

M20INO02 曲線座標系を用いた 自動運転制御アルゴリズムに関する研究

– コーナー, 対向車を想定した自転車追越し場面について –

Study of Autonomous Driving Control System using Curvilinear Coordinate
Overtaking Cyclists in Urban Road Scenario

機械システム工学専攻

井上小宮研究室

1984008 スキッティパッタナクン ワリット

Agenda

1. 背景・目的
2. 曲線座標系について
3. 自転車追越し判断アルゴリズムの構築
 - 3.1 地図データの基づく視野推定モデル
 - 3.2 追越しに関するパラメータの算出
4. 曲線座標系上での運動計画
 - 4.1 目標加速度の算出
 - 4.2 目標実舵角の算出
5. シミュレーション結果と考察
6. まとめと今後

1. 背景・目的

研究背景

- ・自転車追越しは自転車・対向車の認識や対応が重要(特に市町村道)
- ・安全な自転車追越しを行うには, 自転車と対向車の行動とコーナ等の死角における潜在リスクの総合的な状況を扱う自動運転アルゴリズムが必要



Source: ヒヤリハットデータベース(ID 268462), 東京農工大学

既存研究

1. 直交座標系上のリスクポテンシャルに基づく運動制御 (1)(2)

- ・障害物との衝突回避や道路逸脱リスクを最小にする経路選択のために、障害物と道路のリスクポテンシャルを定式化し車両位置を最適化する運転制御(図1).
- 直交座標系では、**コーナーを含む市町村道**で道路と障害物のリスクポテンシャルを**定義し難く**、**計算負荷が大きくなる**.

2. 自転車追越しアルゴリズムの研究 (3)

- ・自転車までのTTC, 対向車までのTTCを比較し追越しを判断.
- 直線路のみ**の研究. **前方コーナー未研究**(図2).

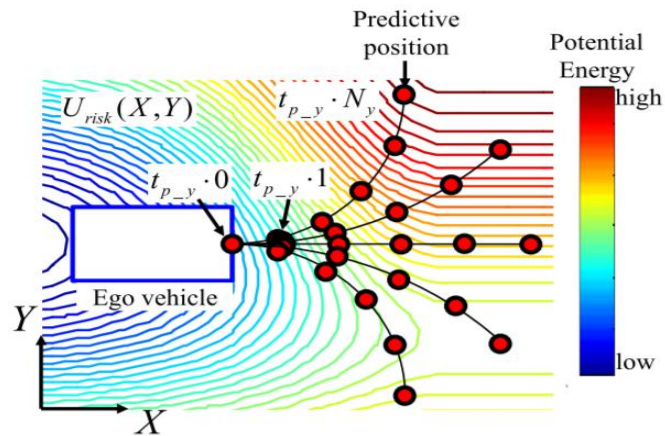


Fig. 1 Predictive position and Risk potential (1)

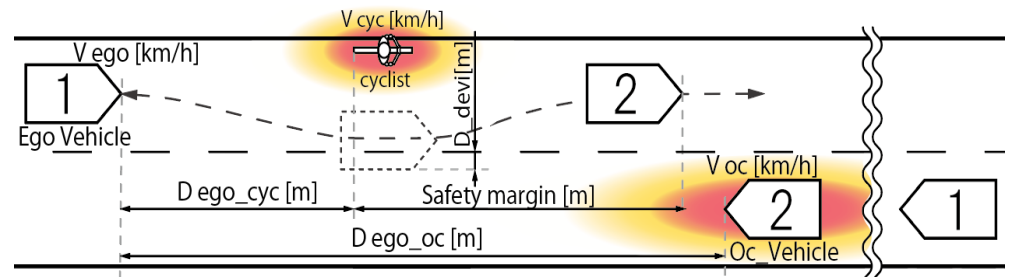


Fig. 2 Overtaking cyclists scenario in previous research (3)

研究目的

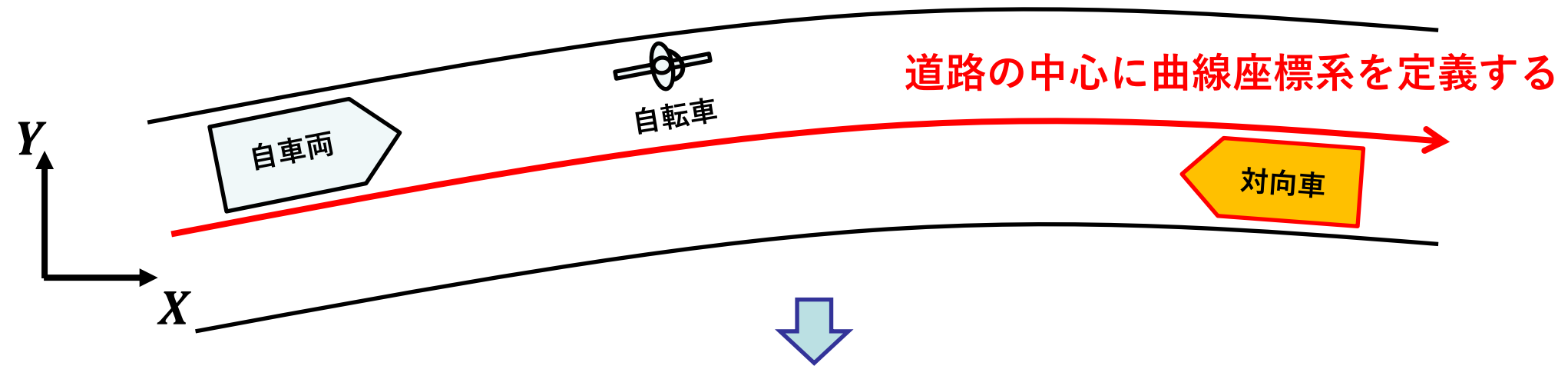
- ・本研究では, コーナーを含む市町村道におけるより実用的な自転車追越し判断アルゴリズム・軌跡生成の研究を目的する.

新規に考慮した点

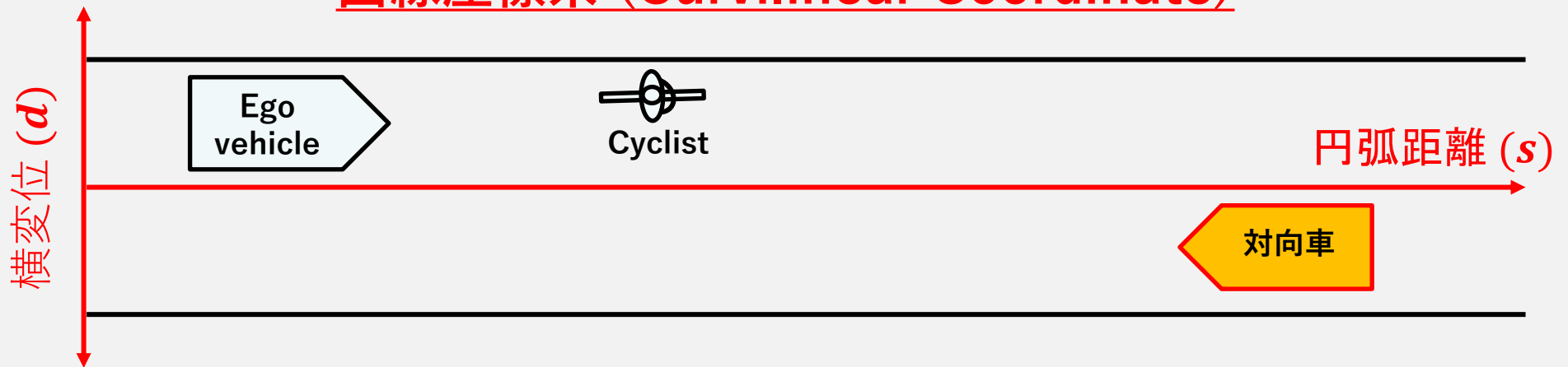
- ① シーン(シナリオ): **コーナー**を含む市町村道における前方
自転車追越しシーン(対向車と自転車を想定)
- ② 地図データ: 高精細3D地図 → NAVI based **廉価地図**情報使用を想定
- ③ **曲線座標系(Curvilinear Coordinate)**における自転車追越しアルゴリズム
- ④ 地図データによるコーナー**視野推定モデル**を定義
- ⑤ **Red zone概念**と**安全余裕パラメータ**の導入

2. 曲線座標系について

直交座標系 (Cartesian Coordinate)



曲線座標系 (Curvilinear Coordinate)



✓ 道路、障害物などを表現しやすい ✓ システム設計を簡易化する

曲線座標系上の運動方程式

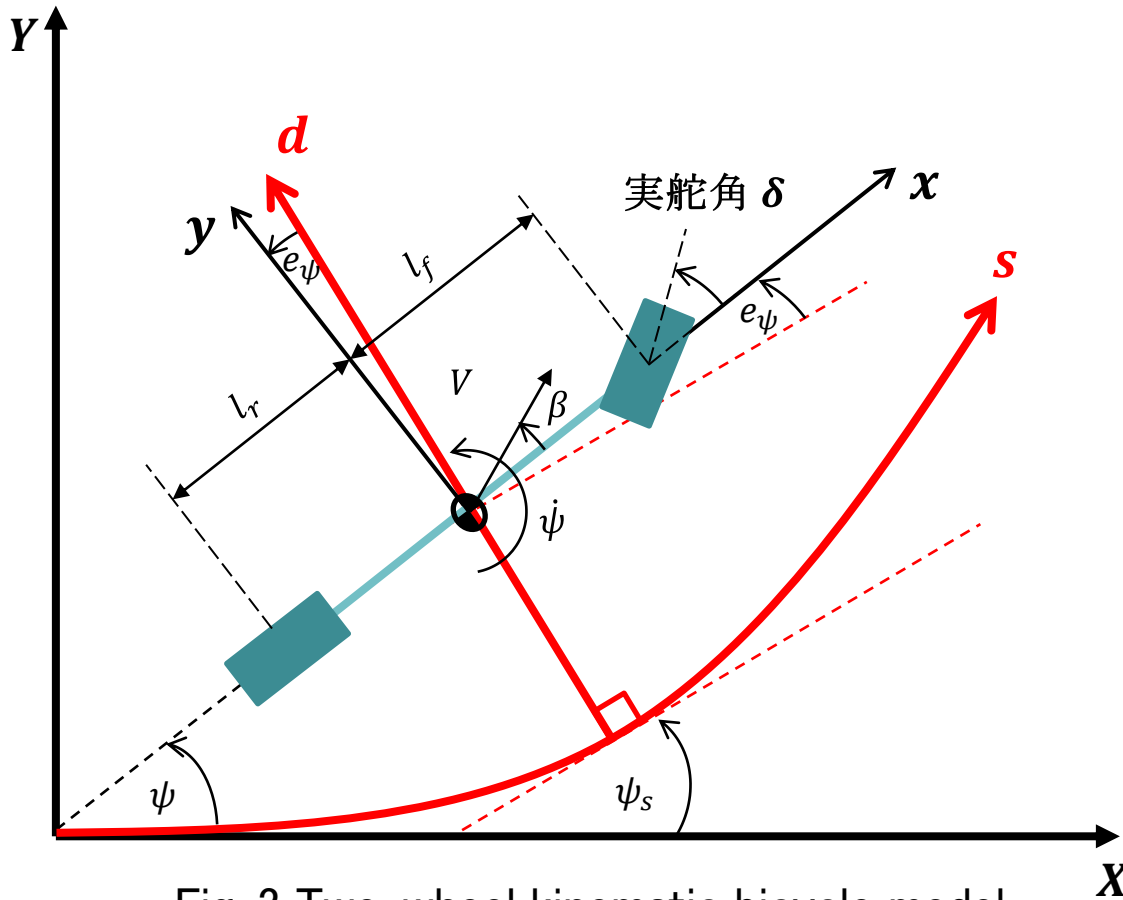


Fig. 3 Two-wheel kinematic bicycle model

速度

$$\dot{s} = \frac{V}{1-\kappa d} \cdot \cos(e_\psi + \beta) \quad (1)$$

$$\dot{d} = V \cdot \sin(e_\psi + \beta) \quad (2)$$

ヨーレート

$$\dot{\psi} = \frac{V}{l_r} \sin(\beta) \quad (3)$$

進行方向の差(s-軸から)

$$e_\psi = \psi - \psi_s \quad (4)$$

加速度

$$\dot{V} = a \quad (5)$$

横滑り角

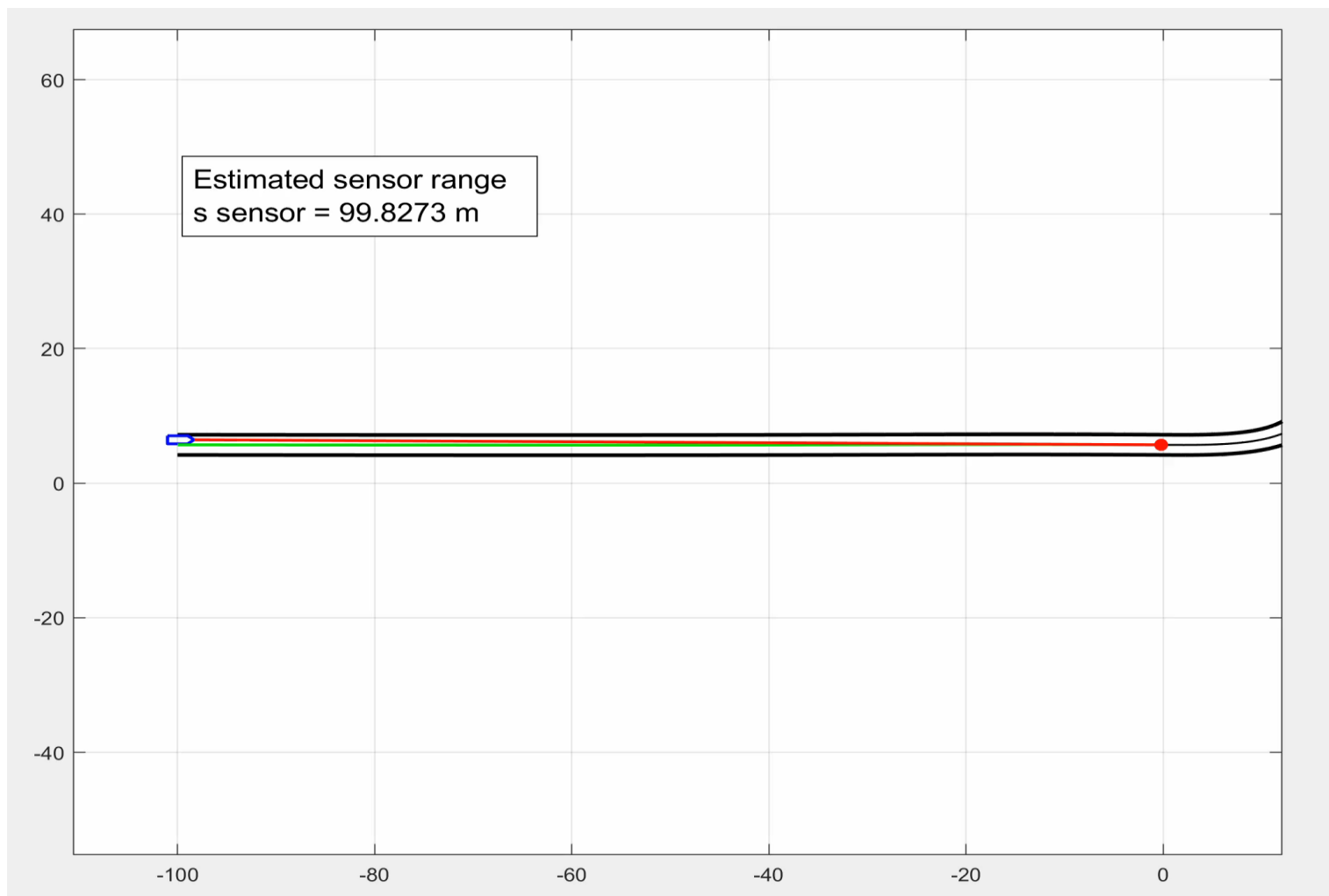
$$\beta = \arctan \left[\frac{l_r}{l_f + l_r} \tan(\delta) \right] \quad (6)$$

3. 行動判断アルゴリズム

3.1 視野推定モデル

3.2 行動判断パラメタ一の算出

視野推定モデル: 認識系の視野 s_{sight} の算出



自転車のみを考慮する追越しの予測

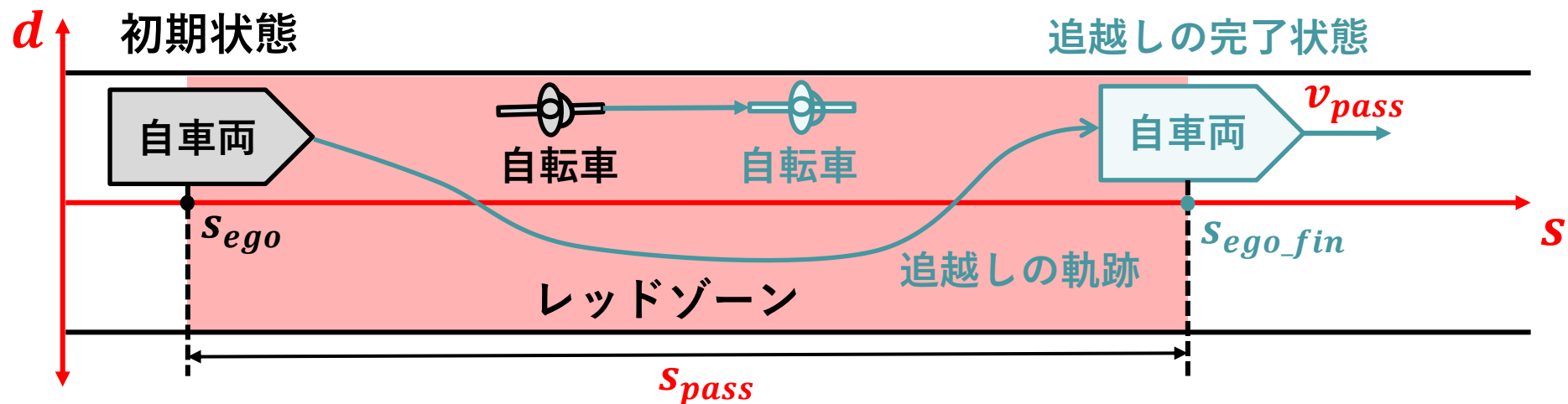


Fig. 4 Overtake prediction by considering only cyclist

図5のように自転車のみを考慮する追越しを予測することで、追越しの軌跡と完了状態を算出する。それから、自車の位置から追越し完了の位置 s_{ego_fin} までを「レッドゾーン(Red zone)」とする。

最後に、以下のパラメターを定義する。

1. 追越しでかかる距離 s_{pass}
2. 追越し完了の最終速度 v_{pass}
3. 追越しでかかる時間 t_{pass}

対向車の到達する時間の算出

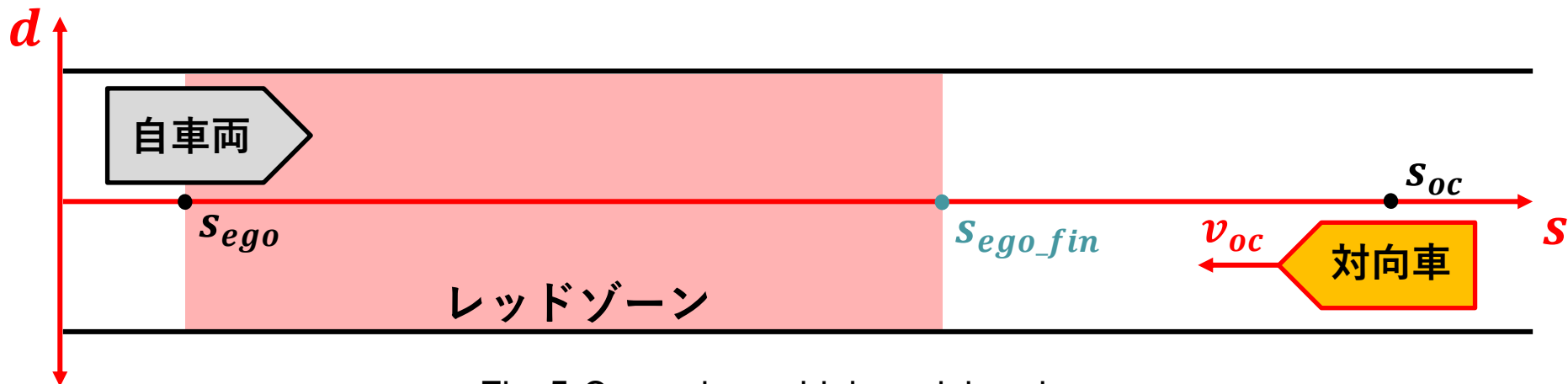


Fig. 5 Oncoming vehicle arriving time

対向車がレッドゾーンに到達する時間を式(9)で算出する.

$$t_{oc} = \frac{s_{oc} - s_{ego_fin}}{v_{oc}} = \frac{s_{oc} - (s_{ego} - s_{pass})}{v_{oc}} \quad (7)$$

安全余裕パラメター

追越しの距離の確認

$$S_{sight} > S_{pass} + S_m \quad (8)$$

余裕距離

$$S_m = k_s \times \bar{v} \times t_{pass}, \quad (9)$$

\bar{v} 周辺にある車両の平均速度

k_s 余裕距離の係数

追越しの時間の確認

$$t_{pass} < t_{oc} - \tau \quad (10)$$

余裕時間

$$\tau = k_t \times \frac{l_{ego}}{v_{pass} + v_{oc}}, \quad (11)$$

k_t 余裕時間の係数

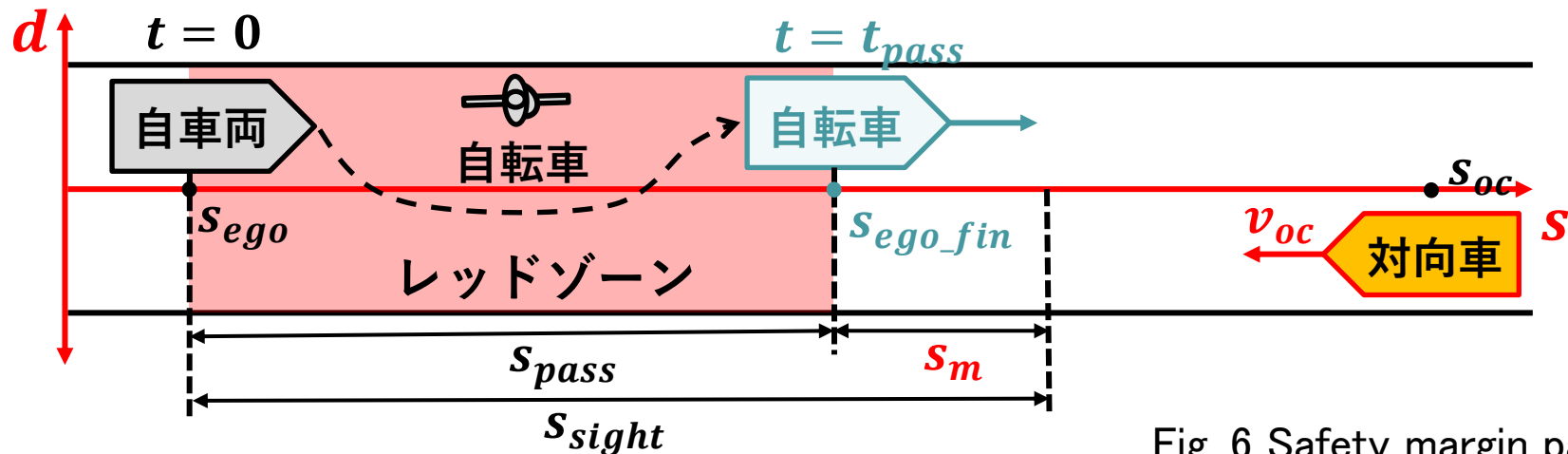


Fig. 6 Safety margin parameters

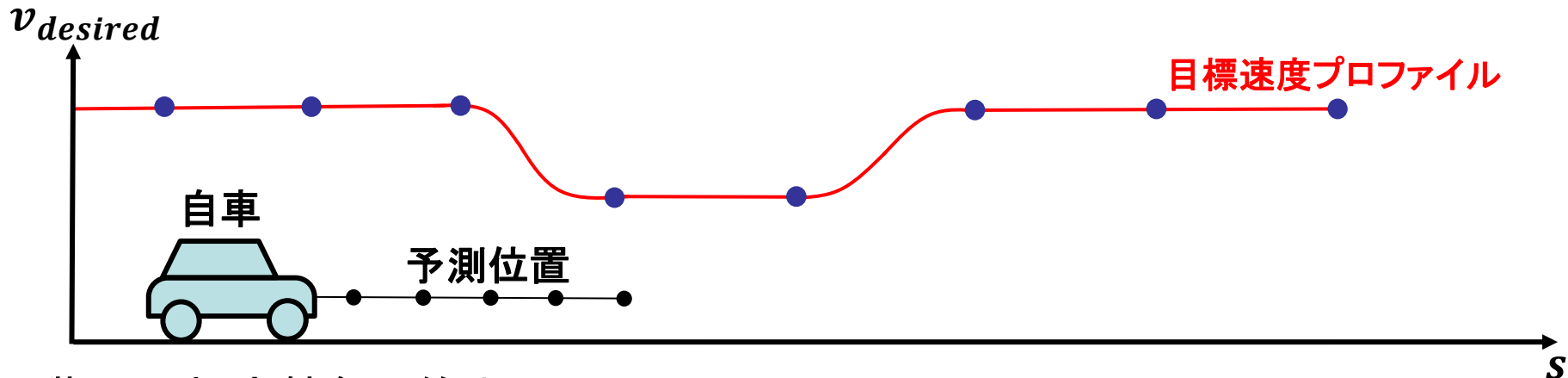
4. 曲線座標系上の運動計画

4.1 目標加速度の算出

4.2 目標実舵角の算出

曲線座標系上の運動計画

段階1 目標加速度の算出



段階2 目標実舵角の算出

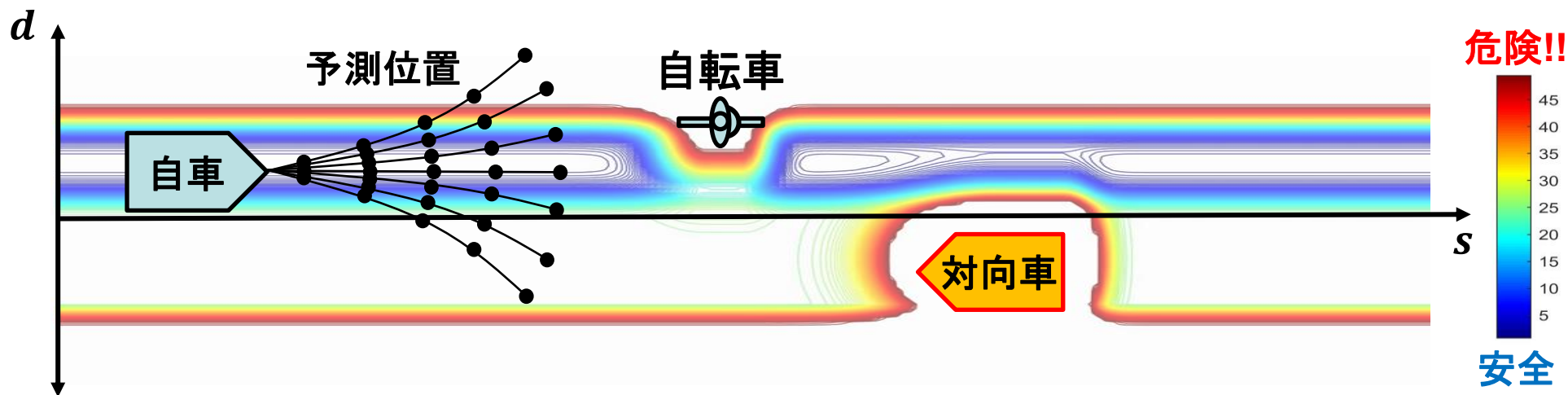


Fig. 7 Curvilinear coordinate based motion planning

目標速度プロファイルの作成: 目標速度の設定

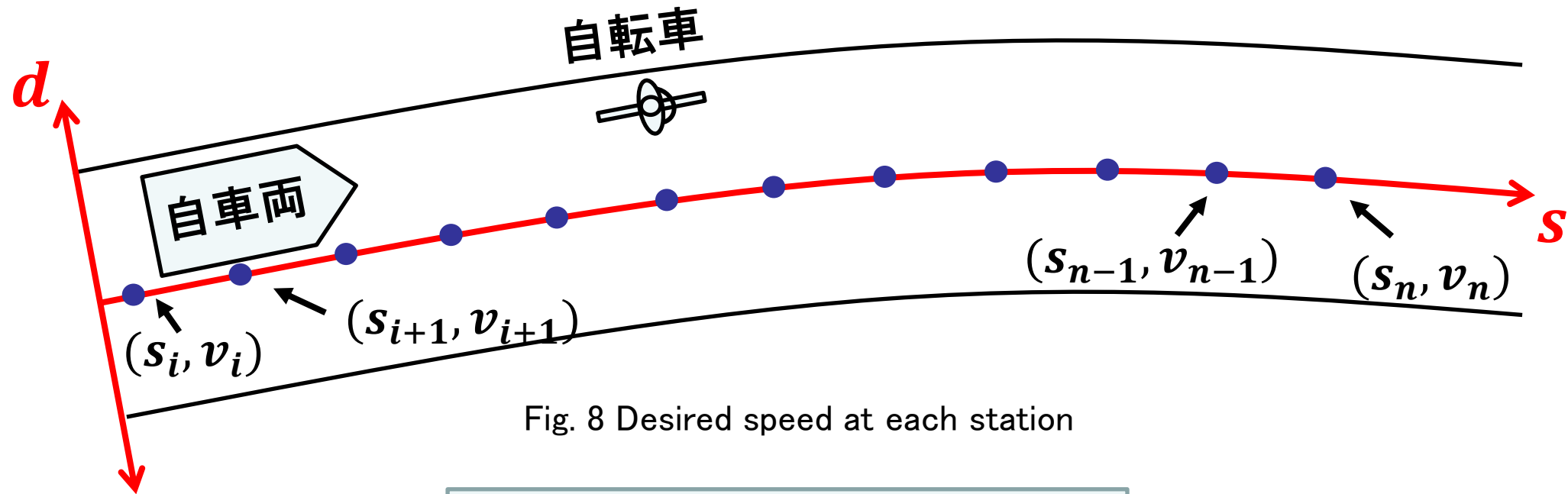


Fig. 8 Desired speed at each station

● Station

s-軸の上に目標速度が決定された点

目標速度プロファイルの作成: 連続化

多項式補間での連続化

$$v_{desired}(s) = a_i + b_i s + c_i s^2 + d_i s^3 \quad (12)$$

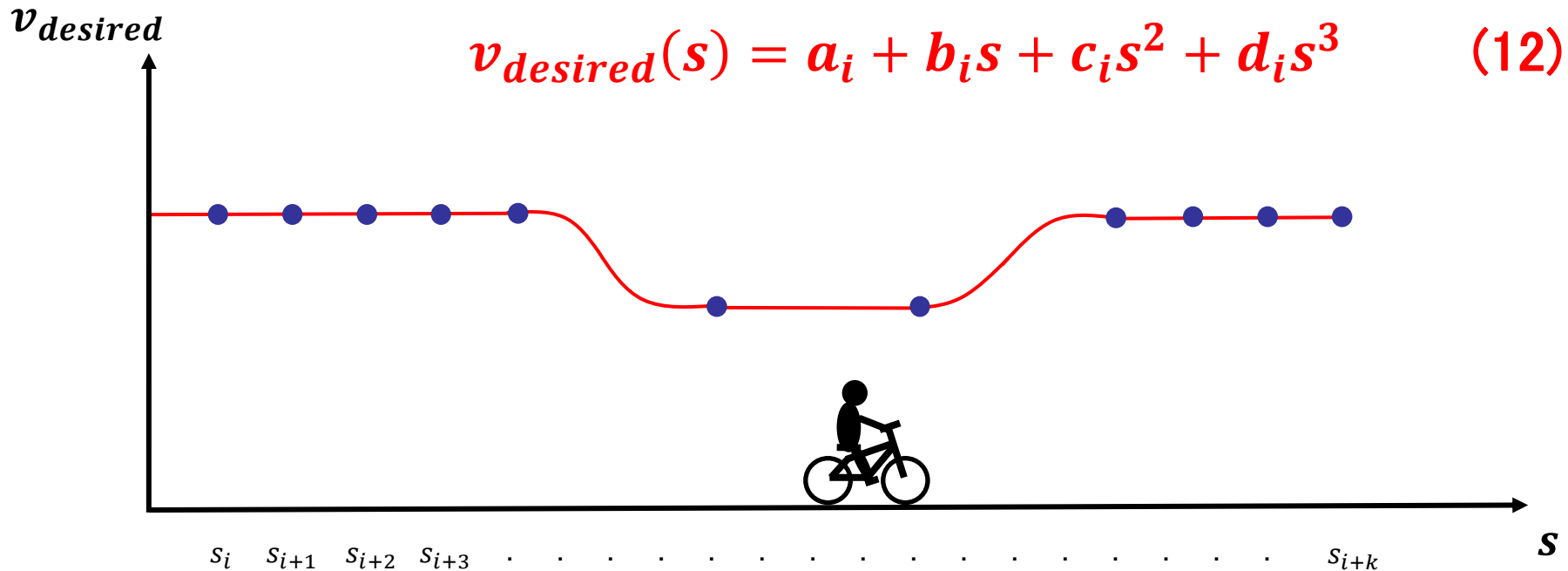


Fig. 11 Desired speed profile

曲線座標系における前後運動予測

前提条件

横運動がないと仮定して予測する

状態の予測

s-軸

$$s_p(i+1) = s_p(i) + V(i) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot a_p \cdot \Delta t^2 \quad (13)$$

車速度

$$V(i+1) = V(i) + a_p \cdot \Delta t \quad (14)$$

予測時間

$$t(i+1) = t(i) + \Delta t \quad (15)$$

$$T = \Delta t \times N \quad (16)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (17)$$

目標加速度の候補

$$a_{p_min} < a_p < a_{p_max} \quad (18)$$

$$\text{拘束 } |\dot{a}_p| \leq \dot{a}_{p_max} \quad (19)$$

評価関数

$$J_{vel}(s) = \sum_{i=1}^N \left[\left| V(i) - v_{desired}(s_p(i)) \right| \right] \quad (20)$$

目標速度 $v_{desired}$ を式(12)から算出する

評価関数が最小となる目標加速度を算出

$$a_{desired} = \text{minimize } \{J_{vel}(s)\} \quad (21)$$

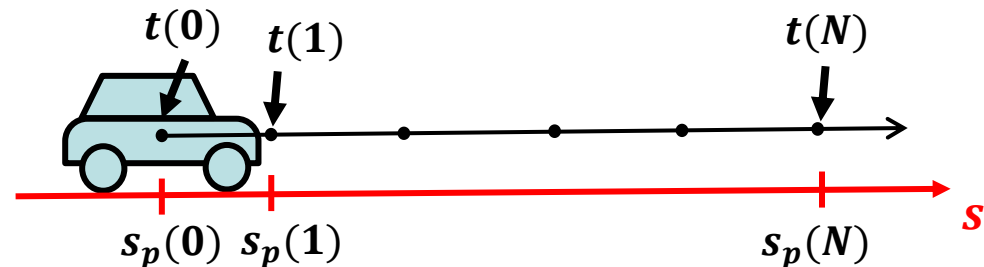
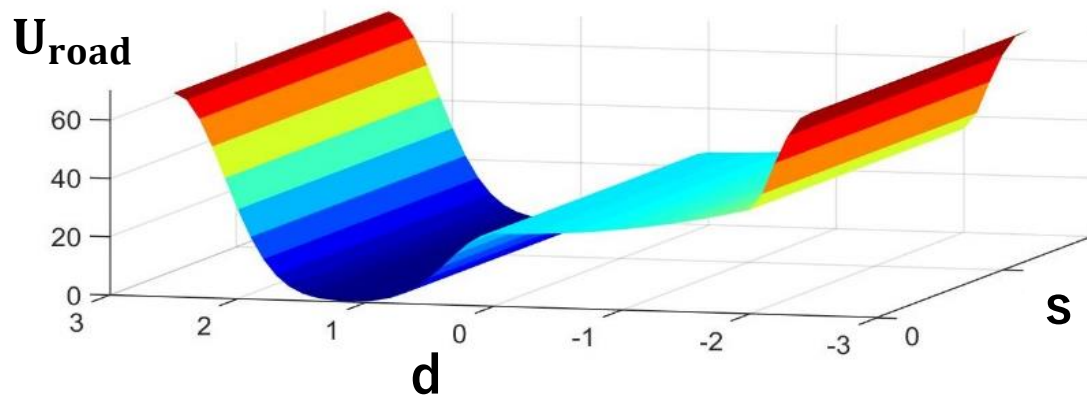
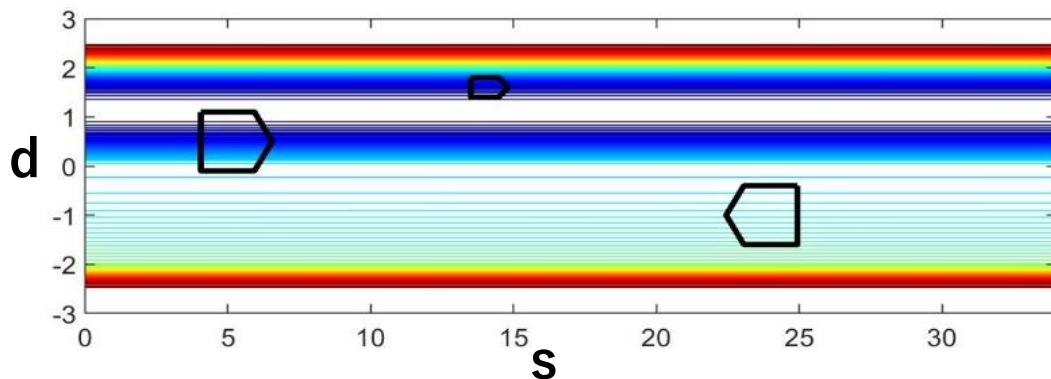


Fig. 12 Longitudinal motion planning

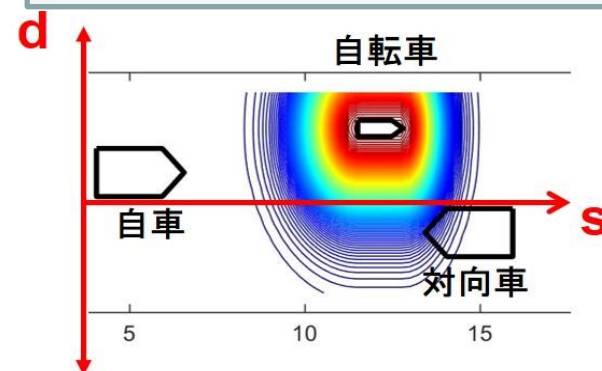
曲線座標系上のリスクポテンシャル

$$U_{total}(s, d) = U_{road}(s, d) + U_{cyc}(s, d) + U_{oc}(s, d) \quad (22)$$

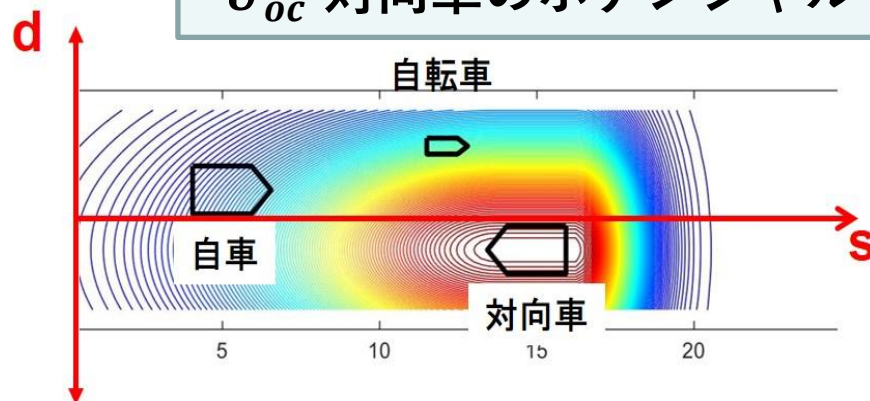
U_{road} 道路のポテンシャル



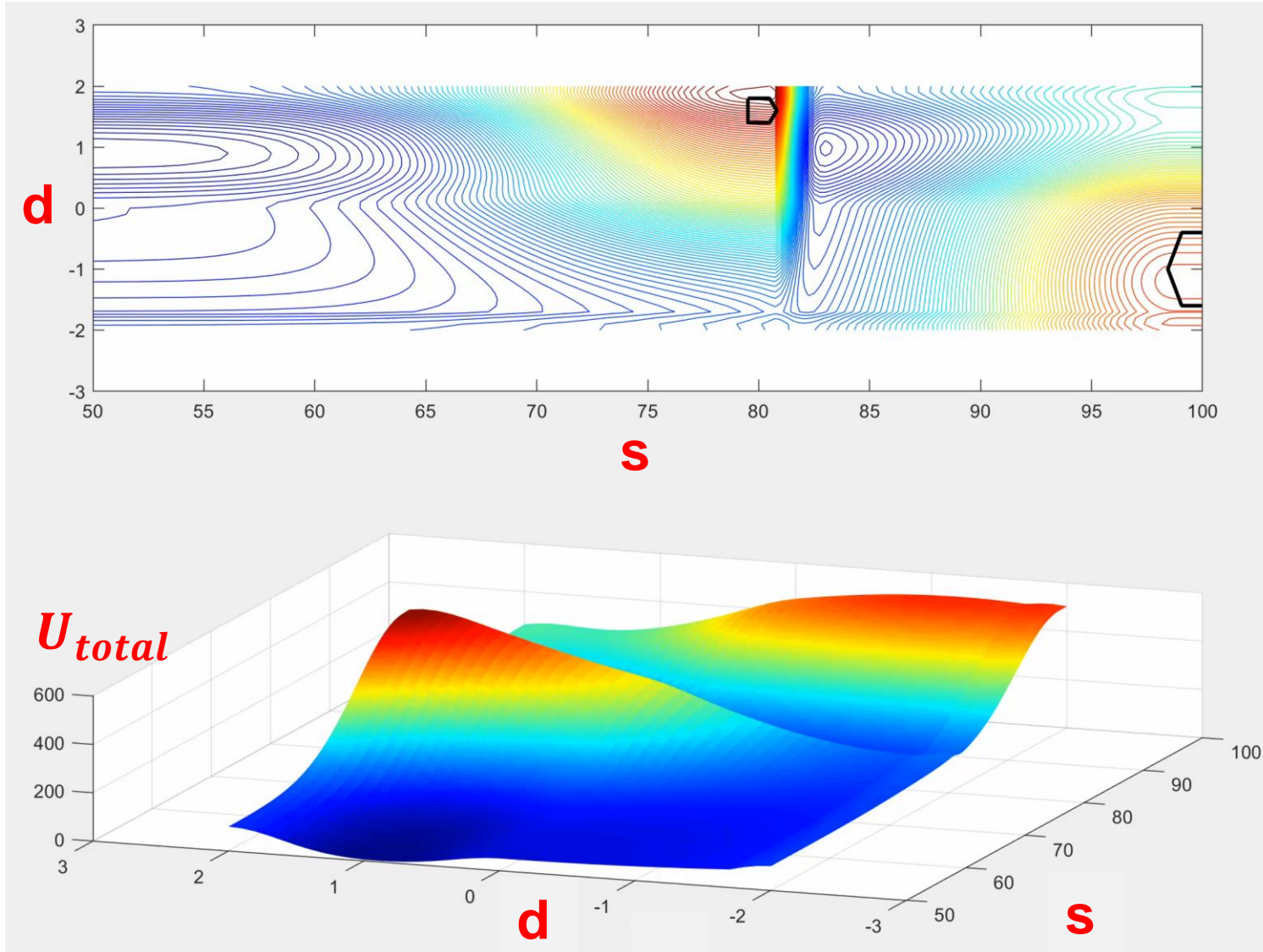
U_{cyc} 自転車のポテンシャル



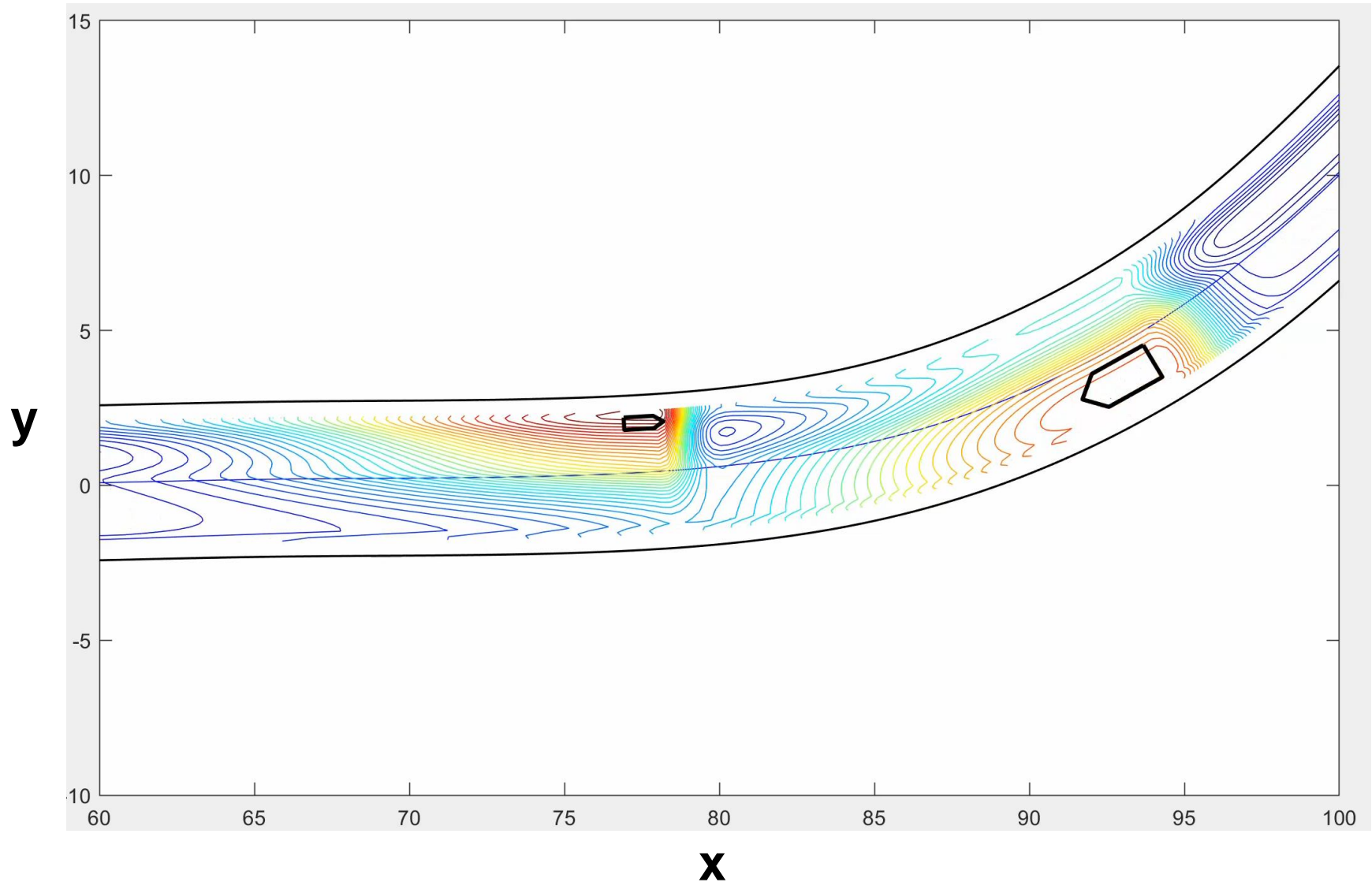
U_{oc} 対向車のポテンシャル



曲線座標系上のリスクポテンシャル



直交座標系へ換算の結果



曲線座標系における横運動を含む運動予測

状態の予測

横滑り角 $\beta = \arctan \left[\left(\frac{l_r}{l_f + l_r} \right) \tan(\delta_p) \right]$ (23)

進行方向の差 $e_\psi(i+1) = e_\psi(i) + \frac{[V(i) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot \mathbf{a}_{desired} \cdot \Delta t^2]}{l_r} \sin(\beta) - \psi_s$ (24)

s-軸 $s_p(i+1) = s_p(i) + \left[\frac{1}{1 - \kappa d_p(i)} \right] \left[V(i) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot \mathbf{a}_{desired} \cdot \Delta t^2 \right] \cos[e_\psi(i+1) + \beta]$ (25)

d-軸 $d_p(i+1) = d_p(i) + \left[V(i) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot \mathbf{a}_{desired} \cdot \Delta t^2 \right] \sin[e_\psi(i+1) + \beta]$ (26)

車速度

$V(i+1) = V(i) + \mathbf{a}_{desired} \cdot \Delta t$ (27)

予測時間

式(15)~(17)で定義する

目標実舵角の候補

$\delta_{p_min} < \delta_p < \delta_{p_max}$ (28)

拘束 $|\dot{\delta}_p| < \dot{\delta}_{p_max}$ (29)

評価関数

$J(s, d) = \sum_{i=1}^N \left[\mathbf{O}_{total}(s_p(i), d_p(i)) \right]$ (30)

評価関数が最小となる目標実舵角を算出
 $\delta_{desired} = \text{minimize}\{J(s, d)\}$ (31)

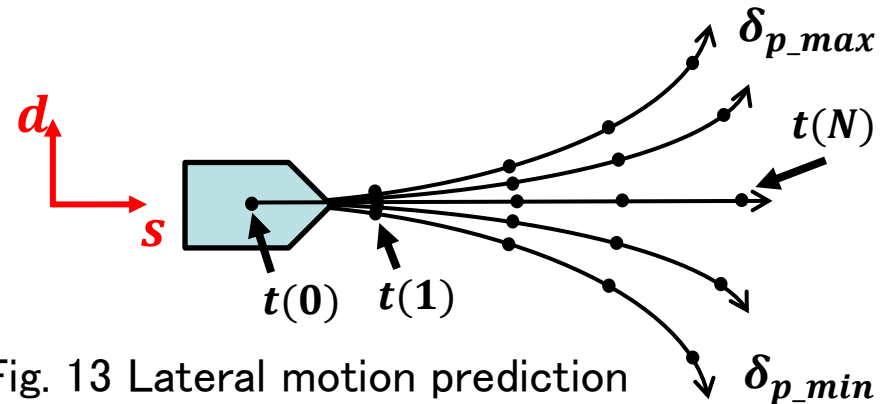


Fig. 13 Lateral motion prediction

5. シミュレーション実験と考察

対向車を考慮しない追い越しの場面

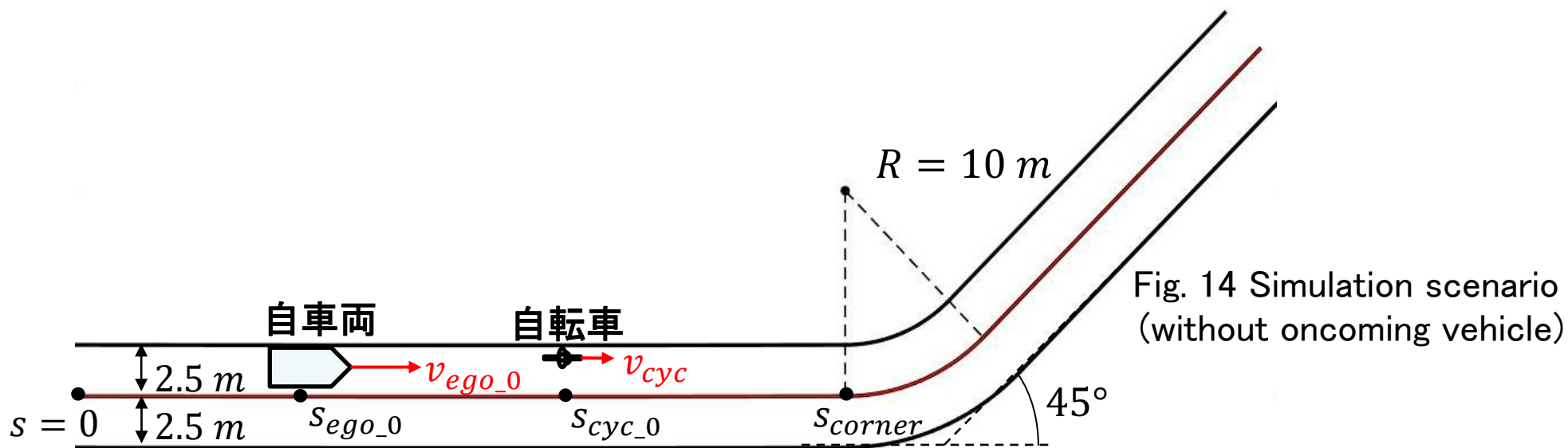


Fig. 14 Simulation scenario (without oncoming vehicle)

Table. 1 Simulation parameters

自車両	初期位置	s_{ego_0}	10,15, ..., 40,45 m
	初期速度	v_{ego_0}	30 km/hr
自転車	初期位置	s_{cyc_0}	60, 70 m
	速度	v_{cyc}	5,6, ..., 11,12 km/hr (一定)
コーナー	位置	s_{corner}	100 m
	半径	R	10 m

ロバスト性の検証

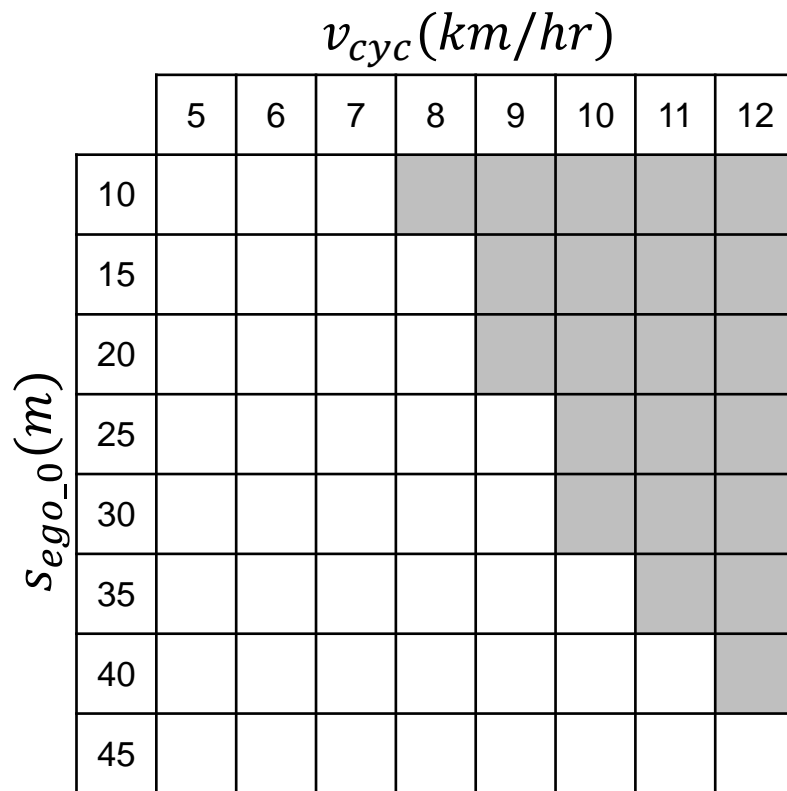


Fig. 15 Simulation results
($s_{cyc_0} = 60\text{ m}$)

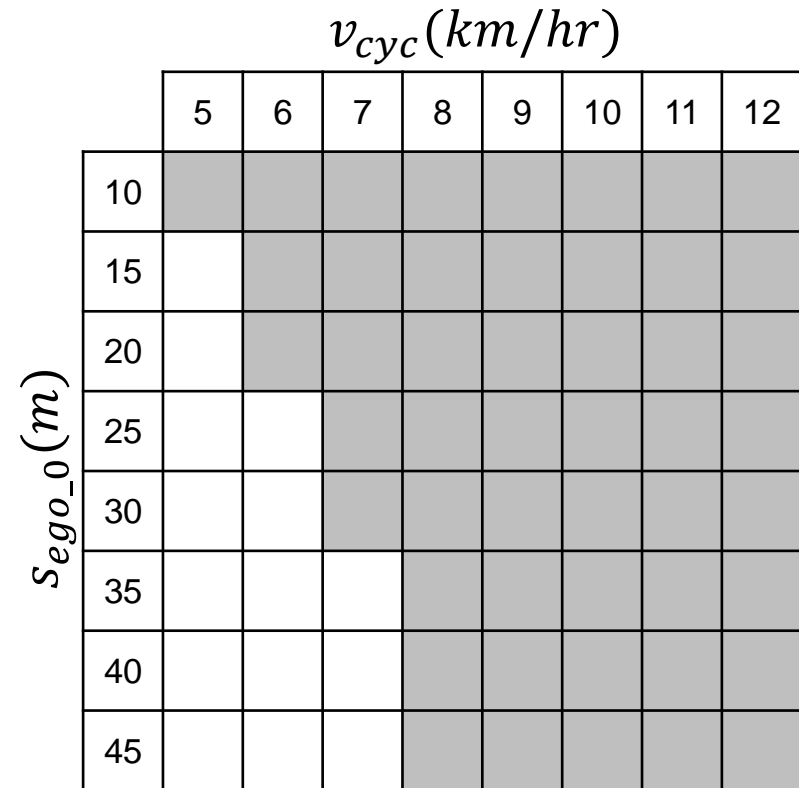


Fig. 16 Simulation results
($s_{cyc_0} = 70\text{ m}$)

走行条件を変更するにより、
システムのロバスト性を確認

- すぐに追越しをする
- 追従してから追越しをする

対向車を考慮する自転車追越しの場面

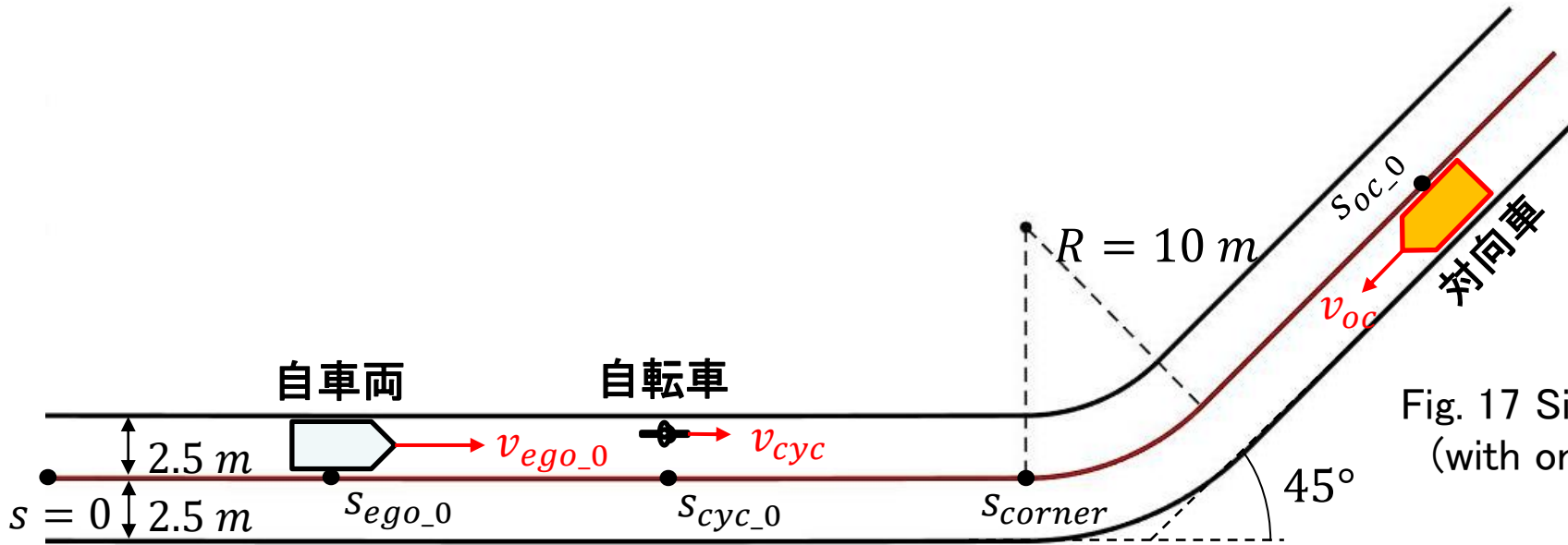
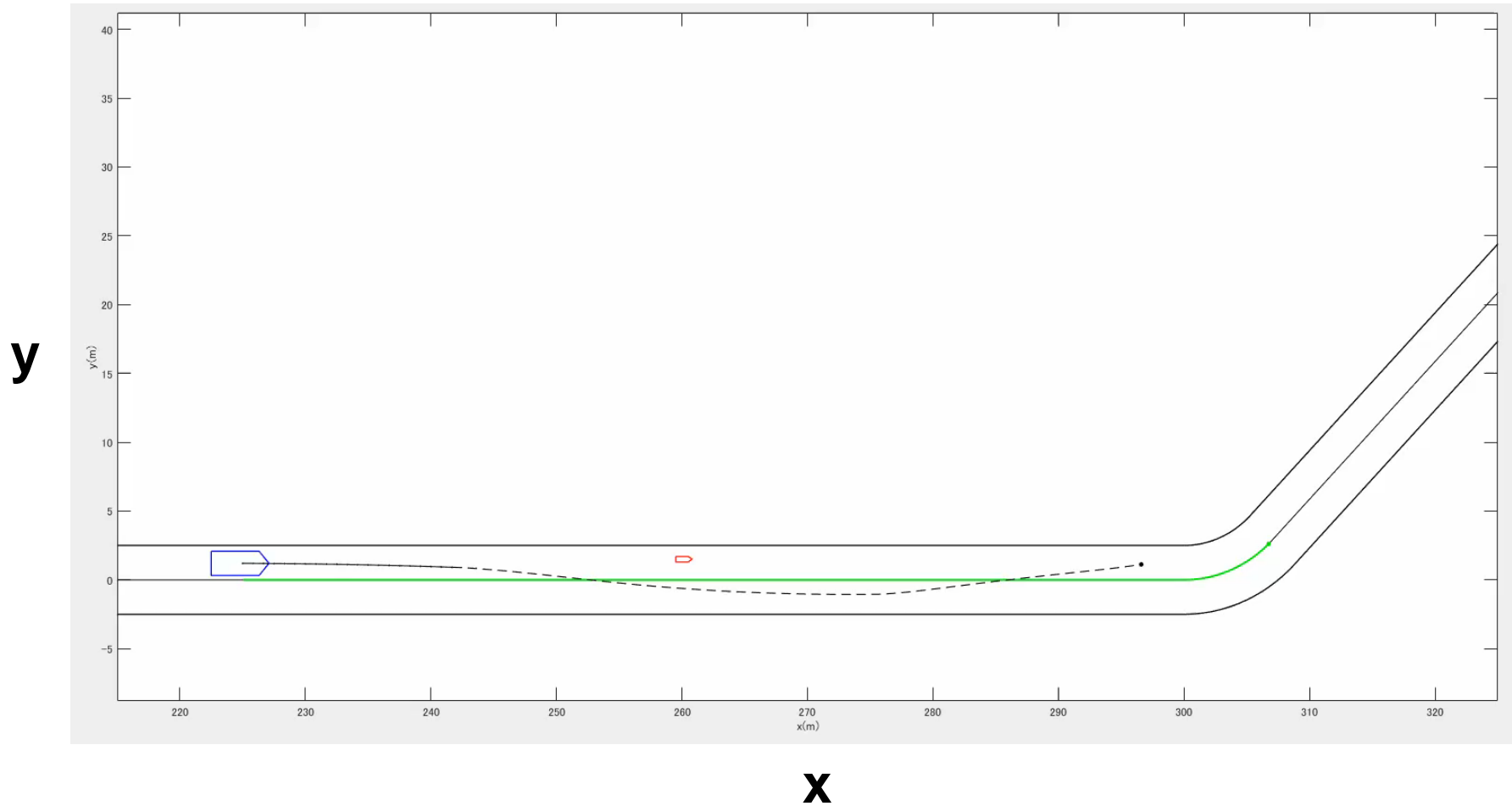


Fig. 17 Simulation scenario (with oncoming vehicle)

自車両	初期位置	s_{ego_0}	35 m
	初期速度	v_{ego_0}	30 km/hr
自転車	初期位置	s_{cyc_0}	60 m
	速度	v_{cyc}	6 km/hr (一定)
対向車	初期位置	s_{oc_0}	140 m
	速度	v_{oc}	20 km/hr (一定)
コーナー	位置	s_{corner}	100 m
	半径	R	10 m

Table. 2
Simulation
parameters

シミュレーション結果



6. まとめと今後

まとめと今後

1. コーナーを含む市町村道において自動運転システムのための自転車追い越しアルゴリズムを提案できた。以下に特徴を示す。
 - ✓ 行動判断と運動計画の各制御部で構成。 **Curvilinear Coordinate**で構成。
 - ✓ 地図データに基づく**視野推定モデル**を定義
 - ✓ **Redzoneの概念**と**安全余裕パラメータ**を定義し、安全な**追越しの可否判断**を実施。
 - ✓ 行動判断制御部→**目標速度プロファイル**を作成し、**目標加速度 $a_{desired}$** を算出。
 - ✓ **道路と障害物のリスクポテンシャル**を用い、最適軌跡を生成させる**実舵角 $\delta_{desired}$** を算出。
2. 本制御アルゴリズムが様々な走行条件で自転車を安全に追越しできるロバスト性をもつことが確認できた。

今後

- ✓ 車両の運動を考慮し、本制御アルゴリズムの精度を向上させる。
- ✓ 他のシナリオで本制御アルゴリズムの適用性を検証していく。
- ✓ 本制御アルゴリズムを自動運転実験車に実装し、効果を検証する。

今後のJSAE
春季大会で
発表する予定

参考文献

- (1) リスクポテンシャルを考慮した最適制御理論による自律運転知能システムに関する研究
長谷川 隆裕, ポンサトーン・ラクシンチャランサク, 山崎 彬人, 毛利 宏, 永井 正夫, 東京農工大学
- (2) Intelligent Driving System for Safer Automobiles, Hideo Inoue, Pongsathorn Raksincharoensak, Shintaro Inoue, Journal of Information Processing Vol.25 32-43 (Jan. 2017)
- (3) 対向車を考慮した自転車追越し判断アルゴリズムの研究, 木部 克哉, 神奈川工科大学
- (4) Local and Global Path Generation for Autonomous Vehicles using Splines
Randerson Lemos, Olmer Garcia, Janito V. Ferreira
- (5) Track Fusion and Behavioral Reasoning for Moving Vehicles Based on Curvilinear Coordinates of Roadway Geometries, Kichun Jo, Minchul Lee, Myoungho Sunwoo
- (6) An Improved Artificial Potential Field Model Considering Vehicle Velocity for Autonomous Driving, Hu Hongyu, Zhang Chi, Sheng Yuhuan, Zhou Bin, Gao Fei, Jilin University, China