

概要

昨今、自動運転の実現に向けて多くの技術開発が進んでいる。今回、熟練ドライバーの様な「うまい運転」を実現する自動運転の制御開発を見据えて、モデル予測制御(MPC)を用いた軌道生成の検討を行った。

熟練ドライバーは運転時には速度と操舵を同時に操作し、適切な速度と操舵により狙った位置に向けて車両を走行させている。今回は製品化に対応出来る現実的なアルゴリズムを構築すべく、操舵制御に特化したMPCによる目標走行軌跡生成の実現性、性能予測および設計手法を考察した。

具体的には、①目標軌跡を道路中央ラインでなく、道幅を有効活用したものをオンライン生成、②理想走行ラインからずれても、自然な操舵を行いスムーズに理想ラインに修正を狙った。

この狙いに対して、MPCを用いた時の実現性や性能の限界、課題を探り、自動運転に必要なカメラや地図に対する必要なSPECを考察する。

モデル予測制御を活用した「上手い運転」を実現する 自動運転制御開発

～ 熟練ドライバーのような判断をMPCで実現 ～

トヨタ自動車株式会社

東京技術開発センター

自動運転・先進安全開発部 自動運転PT

入江 喜朗

目次

1. 目的と方針
2. 従来の軌跡制御
3. MPC の定式化
4. システムハードウェア
5. 性能設計
6. シミュレーション活用方法
7. まとめ

1. 目的と方針

- **熟練ドライバーの”うまい運転”を自動運転車両で実現する**
 - 道路中心線を狙う走行でなく、道幅を有効活用した走行
 - 意図せずラインを外しても、違和感なくスムーズに元に戻す運転
- **その制御アルゴリズムとしてモデル予測制御(MPC)を検討**

2. 従来の軌道制御

2-1. 課題

- ヒトの感覚に合わず、違和感を感じる

現在の車両軌道制御は

車道の中央線を目標とした車両位置基準の追従制御



- 熟練ドライバーが運転する様に視点を遠くにおいた上手い運転
- 先読みと最適な操作を実現するアルゴリズムの採用

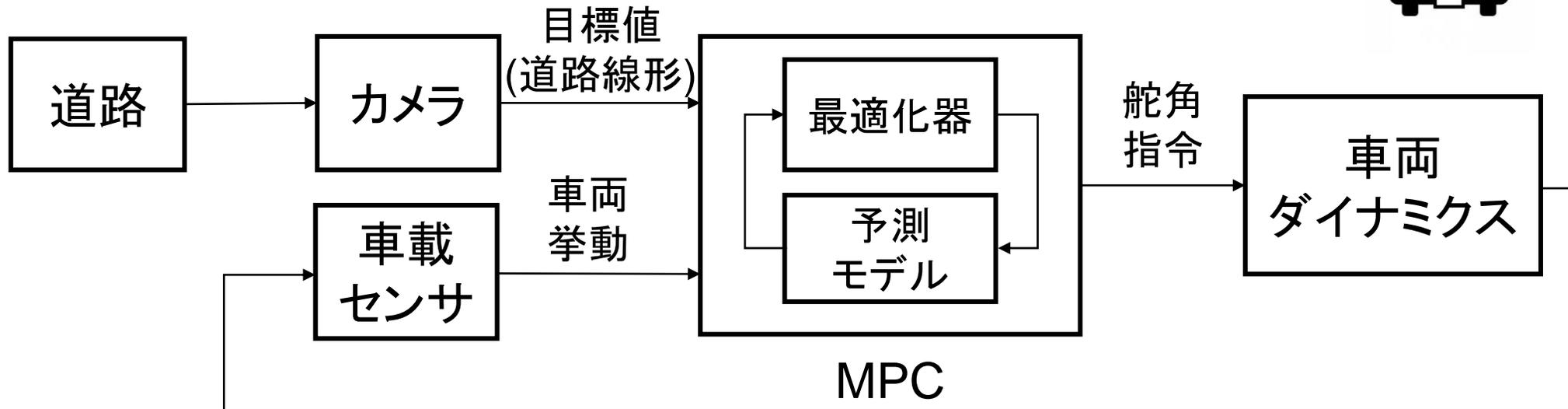
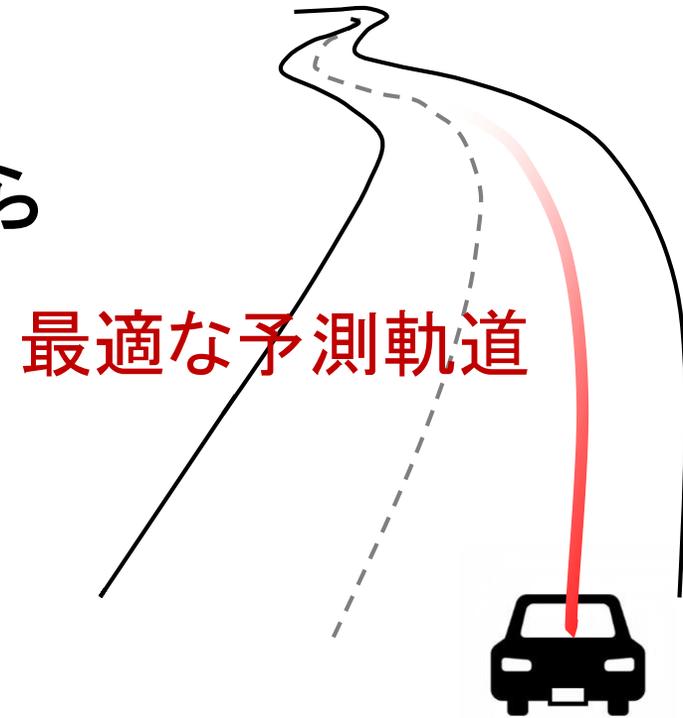
2-2. 課題への対応

- 熟練ドライバーの感覚に近い車両軌道を生成するアルゴリズムとしてモデル予測制御 (Model Predictive Control) を利用
 - LQR (Linear Quadratic Regulator: 線形最適制御)
 - フィードバック制御を最適化
 - MPC (Model Predictive Control)
 - フィードフォワード制御 (先読み、制約条件) とフィードバック制御を統合して最適化
 - フィードフォワード制御により自然な軌道制御を実現

3. MPCの定式化

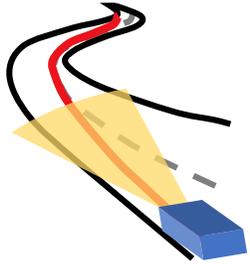
3-1. MPCとは

- モデルで車両の動きを「先読み」しながら「最適」な操作を決定
- 最適化問題を各制御周期で高速に解く



3-2. 軌道生成への適用

先読み区間



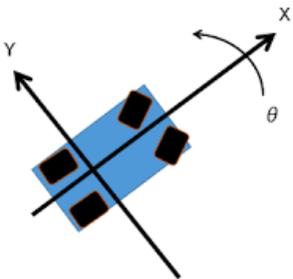
N 秒先の情報
(カメラより取得/演算)

「道路」の先読み



道路中心線情報
(カメラより取得/演算)

「動き」の先読み



車両ダイナミクスモデル
 $\dot{x}_e = A_e x_e + B_e u + G_e \dot{\theta}_{ref}$

上手い運転問題

min 評価関数(要求性能)

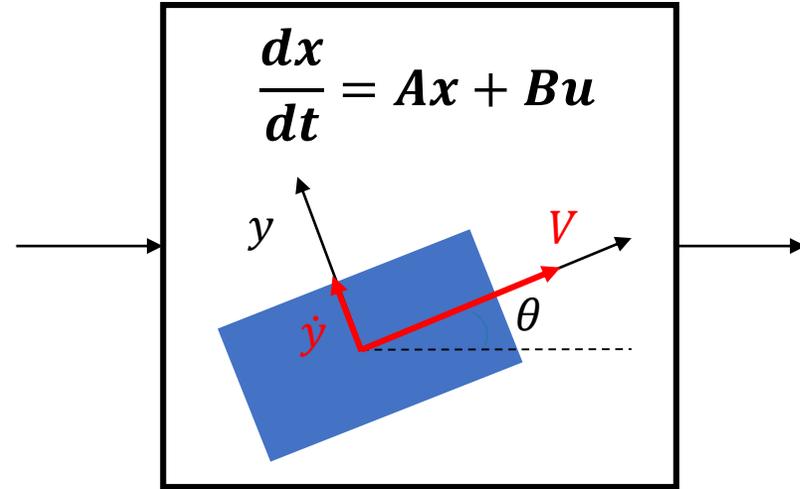
s.t. 制約条件(道路幅等)

最適化問題として定式化し
先読み区間で評価関数を最小化

3-3. 車両ダイナミクスモデル

シンプルな線形モデルを使用してMPCの有効性を検証

入力 u
 ・ 操舵角指令



状態量 x
 ・ ヨーレート
 ・ 方位角
 ・ 横方向速度
 ・ 横方向位置
 ・ 実操舵角

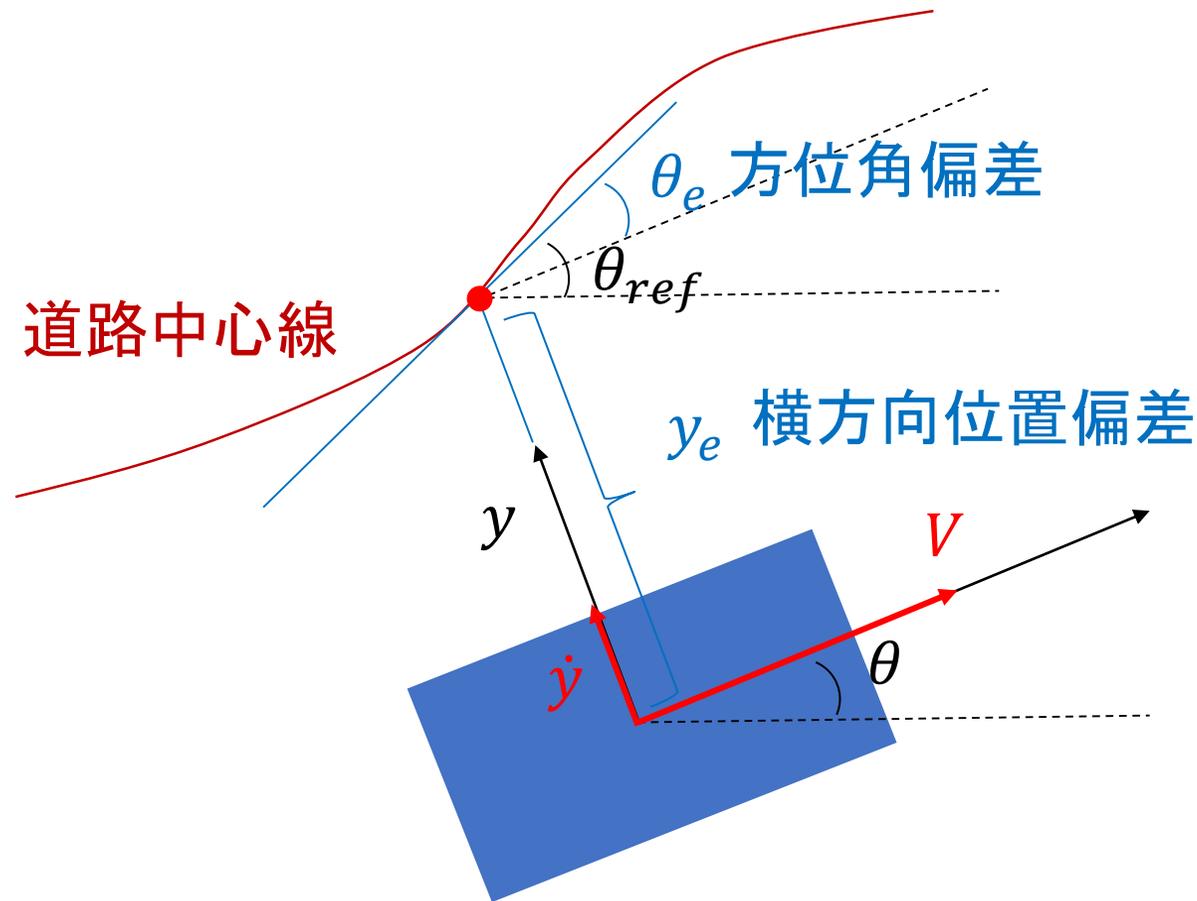
$$x = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \theta \\ \dot{y} \\ y \\ \delta \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \theta \\ \dot{y} \\ y \\ \delta \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{2l_f^2 C_f + 2l_r^2 C_r}{IV} & 0 & -\frac{2l_f C_f - 2l_r C_r}{IV} & 0 & \frac{2l_f C_f}{I} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2l_f C_f - 2l_r C_r}{mV} - V & 0 & -\frac{2C_f + 2C_r}{mV} & 0 & \frac{2C_f}{m} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -\frac{1}{T} \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \theta \\ \dot{y} \\ y \\ \delta \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T} \end{bmatrix}}_B u$$

l_f : 車両重心点と前車軸間距離
 l_r : 車両重心点と後車軸間距離
 C_f : 前輪コーナリングフォース
 C_r : 後輪コーナリングフォース
 I : ヨーイング慣性モーメント
 m : 車両慣性質量
 V : 車両走行速度

3-4. 予測モデルの前提

1. 演算簡素化のため、**予測区間で速度は一定** とする
2. センシングの実現性を考慮し、**道路中心線を基準とした偏差モデル** を使用
(ただし、道路中心線は目標ではない)



状態量 x_e

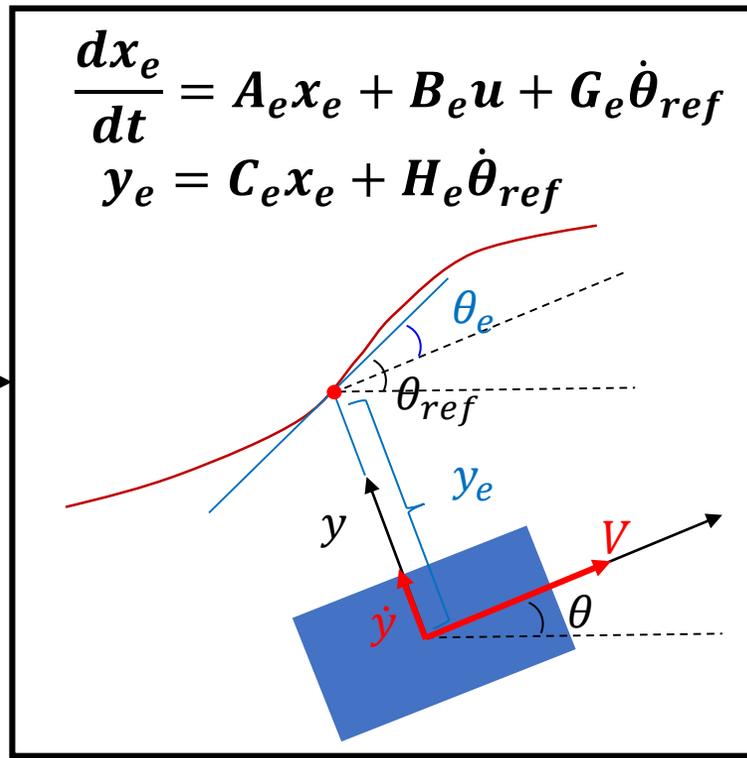
- ・ヨーレート偏差
- ・方位角偏差
- ・横方向速度偏差
- ・横方向位置偏差
- ・実操舵角
- ・ヨーレート偏差積分

$$x_e = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_e \\ \theta_e \\ \dot{y}_e \\ y_e \\ \delta \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} - \dot{\theta}_{ref} \\ \theta - \theta_{ref} \\ \dot{y} + V\theta_e \\ y - y_{ref} \\ \delta \\ z \end{bmatrix}$$

3-5. 予測モデル

入力

- ・ 操舵角指令 u
- ・ 先読み情報 $\dot{\theta}_{ref}$



$$\frac{dx_e}{dt} = A_e x_e + B_e u + G_e \dot{\theta}_{ref}$$

$$y_e = C_e x_e + H_e \dot{\theta}_{ref}$$

観測量 y_e

- ・ ヨーレイト偏差
- ・ 方位角偏差
- ・ 横方向速度偏差
- ・ 横方向位置偏差
- ・ 実操舵角
- ・ ヨーレイト偏差積分
- ・ ヨーレイト

$$y_e = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{6 \times 6} & \mathbf{0}_{6 \times 1} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{C_e} x_e + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{0}_{6 \times 1} \\ 1 \end{bmatrix}}_{H_e} \dot{\theta}_{ref}$$

$$\frac{dx_e}{dt} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{2l_f^2 C_f + 2l_r^2 C_r}{IV} & \frac{2l_f C_f - 2l_r C_r}{I} & -\frac{2l_f C_f - 2l_r C_r}{IV} & 0 & \frac{2l_f C_f}{I} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2l_f C_f - 2l_r C_r}{mV} & \frac{2C_f + 2C_r}{m} & -\frac{2C_f + 2C_r}{mV} & 0 & \frac{2C_f}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{A_e} x_e + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_e} u + \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{2l_f^2 C_f + 2l_r^2 C_r}{IV} \\ 0 \\ \frac{2l_f C_f - 2l_r C_r}{mV} - V \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{G_e} \dot{\theta}_{ref}$$

3-6. 最適化問題(QP問題)

- 先読み評価関数 J を最小化する操舵角指令を探索

評価関数

予測区間 (常に T_p 秒間先まで評価)

$$J = \int_t^{t+T_p} \{ q_1 \dot{\theta}_e^2 + q_2 \theta_e^2 + q_3 \dot{y}_e^2 + q_4 y_e^2 + q_5 \delta^2 + q_6 z^2 + q_7 \dot{\theta}^2 + r_1 \dot{u}^2 + r_2 u^2 \} d\tau$$

観測量
(状態量 + ヨーレート)

プラント入力
(操舵角指令)

重み: $Q = [q_1 \dots q_7]$
 $R = [r_1 \ r_2]$

制約条件

$$y_{min} \leq y_e \leq y_{max}$$

道路幅(中心線基準)

$$u_{min} \leq u \leq u_{max}$$

操舵角指令制限

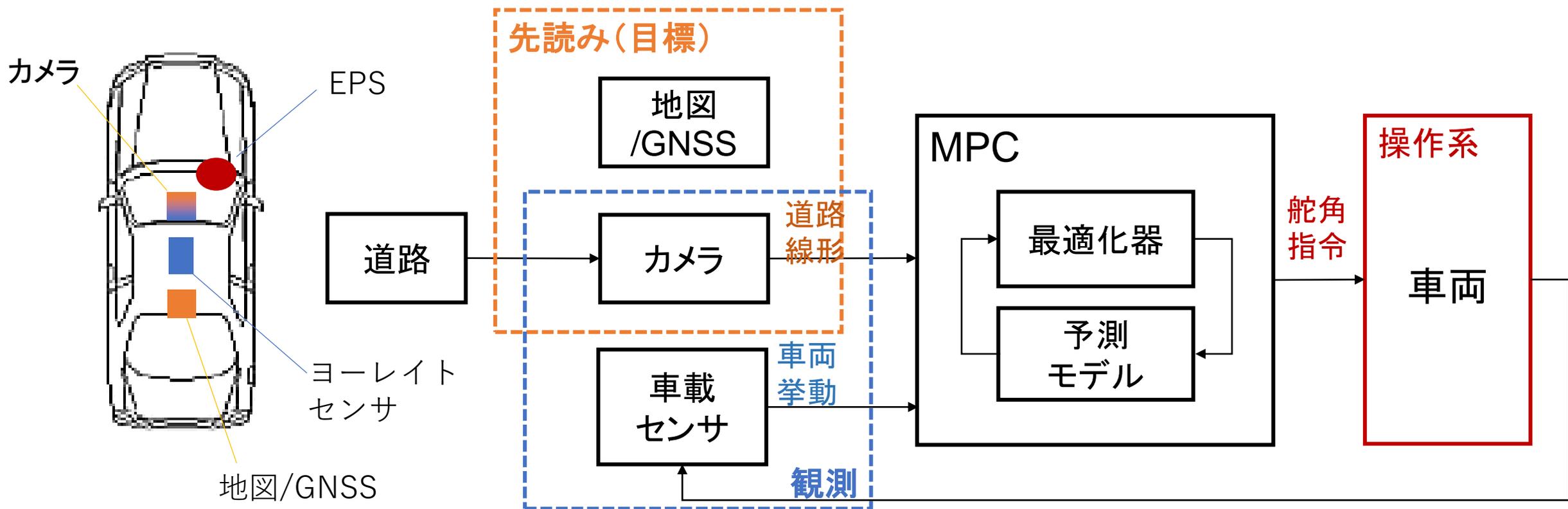
$$\dot{u}_{min} \leq \dot{u} \leq \dot{u}_{max}$$

操舵角指令変化率制限

4. システムハードウェア

4-1. 車載システム概要

- 先読み、瞬時観測、操作に関するデバイス



5. 性能設計

5-1. 方針

**熟練ドライバーの「うまい運転」を実現
そのために道幅内で最適軌道を生成**

1. ヨーレイト(横G)抑制

—横Gに代わり、平面走行で高い信頼度で計測できるヨーレイトを使用

2. 舵角変化率抑制

—スムーズな運転操作を模擬 + アクチュエータ動作制限

5-2. 評価関数の簡素化

予測区間
 $t+T_p$

$$J = \int_t^{t+T_p} \{q_1 \dot{\theta}_e^2 + q_2 \theta_e^2 + q_3 \dot{y}_e^2 + q_4 y_e^2 + q_5 \delta^2 + q_6 z^2 + q_7 \dot{\theta}^2 + r_1 \dot{u}^2 + r_2 u^2\} d\tau$$

ヨーレート偏差
ヨーレート
操舵指令変化率

車両挙動重視 (ヨー運動)	$\dot{\theta}_e$: ヨーレート偏差	旋回での道路中心線に寄せる効果
	θ_e : 方位角偏差	ヨーレートの変動を抑制する効果
	$\dot{\theta}$: ヨーレート絶対値	急激な車両挙動抑制する効果
車両位置重視 (横偏差運動)	\dot{y}_e : 横方向速度偏差	横方向の変動を抑制する効果(接線方向にまっすぐ走らせる)
	y_e : 横方向位置偏差	道路中心線の寄せる効果
スムーズ性	δ : 実操舵角	穏やかな車両挙動を実現する効果
外乱補正	z : ヨーレート偏差積分	外乱などを補正する効果
先読み区間	T_p : 予測区間	一演算で最適化する区間長

方位角検出や横速度は正確なセンシングが難しいため使用せず
横位置偏差は今回の趣旨に合わず除外、ヨーレート偏差で代用

5-3. 実用的な評価関数

- 方針に沿って評価関数を簡素化
基本パラメータをヨーレイト偏差、ヨーレイト、舵角変化率の3つに絞り込む

評価関数

$$J = \int_t^{t+T_p} \{ \omega_1 \dot{\theta}_e^2 + \omega_2 \theta^2 + r \dot{u}^2 \} d\tau$$

ヨーレイト偏差
(= 位置偏差@旋回中)

ヨーレイト
(= 横G@速度一定)

操舵角指令変化率

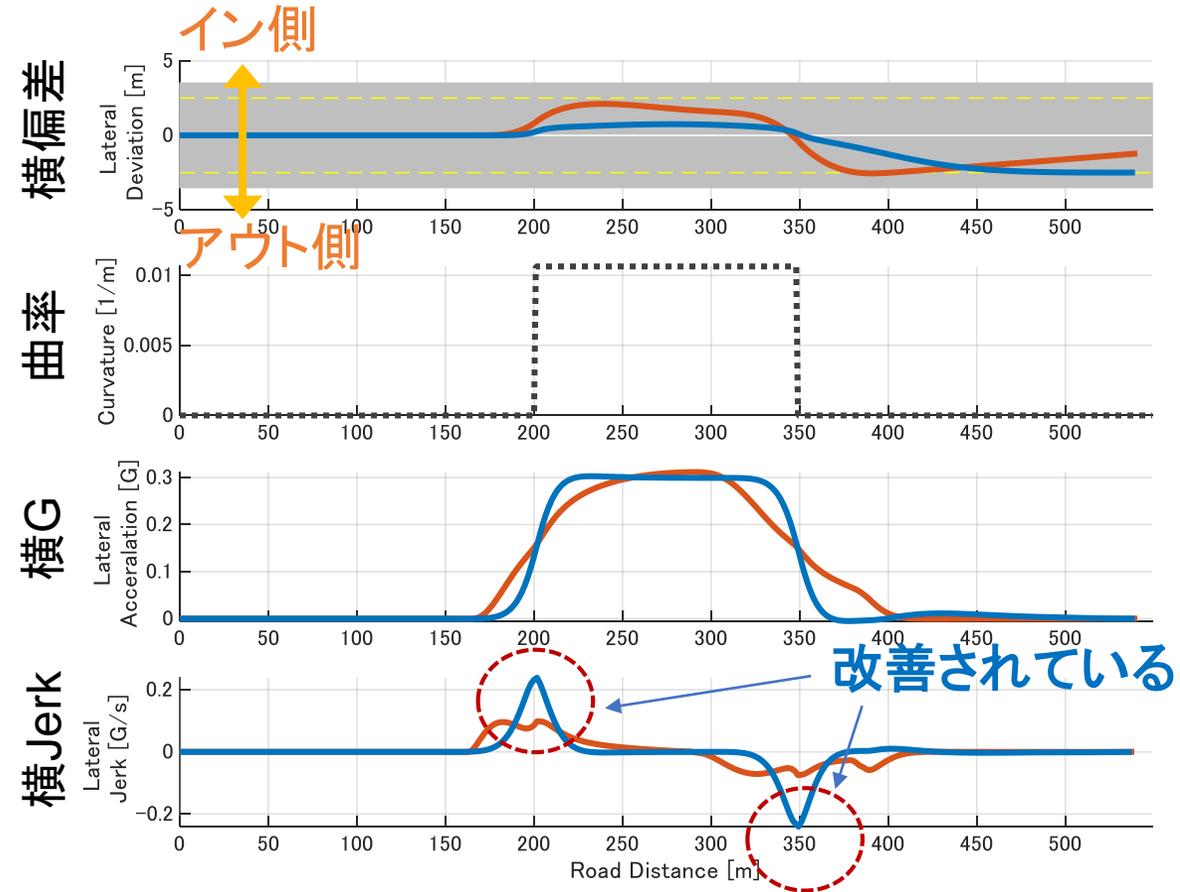
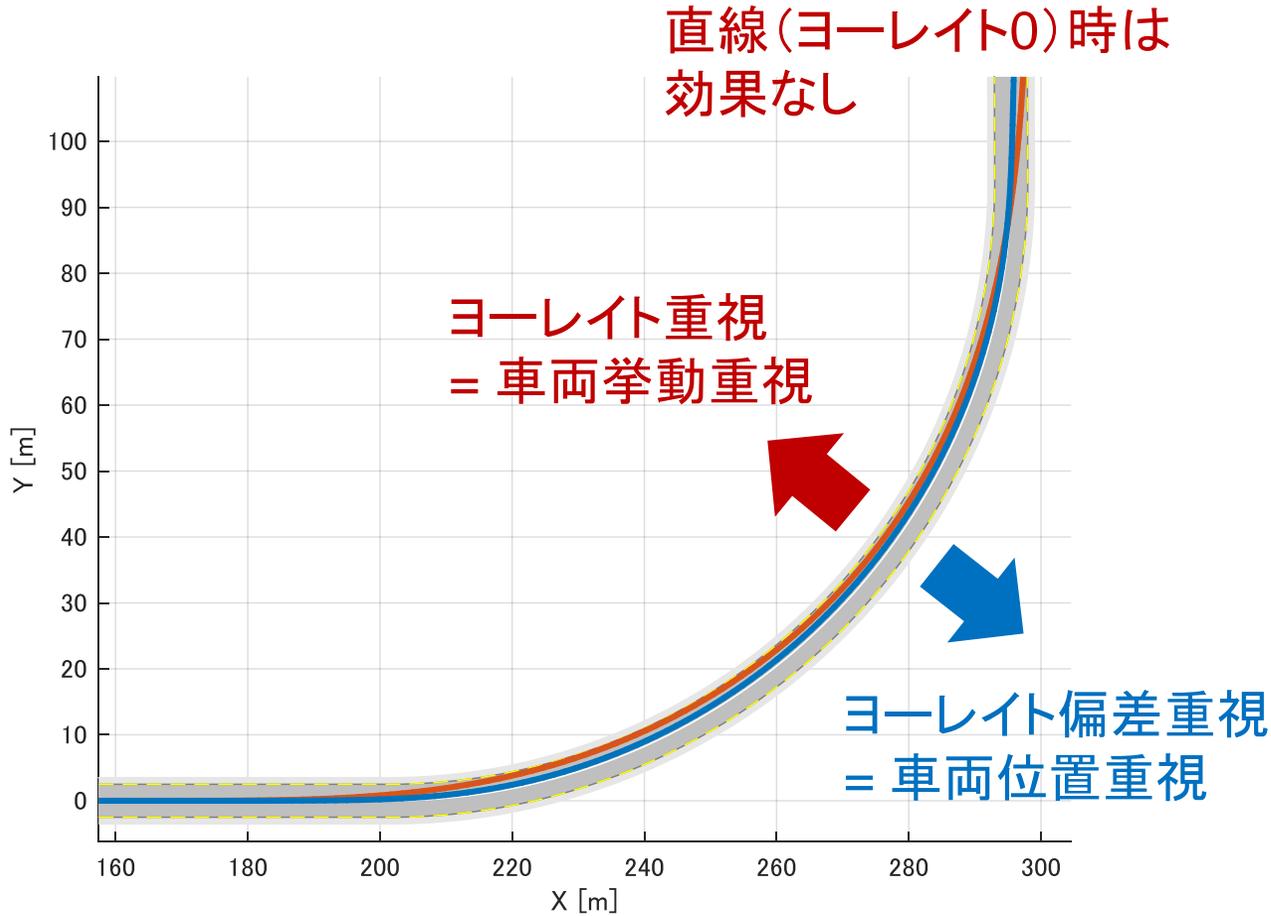
制約条件

$y_{emin} \leq y_e \leq y_{emax}$ 道路幅(中心線基準)

$\dot{u}_{min} \leq \dot{u} \leq \dot{u}_{max}$ 舵角指令変化率制限

5-4. 評価関数重みの考察

- ω_1 (ヨーレート偏差重み) と ω_2 (ヨーレート重み) の配分



ヨーレートの配分比を大きくすることで車両挙動重視軌道 を生成

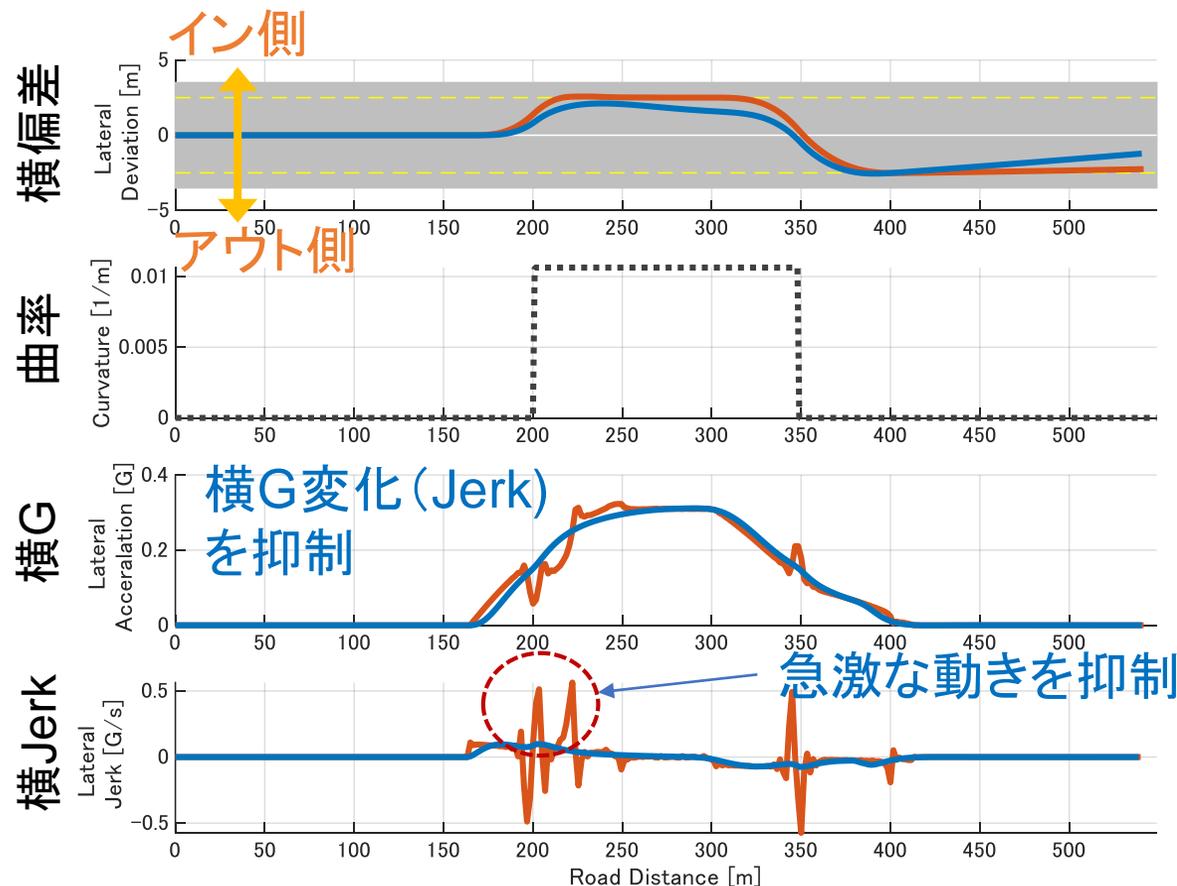
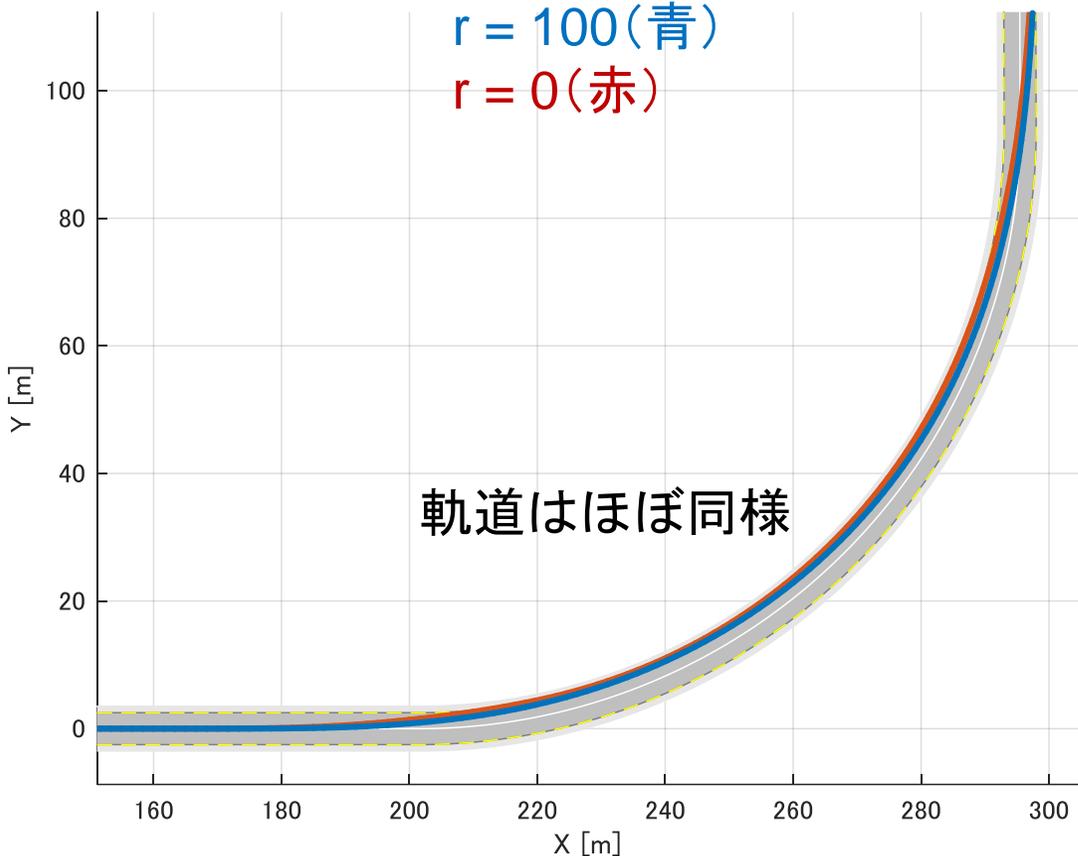
車速 = 60km/h
舵角指令変化率重み = 100
予測ホライズン = 35step
制御周期 = 0.1s

■ 入力舵角に対するスムーズ挙動実現のための重みの考察

舵角指令変化率重み

$r = 100$ (青)

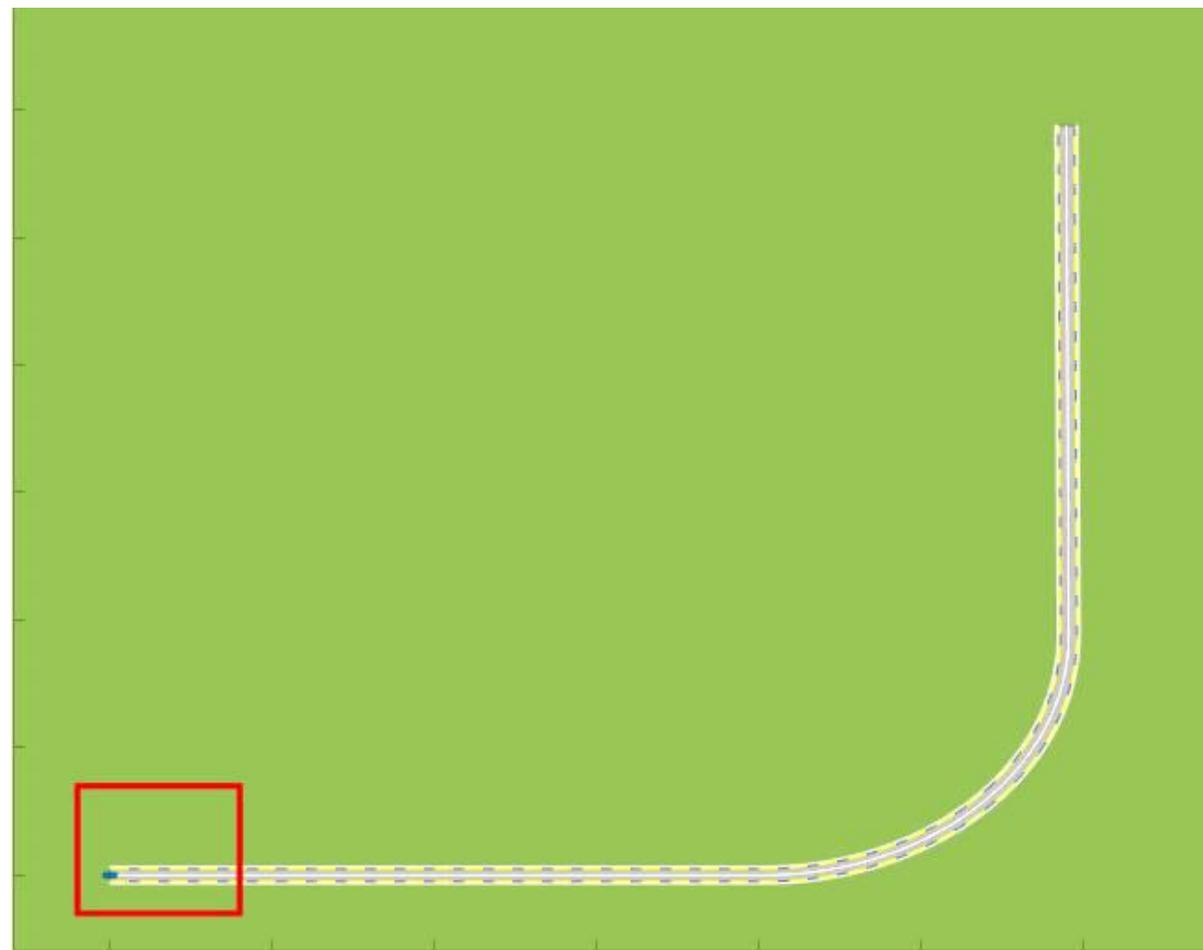
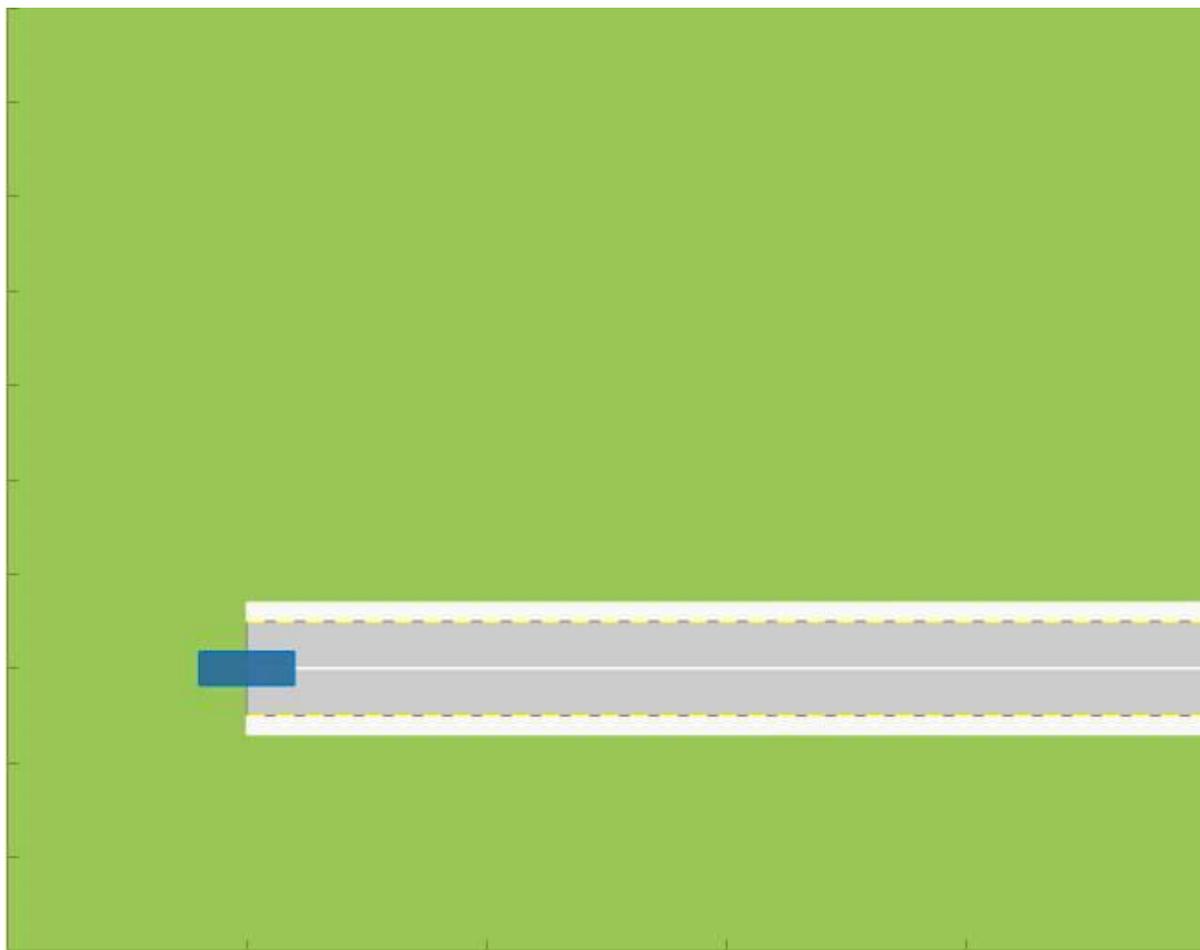
$r = 0$ (赤)



舵角指令変化率重みを用い、軌道を変えずに
急激な操舵を抑制 (Jerk低減) しスムーズな挙動を実現

車速 = 60km/h
ヨーレート偏差重み = 0
ヨーレート重み = 100
予測ホライズン = 35step
制御周期 = 0.1s

車両挙動重視 vs 車両位置重視



パラメータ重みの基本方針

- ヨーレートによる挙動重視で適切な目標軌道を生成
- 操舵微分値重みで操舵操作のスムーズ化

5-5. 予測区間の設定指針



前方距離	30m	80m	130m
SETP数	20	50	80

先読み



カメラ可視範囲
精度: 横:1m以下 縦:数m



地図活用範囲
精度: 数十m

人



運転時のヒトの視覚領域

道路形状



曲率変化
ほぼ無し



曲率変化
単調

曲率変化
複雑な場合も



最適化



直近しか認識出来ず
適切な軌跡生成不可

範囲が広く、所望箇所の最適化が困難



予測区間

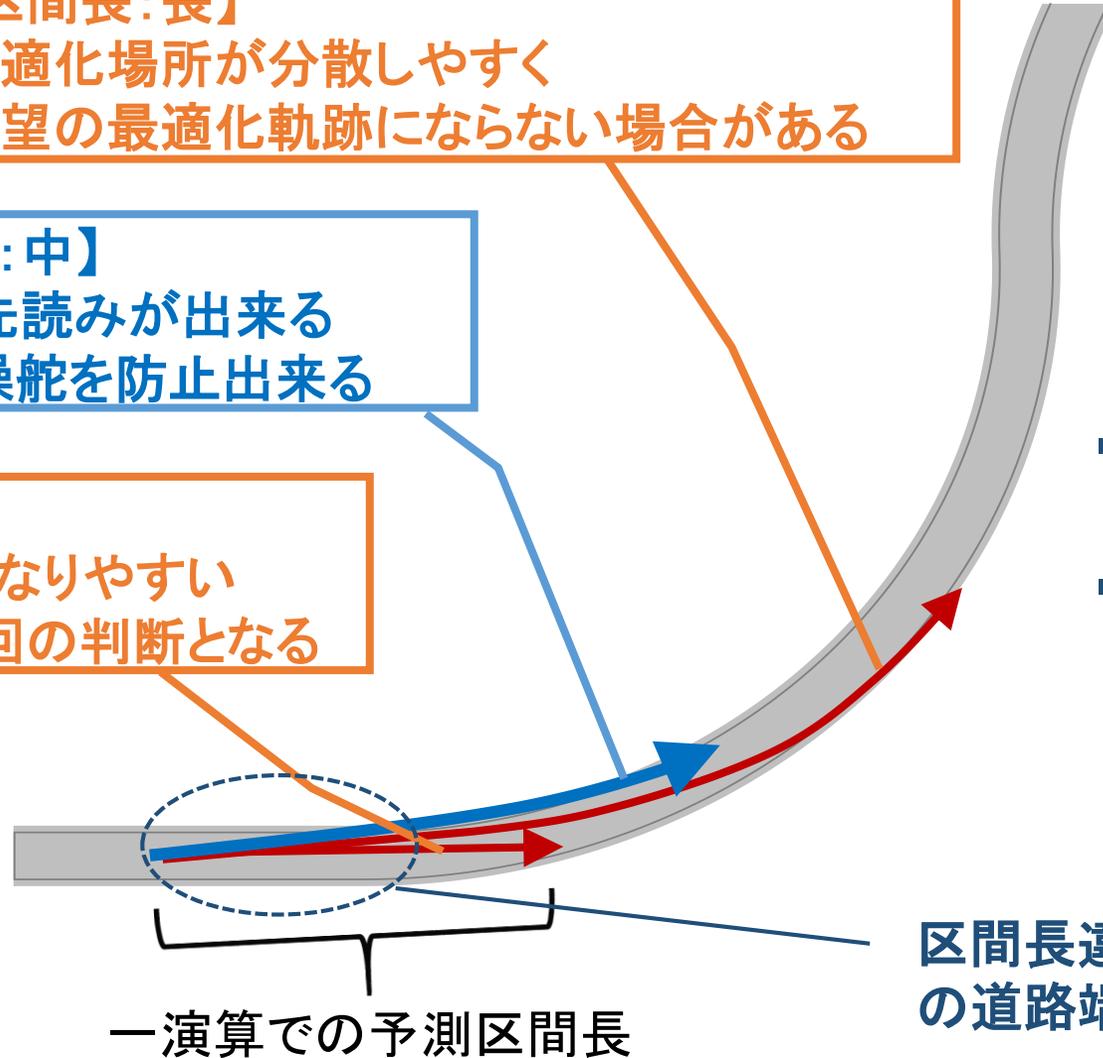
35~50 STEP 付近が妥当
(最大0.3G旋回の場合)

参考) 予測区間長を変化させた場合の定性的な説明

【区間長:長】
最適化場所が分散しやすく
所望の最適化軌跡にならない場合がある

【区間長:中】
直近の先読みが出来る
急激な操舵を防止出来る

【区間長:短】
予測区間が直線になりやすい
制約条件により旋回の判断となる



- システムが作動する速度域、曲率、および狙い性能と計算コストを考慮して設定
- 予測ステップ数設定:「コース進入時の一予測区間において最短コースが引ける」目安とすれば計算コストと性能がバランス

区間長違いにより、コーナー入口で、予測軌道の道路端に接するタイミングが変わる

5-6. 製品開発での予測区間設定目安

- 予測区間の設定は「システムの狙い」、「重み設定」等に大きく依存
- 生成軌道が制約条件（道路幅、道路線形）の影響を受けやすい

効率的開発の為に…



予測区間の設定指針を作ることが製品開発には有用

目安として…



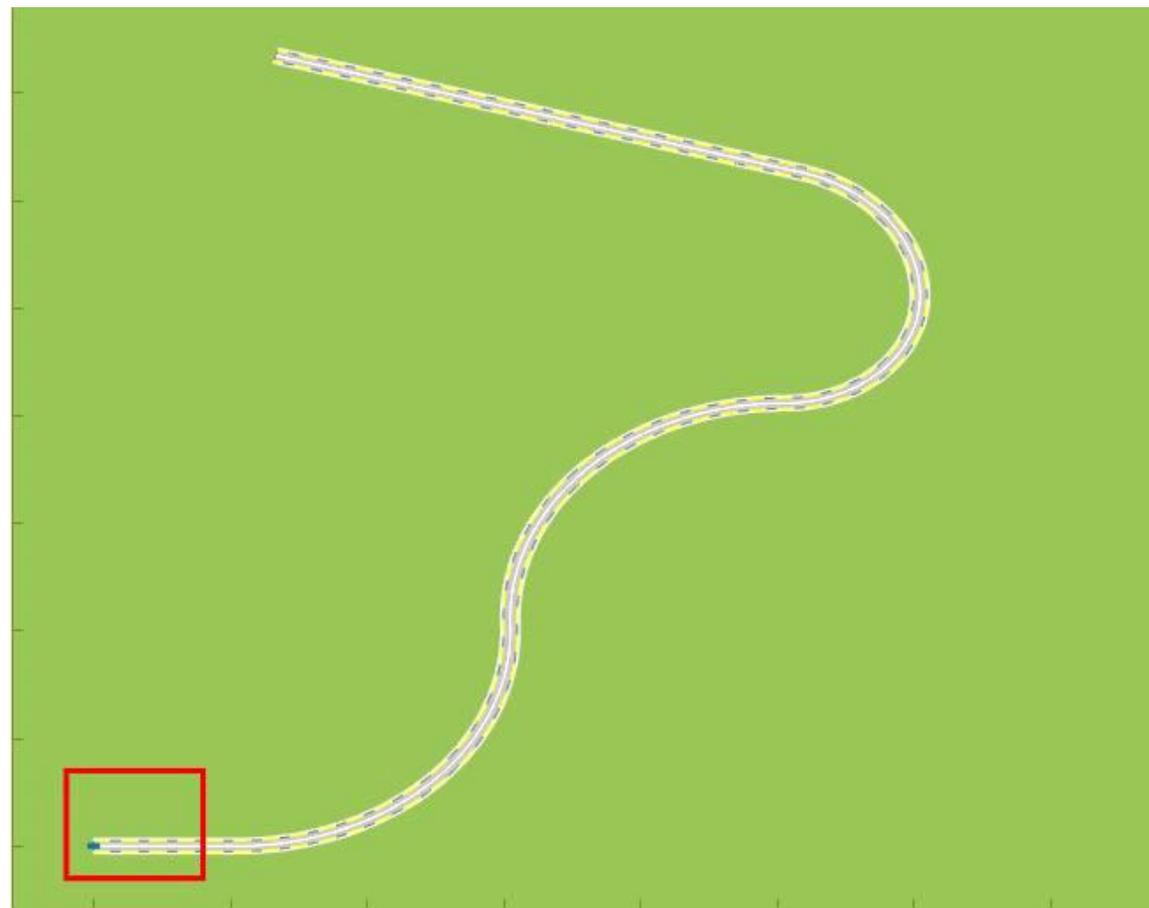
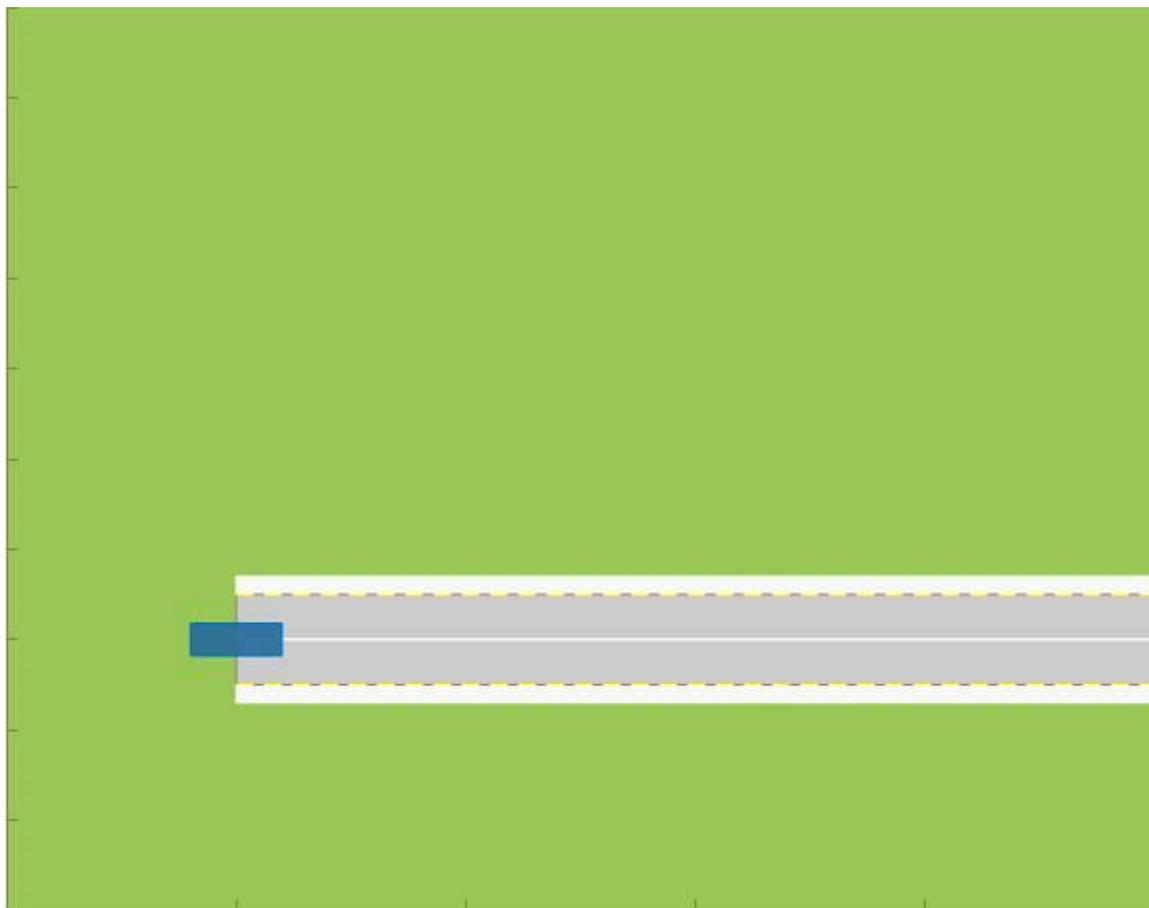
軌道選択として

- ・「自転車から可視範囲の内側道路端に接する」
 - ・「先に操舵し、徐々に戻す」
- とするのが一つの目安

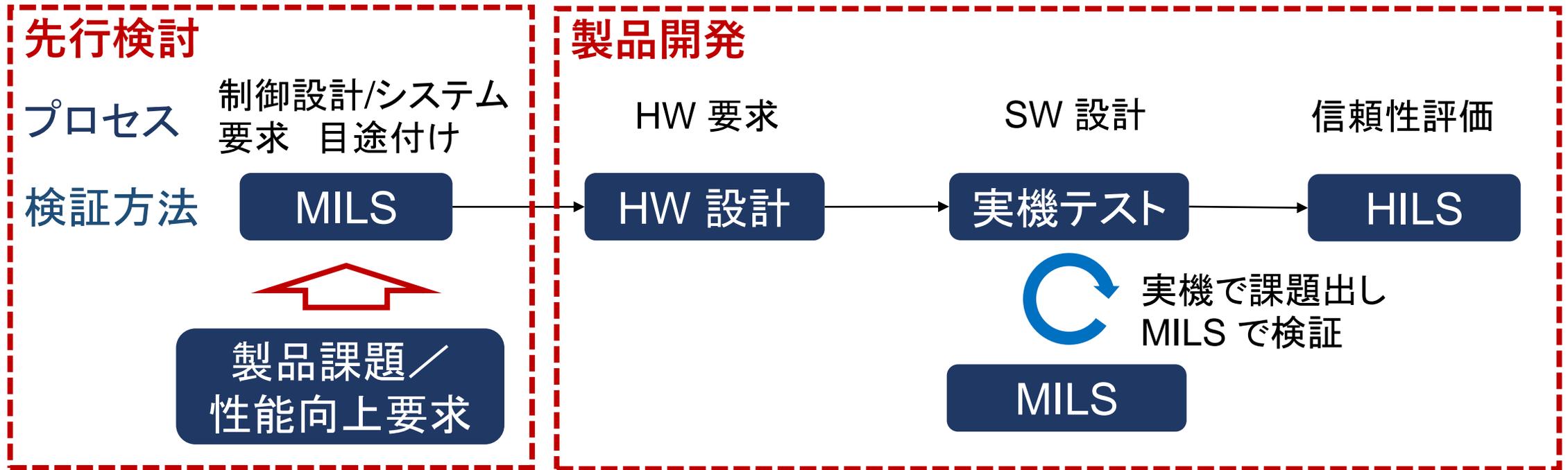
速度域、曲率、および狙い性能と計算コストを考え
「予測区間長=カメラの可視距離」が一つの目安



S字における 車両挙動重視 vs 車両位置重視



6-1. シミュレーション活用方法



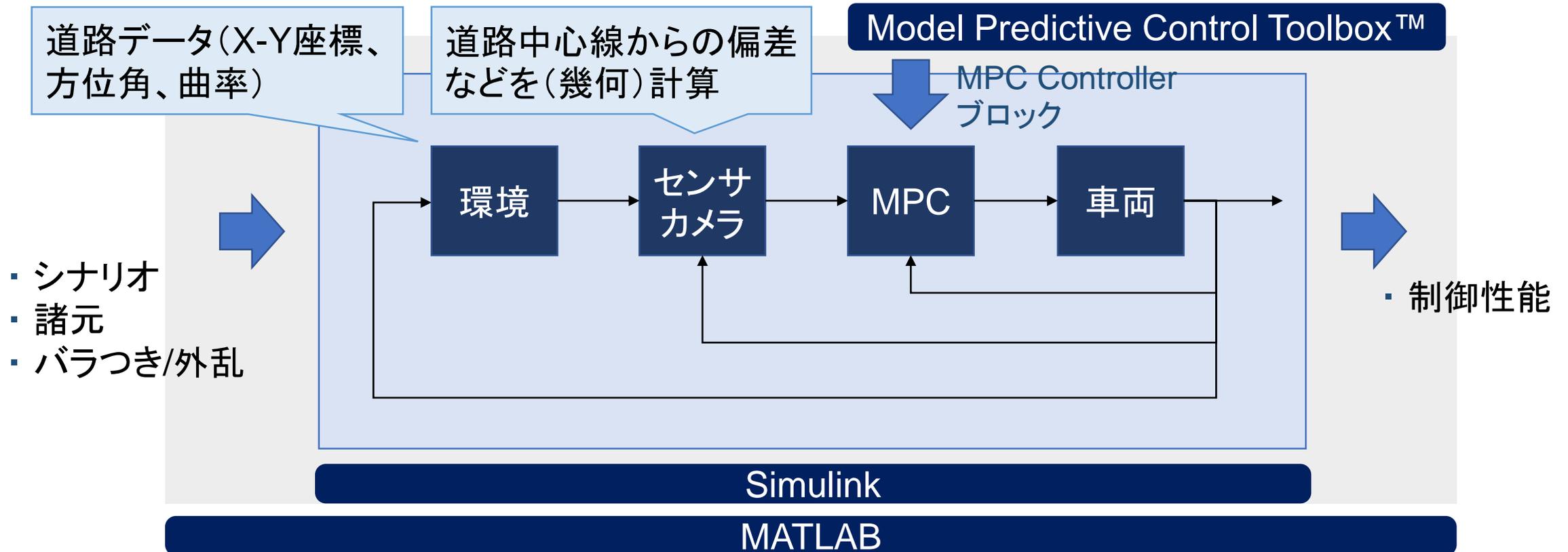
- 軌道生成における MPC の有効性検証
- 設計・適合の方針を定めることができた (= HW 要求仕様)

- 実機テスト前結果の要因ばらしによる解析
- 実機性能予測
- ロバスト性評価

設計・適合の基本方針の決定、実装に向けたシミュレーション活用に期待

6-2. シミュレーション環境(現在の環境)

- 抽象度の高いモデル化、迅速な検討が出来るシミュレーション環境を構築
 - MATLAB®/Simulink® による車両制御システムのモデル化とシミュレーション評価
 - MPC には Toolbox が提供する線形 MPC コントローラブロックを使用
- 目的達成の手段として MPC の可能性を検証



6-3. Model Predictive Control Toolbox の活用

スムーズに先行検討を実施

必要なパラメータ選定、その重みや予測区間の基本方針立案

- 必要機能が用意されており簡単に MPC をトライ
 - 最適化ソルバー(QP、非線形)
 - Simulink コントローラブロック
 - 簡易設計用 GUI アプリ
 - 自動 C コード生成

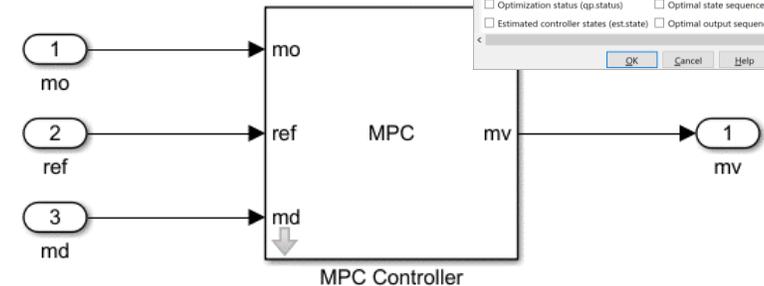
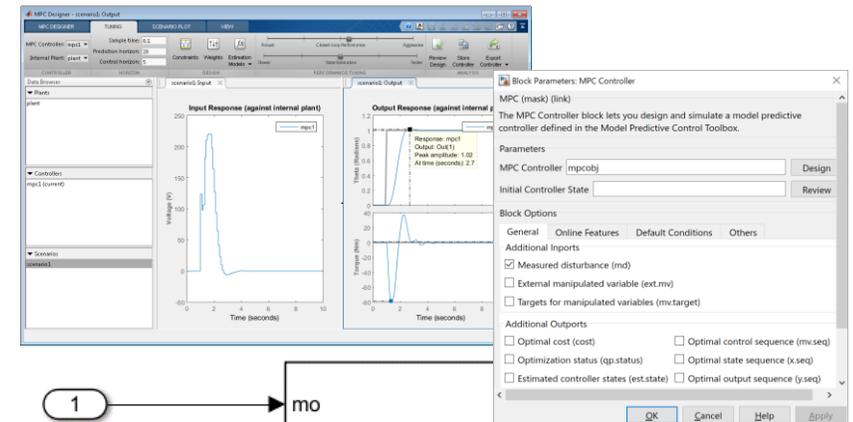
- モデル/パラスタによる仮説検証サイクルの高速化

MPC オブジェクト

- 予測モデル
- 予測区間
- 評価関数重み
- 制約上下限、など



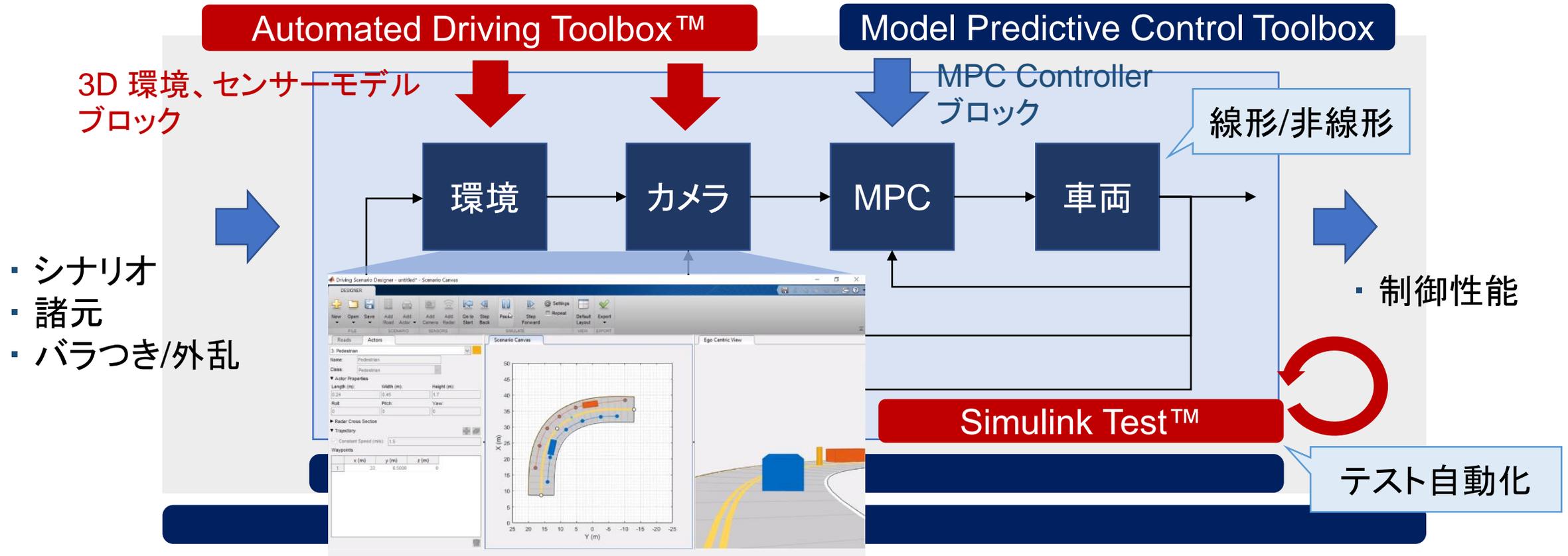
入力



MPC コントローラ

6-4 シミュレーション環境(今後の拡張)

- 簡易 3D 環境(道路・他車)、センサーモデルを導入し全行程自動化
- カメラ仕様検討/ロバスト性評価/課題検証などにフル活用



7. まとめ

- **熟練ドライバーの様な「上手い運転」を実現する自動運転の制御開発の検討**
 - MPCにより道幅を有効活用した目標軌道を生成
 - アフォーダブルな製品化を目指して実装可能なアルゴリズムの構築
- **操舵制御に特化したMPCによる目標走行軌道制御の設計・適合手法を提案**
 - 目標軌道を持たずに、道路幅の制約条件下で車両挙動を最適化(ヨーレイト最小化)
 - 予測区間と評価関数重みの現実的な決定方法を提案
- **MATLAB/Simulinkによるシミュレーションを活用した効率的開発環境構築**
 - 先行開発での迅速なMPCの実力検証
 - システムの構成ハードウェアの要求スペック／性能予測

最後に・・・

- **製品化に向けては、実装性、ロバスト性を考慮し、狙い、使われ方、車両特性等に応じた最適配分設計が必要**
 - MPCは先読み情報とリアルタイム解法が出来る為、シーン(道路形状)に応じた重み配分の動的可変等により、最適化が可能
 - 本設計提案は理想条件。製品化においては外乱やセンサばらつき等を考慮する必要があり、位置偏差項や積分項を活用し、シミュレーションで分析、実機で検証を繰り返して決定
 - 近年は非線形モデルに対する高速解法も多く提案されており、これらの活用を検討
- **道路環境に依存した評価関数の設計方法**
 - 「うまい運転」に対するパラメータ設計手法(提案)に対する理論的検証も有識者の力を借りて進めたい