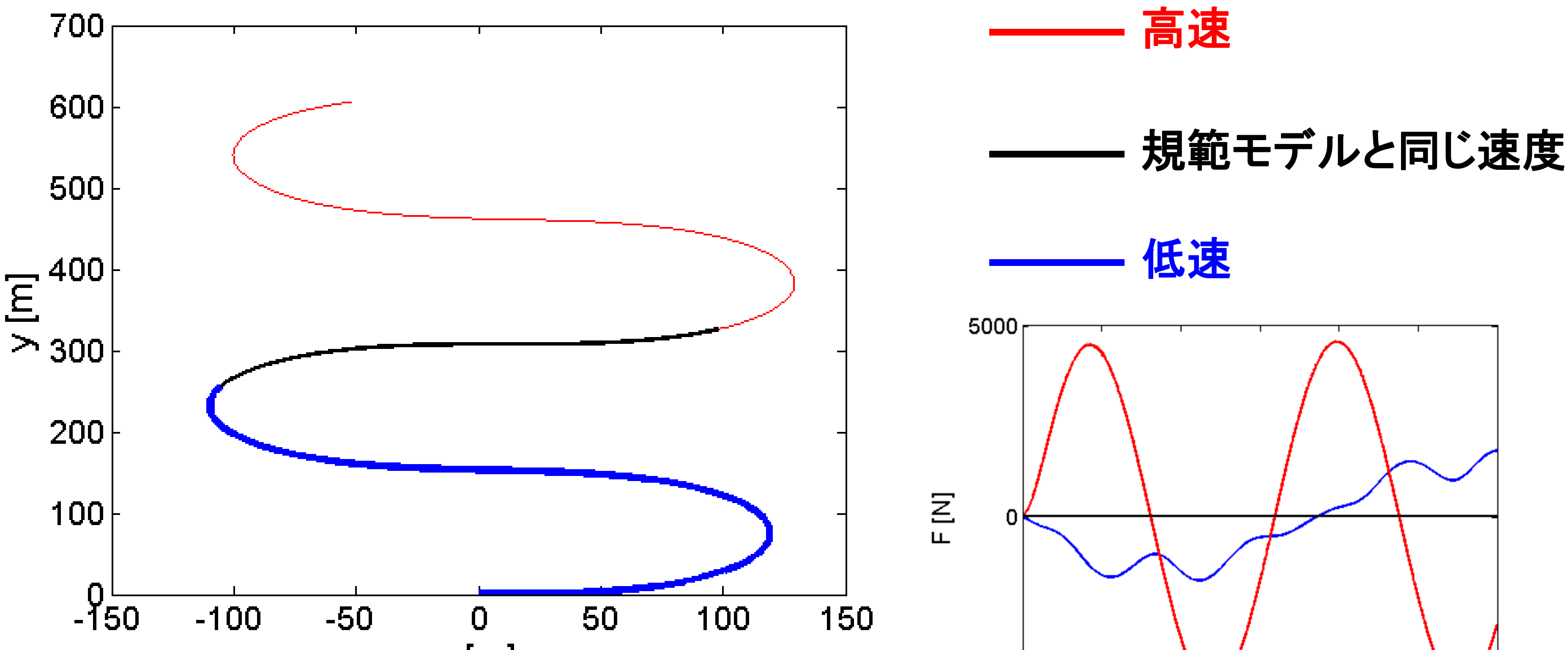
$\delta(s) = \sin(0.01s)$ ：操舵角が変化

３つの場合を比較

高速	$w(t) = 2$
規範モデルと同じ速度	$w(t) = 1.2$
低速	$w(t) = 0.8 + 0.2\sin(0.5t)$



2．操舵角が変化する場合



[問題1] 任意に与えられた$\delta(s), w(s)$に対し，次式を満足するfの制御則を求めよ

$$\lim_{s\to\infty} e(s) = 0 \qquad e = \kappa - \kappa_c$$

まとめ

本発表のまとめ

- 出力零化手法に基づいてニュートラルステア特性を実現するDYC制御手法の提案
- 数値例による有効性の検証

今後への展開

操舵特性の解析

別の操舵特性を実現する制御則への応用 (今後、発表予定)

他の制御対象への応用

航空機など複数のアクチュエータを持つ制御対象に対する効果的な制御アルゴリズムの設計法