

平成 29 年度博士学位論文

**市街地における歩行者・自転車の移動予測に基づく
自動減速制御に関する研究**

Study on Autonomous Braking Control System
Based on Pedestrian and Cyclist Motion Prediction in Urban Area

指導教員

ポンサトーン ラクシンチャランサク 准教授

東京農工大学大学院

工学府 機械システム工学専攻

平成 26 年度入学

学籍番号 14833002

江澤 和浩

論文要旨

本論文は、対歩行者、自転車衝突事故防止を目的とした、移動予測に基づく自動減速制御システムに関するものである。

日本と世界の交通事故事情を比較すると、日本では、歩行者・自転車の死亡事故割合が高いという特徴がある。2020 年までに交通事故死者数を 2500 人以下とするという日本政府の目標を達成するためには、歩行者や自転車との衝突事故を未然に防ぐことが重要であると考えられる。また、交通事故件数は減少傾向である一方、高齢者による交通事故件数はほぼ横ばいとなっており、結果として高齢者が起こした交通事故の割合が高くなっている。高齢者は有効視野角の縮小や反応時間の遅れなどにより運転能力が低下するため、交通事故低減のためにはドライバーの高齢化という問題にも向き合う必要がある。現在、自動車の前方にいる歩行者を検知して衝突を防ぐ運転支援システムも実用化されており、衝突事故低減が期待される。しかし、既存のシステムでは障害物の検出に要する時間や、制動距離といった物理的限界によって衝突を回避できない場合がある。また、衝突を回避することができたとしても、衝突の直前になって作動するため、急ブレーキを必要とすることになる。そのため、衝突回避性能をより高めるには、危険を熟知した熟練ドライバーのように歩行者の飛び出しや進路変更などの危険を予測し、事前に減速することが重要となる。

以上の背景より、本研究では、運転指導員の運転行動記録と交通調査をそれぞれ実施し、分析結果を参考に、移動予測が必要となる場面として無信号交差点における歩行者の飛び出し場面、歩行者の駐車車両回避場面および自転車の他者追い越し場面を対象とした。無信号交差点において、歩行者が飛び出しても衝突を回避することができるよう、危険予測に基づく自動減速手法を構築した。また、各対象場面における現実の歩行者・自転車の移動軌跡を実験により収集・分析することで、歩行者・自転車の挙動をモデル化し、移動予測手法を構築した。さらに、移動予測手法に基づく自動減速シミュレーションにより、移動予測に基づき減速することの有効性を確認した。

Abstract

This thesis focuses on autonomous braking control system for collision avoidance for pedestrians and cyclists in urban area. In order to develop high-performance automatic emergency braking which can effectively prevent more accidents, hazard anticipatory behavior like expert drivers is one of potential solution which can prevent the vehicle falling into inevitable collision states. Therefore, this paper proposes hazard anticipatory autonomous braking control system based on motion prediction of pedestrians and cyclists logically and the effectiveness of the system is verified.

The hypothesis is formulated that an obstacle in front of pedestrian or cyclist affects the motion of the pedestrian or cyclist. In this hypothesis, the ego vehicle needs to consider the affected motion of the pedestrian or cyclist. In order to confirm the hypothesis, the real road investigation is operated on urban community road. Based on the investigation, the target scenario is selected and the motion model in the scenario is formulated by using potential field method. The validity of the motion model is confirmed by checking the result of motion prediction against the measured trajectories.

In addition, the autonomous braking control system based on the motion prediction is designed and the effectiveness of the system is verified by computer simulation that the proposed system has performance to be able to drive safer than previous system. This information will make advance in the field of intelligent vehicle and active safety.

目 次

目次	i - iii
本論文で使用する主な記号	iv - vii
第 1 章 序論	1-7
1.1 研究背景	1
1.1.1 社会的背景	1
1.1.2 工学的背景	4
1.2 問題提起	6
1.3 本研究の目的	7
1.3 本論文の構成	9
第 2 章 運転行動解析と交通調査	10-21
2.1 無信号交差点における運転指導員の運転行動解析	10
2.1.1 実験車両	10
2.1.2 運転指導員	12
2.1.3 実験条件	12
2.1.4 運転行動解析	14
2.2 交通調査に基づく対象場面の選定	18
2.3 まとめ	21
第 3 章 無信号交差点における歩行者飛び出し予測に基づく 自動減速手法の構築	22-41
3.1 歩行者飛び出し予測	22
3.2 潜在的歩行者衝突リスク	23
3.2.1 リスクポテンシャルの定義	24
3.2.2 衝突回避のための潜在的歩行者衝突リスク	25
3.3 自動減速手法	32
3.4 減速シミュレーション	33

3.4.1 シミュレーション条件	34
3.4.2 前方予測距離のパラメータ決定	35
3.4.3 シミュレーション結果	36
3.5 まとめ	41
第4章 単路における歩行者・自転車の移動軌跡の解析	42-54
4.1 安全性を考慮した解析項目	42
4.2 歩行者の駐車車両回避場面における移動軌跡の解析	43
4.2.1 歩行者移動軌跡の取得実験	43
4.2.2 回避行動の解析	44
4.2.3 移動予測に用いる指標と数値	48
4.3 自転車の他者追い越し場面における移動軌跡の解析	50
4.3.1 自転車移動軌跡の取得実験	50
4.3.2 追い越し行動の解析	51
4.3.3 移動予測に用いる数値	54
4.4 まとめ	54
第5章 単路における歩行者・自転車の移動予測手法の構築	55-86
5.1 ポテンシャルフィールドの設定	55
5.1.1 歩行者の駐車車両回避場面	57
5.1.2 自転車の他者追い越し場面	60
5.2 経路候補の生成およびポテンシャル最適化に基づく妥当性の評価	61
5.3 移動制限	63
5.3.1 可視判定	63
5.3.2 目標地点の設定	63
5.4 移動軌跡の分析結果を反映したパラメータ設定	65
5.4.1 歩行者の駐車車両回避場面	65
5.4.2 自転車の他者追い越し場面	72

5.5 移動予測手法の有効性検証	77
5.5.1 歩行者の駐車車両回避場面	77
5.5.2 自転車の他者追い越し場面	82
5.6 まとめ	86
第 6 章 移動予測手法に基づく自動減速制御システムの有効性検証	87-71
6.1 減速の必要性の判断	87
6.2 自動減速制御手法	89
6.3 比較用従来型移動予測手法	92
6.4 移動予測に基づく自動減速シミュレーション	93
6.4.1 シミュレーション概要	93
6.4.2 歩行者の駐車車両回避場面におけるシミュレーション結果	100
6.4.3 自転車の歩行者追い越し場面におけるシミュレーション結果	107
6.4.4 自転車の自転車追い越し場面におけるシミュレーション結果	114
6.5 まとめ	121
第 7 章 結言	122-124
参考文献	125
謝辞	130

本論文で使用する主な記号

すべての記号は，初めて登場した章番号に記載する．

第 1 章

a_{\max}	最大減速度
j_{\max}	最大減速ジャーク
t_1	最大減速度に達するまでの時間
V_0	車両の初速度
V_1	最大減速度に達した際の車両速度
τ	歩行者を検出するまでに要する時間
D_1	歩行者を検出するまでに進む空走距離
D_2	減速を開始してから最大減速度に達するまでに走行する距離
D_3	最大減速度に達してから停止するまでに要する距離

第 2 章

V	車両速度
a_x	車両前後方向加速度

第 3 章

x	x 座標（車両固定座標系）
y	y 座標（車両固定座標系）
x_{int}	交差点までの x 方向相対距離
y_{int}	交差点までの y 方向相対距離
L_P	前方予測距離
\tilde{T}_{ti}	前方予測位置における交差点到達余裕時間
\tilde{V}_{ped}	歩行者予測速度
\tilde{x}_{ped}	前方予測位置から予測歩行者までの x 方向相対距離
\tilde{y}_{ped}	前方予測位置から予測歩行者までの y 方向相対距離
\tilde{D}_{ped}	前方予測位置から予測歩行者までの最短距離
U_{int}	無信号交差点における潜在的歩行者衝突リスク

k_{int}	潜在的歩行者衝突リスクのゲイン
\tilde{D}_0	潜在的歩行者衝突リスクの作用する最大距離
F	リスクポテンシャルから作用する斥力
V_0	減速開始時の初期車両速度
w_{car}	車両横幅
y_{safe}	横方向安全距離
a_{int}	交差点進入時最大減速度
V_{ref}	交差点進入参照速度
\tilde{x}_{ref}	交差点進入参照距離
m	車両質量
$\tilde{D}_{a_{int}}$	交差点進入時最大減速度に到達したときの前方予測位置 と予測歩行者の最短距離
a^*	目標減速度
V^*	目標減速度
V_{expert}	熟練ドライバの速度プロファイル
V_{error}	熟練ドライバとドライバモデルの速度プロファイルの誤差

第 4 章

X	X 座標（駐車車両右後端固定座標）
Y	Y 座標（駐車車両右後端固定座標）
x_{rel}	移動体から障害物または追い越し対象までの X 方向相対距離
y_{rel}	移動体から障害物または追い越し対象までの Y 方向相対距離
X_{ped}	歩行者の X 方向絶対座標位置
Y_{ped}	歩行者の Y 方向絶対座標位置
X_{cyc}	自転車の X 方向絶対座標位置
Y_{cyc}	自転車の Y 方向絶対座標位置
T_{ic}	移動体から障害物または追い越し対象までの衝突余裕時間
V_{ped}	歩行者移動速度
V_{cyc}	自転車移動速度
k	ガンマ分布の形状母数
θ	ガンマ分布の尺度母数

第 5 章

U_L	走行レーンへ戻そうとするポテンシャル
k_L	走行レーンに設定する仮想ばねのばね定数
d_L	走行レーンからの Y 方向相対距離
Y_L	走行レーンの Y 方向絶対座標位置
U_B	道路境界に設定する斥力ポテンシャル
k_B	道路境界に設定する仮想ばねのばね定数
d_B	道路境界からの Y 方向相対距離
Y_B	道路境界の Y 方向絶対座標位置
l_{0-B}	道路境界に設定する Y 方向仮想ばね自然長
U_C	駐車車両に設定する斥力ポテンシャル
k_C	駐車車両に設定する仮想ばねのばね定数
d'	駐車車両からの相対距離
l_{0-xcr}	駐車車両後方に設定する X 方向仮想ばね自然長
l_{0-yc}	駐車車両側方に設定する Y 方向仮想ばね自然長
l_{0-xcf}	駐車車両前方に設定する X 方向仮想ばね自然長
l_{car}	駐車車両の前後方向長さ
U_{obj}	追い越し対象に設定する斥力ポテンシャル
k_{obj}	追い越し対象に設定する仮想ばねのばね定数
l_{0-xobj}	追い越し対象に設定する X 方向仮想ばね自然長
l_{0-yobj}	追い越し対象に設定する Y 方向仮想ばね自然長
Δt	時間刻み
T_P	予測時間
U_G	目標地点へ向かわない場合に加算されるポテンシャル
w_G	目標地点へ向かわない場合に加算されるポテンシャルの重み
l_{0-xobj}	追い越し対象に設定する X 方向仮想ばね自然長
θ_G	目標地点と進行方向のなす角
σ_G	目標地点へ向かわない場合に生じるポテンシャルの広がり

第 6 章

v_{rel}	自車両と，自車両の追い越し対象との相対速度
x_{rel}	自車両と，自車両の追い越し対象との x 方向間隔
y_{rel}	自車両と，自車両の追い越し対象との y 方向間隔
J	減速ジャーク
t_{dec}	自車両の追い越し対象と同じ速度まで減速する間の時間
α	減速終了時に対象の歩行者・自転車との間に維持する 車両前後方向距離
V_{end}	減速終了時の車両速度

第 1 章

序論

第 1 章では，研究背景と研究目的について述べる．1.1 節は社会的・工学的背景の説明，1.2 節は工学的背景に対する問題提起，1.3 節は研究目的すなわち問題解決のための方法について述べる．最後に，1.4 節において本論文の構成を示す．

1.1 研究背景

1.1.1 社会的背景

日本における交通事故発生件数および死傷者数の推移（昭和 23 年～平成 28 年）を図 1.1.1 に示す(警察庁 2017)．

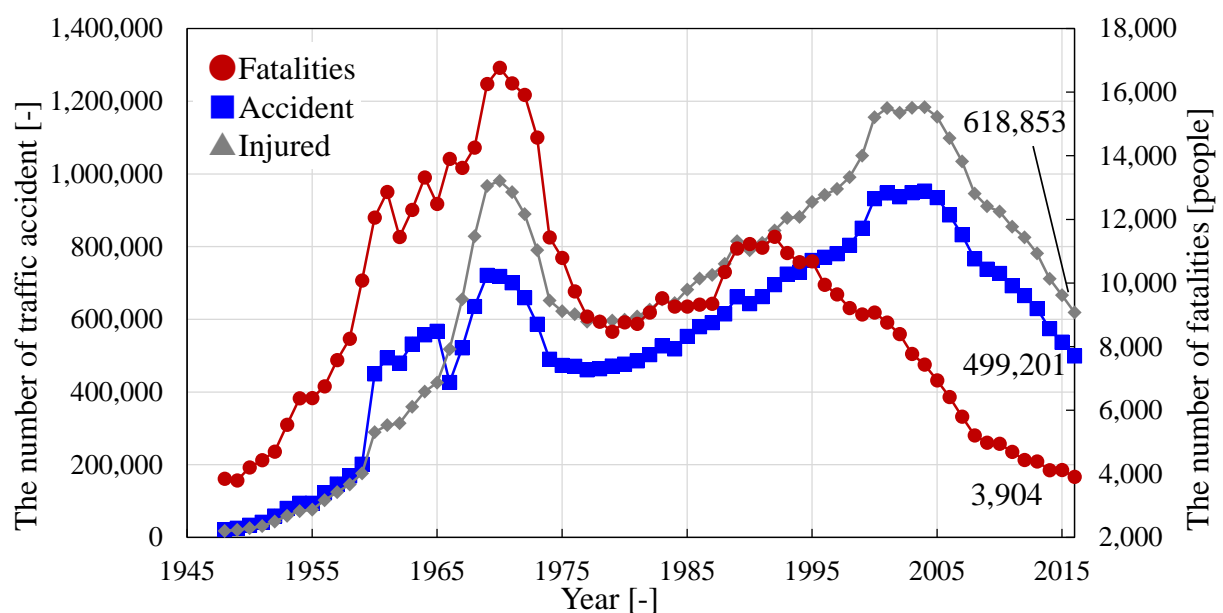


Fig. 1.1.1 Statistical data of traffic accidents in Japan

図 1.1.1 について，近年の交通事故発生件数は減少傾向にあり，平成 28 年中の交通事故発生件数は 49 万 9, 201 件（前年比 3 万 7, 698 件減，-7.0%）となっている．これは，安全運転の意識向上や自動車の衝突事故を未然に防ぐ予防安全技術が普及したことが影響していると考えられる(村井 2017)．また事故件数の減少と併せて，死傷者数も大きく減少しており，平成 28 年には 62 万 2, 757 人（前年比 4 万 7, 383 人減，-

7.1%) となっている。これは、万が一の衝突事故時に乗員の安全を守るための衝突安全技術の向上(上西他 2017)(大垣 2017)や、歩行者・自転車との衝突時に衝撃を吸収する衝突安全ボディ(永富 2013)(藤田他 2017)の発展などの効果が考えられる。

次に、2015 年における日本と他国の状態別交通死者数割合の比較を図 1.1.2、日本の状態別死者数の推移を図 1.1.3 に示す(公益財団交通事故総合分析センター 2017)。図 1.1.2 より、日本では歩行者の死亡者数割合が 37.3%を占めており、7 か国中では 2 番目に多い構成割合となっている。また、自転車の死亡事故割合は 15.6%を占めており、7 か国中では最も多い。さらに、歩行者・自転車の死亡事故割合だけで全体の 50%以上を占めているのは日本だけとなっている。このことから、他国と比較して日本における歩行者・自転車の死亡事故割合の高さは顕著で、日本特有の交通事情が影響していると考えられる。また、図 1.1.3 に示すように、歩行者の死亡者数は緩やかな減少傾向にあるものの減少幅は小さく、自転車の死亡者数もほぼ横ばいとなっている。日本政府の、2020 年までに交通事故死者数を 2500 人以下とし、世界一安全な道路交通社会を実現するという目標(中央交通安全対策会議 2016)を達成するには、他国と比較して割合の高い歩行者・自転車の死亡事故を防止するための対策が必要であるといえる。

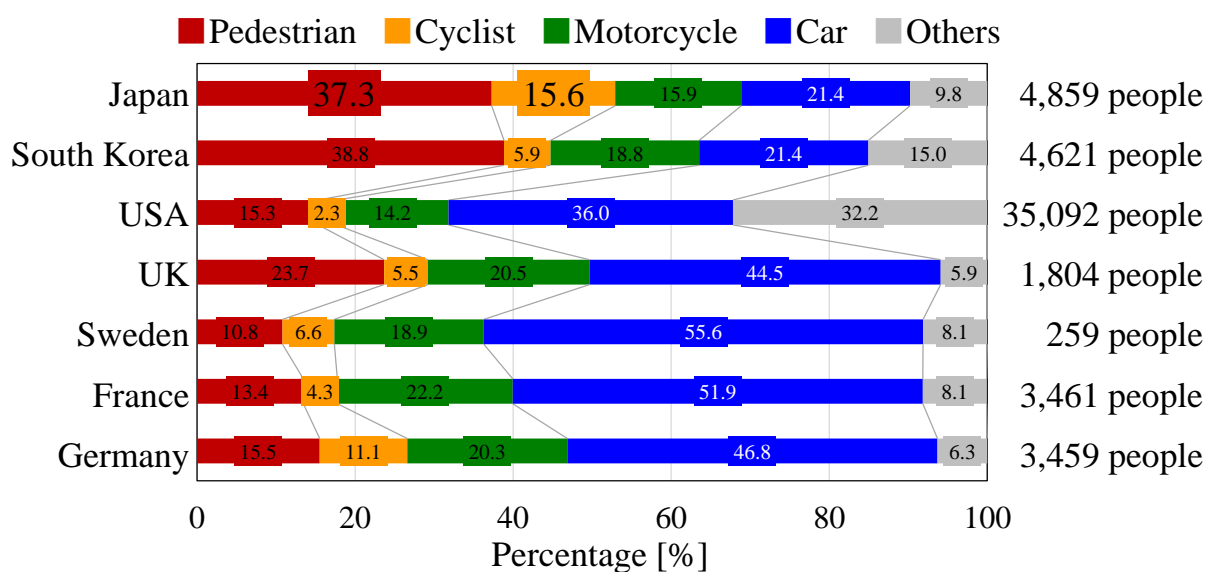


Fig. 1.1.2 Statistical data of international fatal traffic accidents in 2015

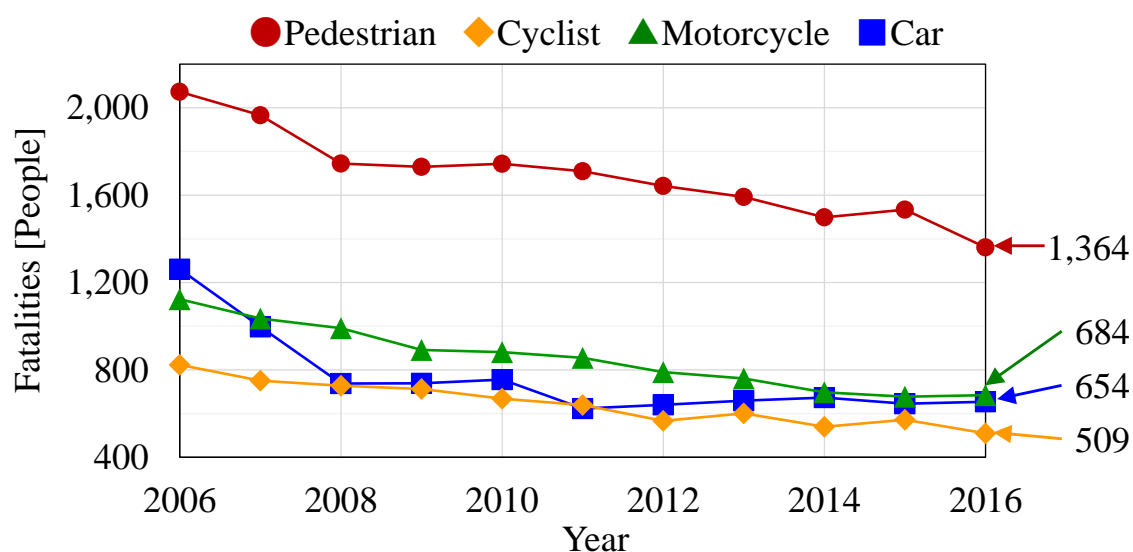


Fig. 1.1.3 Statistical data of fatal traffic accidents in Japan

ここで、交通事故における第一当事者(原付以上運転者)の年齢層別事故件数の推移を図 1.1.4 に示す。図 1.1.4 について、全ての年齢層で事故件数が減少傾向であるのに対し、65 歳以上の高齢者が第一当事者となった交通事故件数はほぼ横ばいとなっており、相対的に 20.4%の構成割合を占めるまでに増加している。

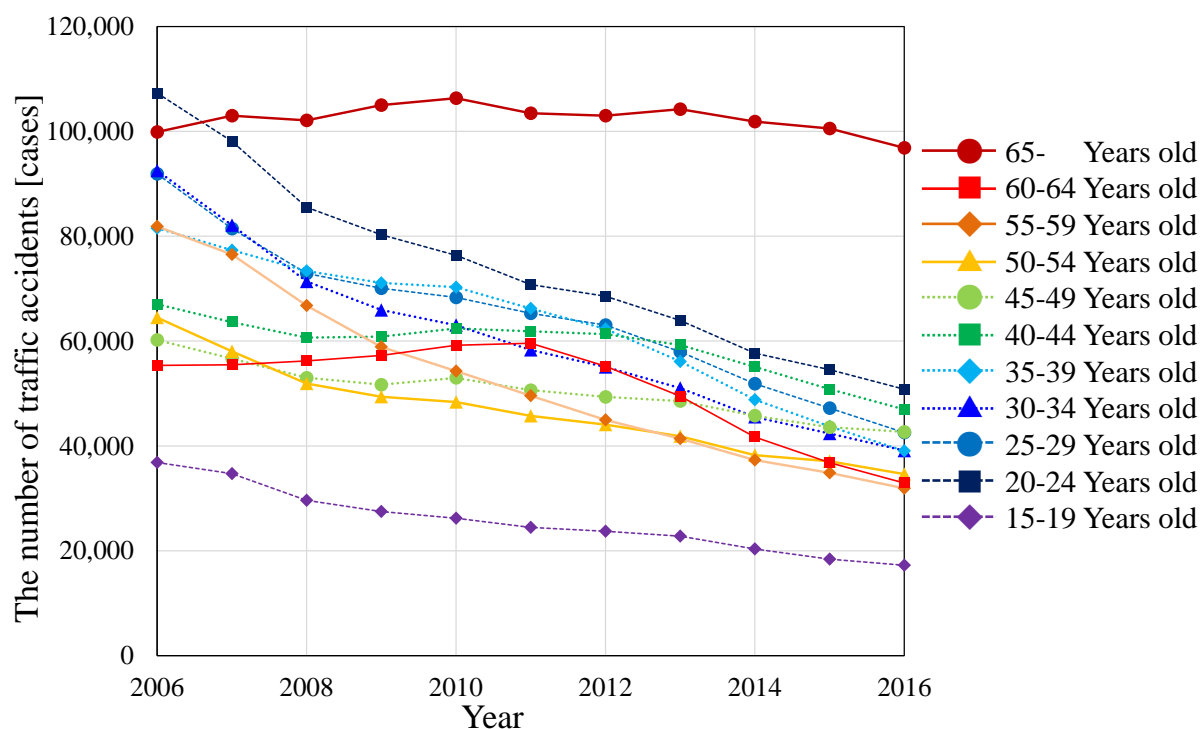
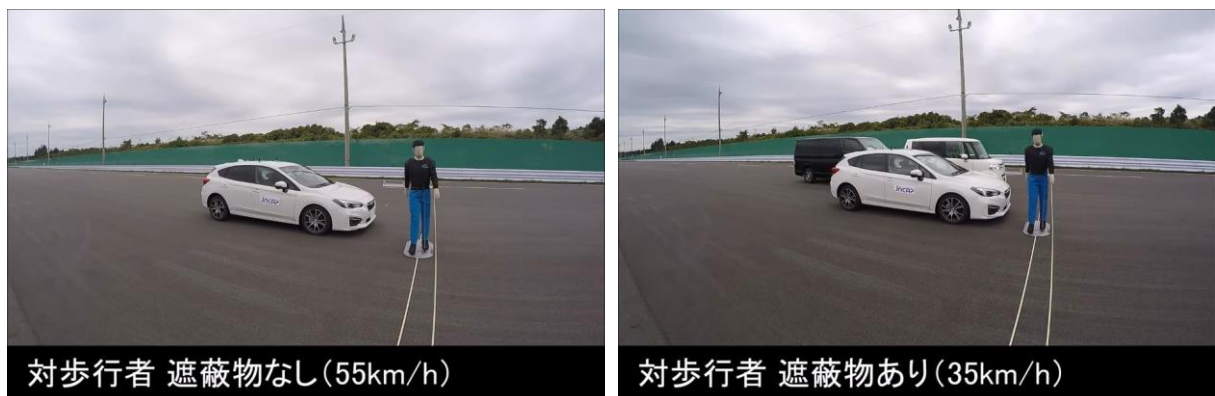


Fig. 1.1.4 Age of the person caused traffic accident

高齢者は老化による有効視野角の縮小や反応時間の遅れなどにより、運転能力が低下することが学術的にも報告されていることから(森澤 2016)(Nihei 2013), 政府目標を達成するためにはドライバの高齢化という問題にも対処していく必要があり(碓 2017), 様々な観点から研究が進められている(小竹 2015).

1.1.2 工学的背景

2017 年現在, 自動運転の実現や, 複雑な場面に対応した運転支援システムの実用化を目指し, 広く研究・開発が行われている(露木 2013) (Ziegler 2014) (菅沼 2015) (田川 2015) (赤井 2017) (棚橋 2017) (三浦 2017). また, 自動車の安全性を評価する JNCAP において 2014 年度より対車両 AEBS(Autonomous Emergency Braking System) (宇治橋 2014), 2016 年度より対歩行者の予防安全技術の性能評価が開始されている(独立行政法人自動車事故対策機構 2017). このことから, これらの事故防止のための予防安全技術は広く普及し, より高性能なものが求められるようになることは確実である. JNCAP で実施されている対歩行者被害軽減ブレーキの試験の様子を図 1.1.4(a), (b)に示す(独立行政法人自動車事故対策機構(2) 2017). 図 1.1.4 について, JNCAP では歩行者が車両の進路上を横断する場面(a)と, 遮蔽物によって歩行者の飛び出しを模擬した場面(b)のそれぞれに対して性能評価が行われている.



(a) without obstacle at 55km/h

(b) with obstacle at 35km/h

Fig. 1.1.4 Autonomous emergency braking system test

図 1.1.4 に示す車両では, 遮蔽物がない場合は初速 55 km/h まで衝突を回避可能であるのに対し, 遮蔽物からの飛び出し場面では初速 35 km/h 以下でなければ衝突を回避することができない. これは, 被害軽減ブレーキが歩行者を検出した後に作動するためである. 自動車の

制動距離と停止距離を図 1.1.5 に示す．自動車の停止距離は，式(1.1.1)から式(1.1.6)で表される(永井 2011)．

$$t_1 = \frac{a_{\max}}{j_{\max}} \quad (1.1.1)$$

$$V_1 = V_0 - \frac{j t_1^2}{2} \quad (1.1.2)$$

$$D_1 = V_0 \tau \quad (1.1.3)$$

$$D_2 = V_0 t_1 - \frac{j t_1^3}{6} \quad (1.1.4)$$

$$D_3 = \frac{V_1^2}{2a_x} \quad (1.1.5)$$

$$\begin{aligned} D &= D_1 + D_2 + D_3 \\ &= \frac{V_0^2}{2a_x} + \left(\tau + \frac{t_1}{2} \right) V_0 - \frac{j t_1^3}{24} \end{aligned} \quad (1.1.6)$$

ただし，車両の初速 V_0 [km/h] ，ジャーク j_{\max} [m/s³] で最大減速度 a_{\max} [m/s²] に達するまでの時間を t_1 [sec] ，最大減速度に達した時の車両速度を V_1 [km/h] ，歩行者を検出するのに要する時間 τ [sec] の間に車両が進む空走距離を D_1 [m] ，減速を開始してから最大減速度に達するまでに走行する距離を D_2 [m] ，最大減速度のまま停止するまでに要する距離を D_3 [m] とする．図 1.1.5 は，最大減速度 $a_{\max} = 8 \text{ m/s}^2$ ，ジャーク $j_{\max} = 10 \text{ m/s}^3$ ，歩行者を検出するのに要する時間 $\tau = 0.5 \text{ sec}$ の場合の停止距離である．

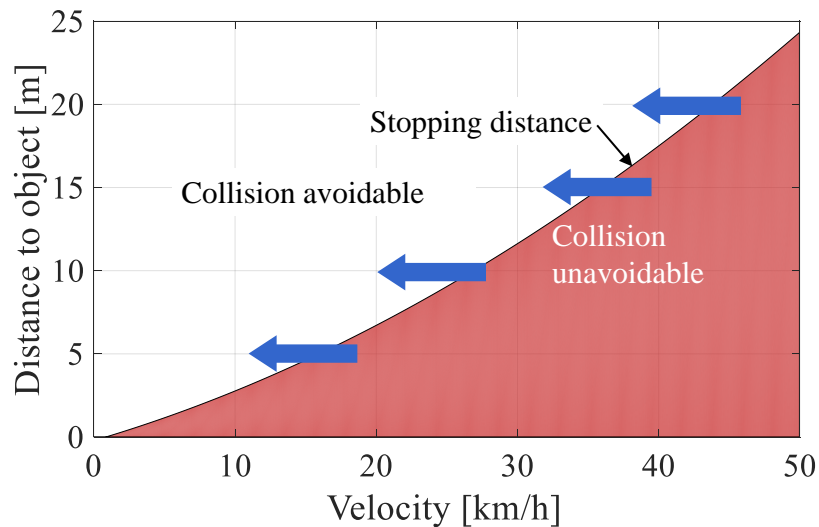


Fig. 1.1.5 Collision avoidable and unavoidable regions by physical limit

極短時間で歩行者を検出可能であるセンサを用いたとしても図 1.1.5 に示すように、危険を検知した時点で物理的限界が関係する制動距離によって衝突を回避できない場合がある(加藤 2013)。そのため、図 1.1.5 の青い矢印で示すように、危険を予測し事前に減速しておくことによって制動距離は短くなり、対象までの距離が同じ場合であっても衝突を回避することが可能となる。このように、衝突事故を防ぐためには、危険を予測し事前に減速することが有効であることが先行研究においても言及されている(長谷川 2014) (前田 2015)。

1.2 問題提起

1.1.1 項において、日本の交通事故において歩行者・自転車の死亡事故割合が他国と比較して多いことや、高齢者が第一当事者となった交通事故件数が横ばいとなっていることから、交通事故削減に向けた政府目標を達成するための課題を示した。1.1.2 項では、既存の対歩行者衝突事故回避システムが抱える問題と、危険を予測して事前に減速することの重要性を示した。

事故防止に繋がる手段として、ドライバの運転行動の改善、自動車の予防安全技術の向上、道路環境の改善などが考えられる。ドライバの運転行動を改善する場合、教育的指導により効果を得ることができる。しかし、長期的な効果を得るためには一人のドライバに対して継続的に対応する必要がある(Shino 2013)。また、運転行動の改善だけでは先に述べた高齢ドライバの老化による運転能力の衰えを補いきれない可能性がある。路車間通信等を利用した警報システムなども考えられるが(小島 2004) (鈴木 2005) (山中 2005)、道路環境を改善するには莫大な費用と時間を費やす必要があるため実現が困難である。そこで、自動車側が危険を予測して自動的に減速制御を行うことで、ドライバの安全運転を促す車載型予防安全技術がより良い改善策として考えられる。

以上より、歩行者・自転車に対する事故を低減するためには、LIDAR やカメラなどを用いた自律検知型運転支援システム(田中 2009) (尾崎 2009) (竹内 2006) (中島 2009) (Broggi 2009)や、歩行者・自転車の移動予測に基づく危険予測運転支援システムが必要であるといえる。自律検知型による危険予測技術は、環境センシングにより潜在的危険領域や歩行者・自転車を検出し、予測に基づいた運転行動を取ることが可能

となる。

歩行者の移動予測に関する研究では、スタジアムなどの施設内における群衆流動をシミュレーションするものなどがあるが(劉 2008), これは歩行者のマクロの動きに注目したものであり個々人の動きに注目したものではないため, 自動運転システムや運転支援システムへの応用は難しい。また, 車両の走行に影響を与えうる歩行者の動きを対象とした研究は, 横断歩道付近やパーキングエリアなどの環境を限定したものが多く(Shimizu 2012) (大前 2015), 一般単路への適用も必要であると考えられる。

1.3 本研究の目的

1.1.2 項で示したように, 既存の衝突回避システムでは障害物が検出されても制動距離といった物理的限界で衝突を回避できない問題がある。この問題を解決するため, 本研究では飛び出しや進路変更といった, 歩行者・自転車の移動予測に着目する。歩行者・自転車の移動予測に基づき危険性を判断できれば, ドライバに減速を促したり自動減速させたりすることで, さらなる歩行者事故低減効果が期待できる。そこで, 本研究の目的を歩行者・自転車の移動予測に基づく自動減速制御システムの構築とする。

人が自動車を運転する際の行動を模式的に表したものを図 2.1.1 に示す。ドライバは, 自車両周辺の状況を認知し, 加減速するべきかどうかや進路変更するべきか等の判断を行い, 実際に車両を操作するという一連の動作を行っている。これを運転支援システムや自動運転システムに置き換えると, 車載センサによって自車周辺の外界情報を認識し, 認識した情報から自車両がどのように動くべきかをモーションプランニングによって判断し, 判断した通りに自車両が動くように各アクチュエータへ指令値を送るという流れになっている。本研究では, 運転支援システムや自動運転システムの核となる, モーションプランニングに欠かせない移動予測システムを構築する。

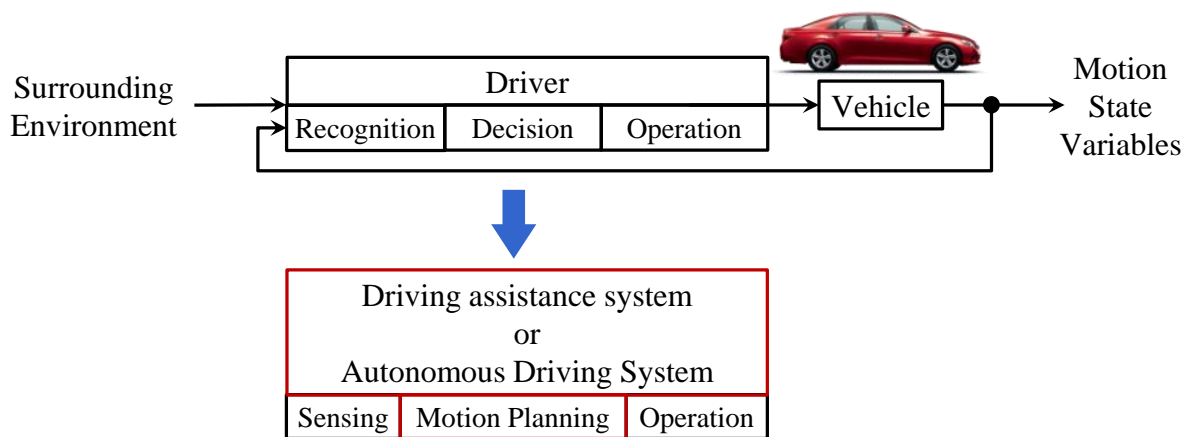


Fig. 1.3.1 Comparison of driver behavior and driving assistance system or autonomous driving system

本研究で提案する，交通参加者の移動予測に基づく自動減速システムの概要図を図1.3.2 に示す．

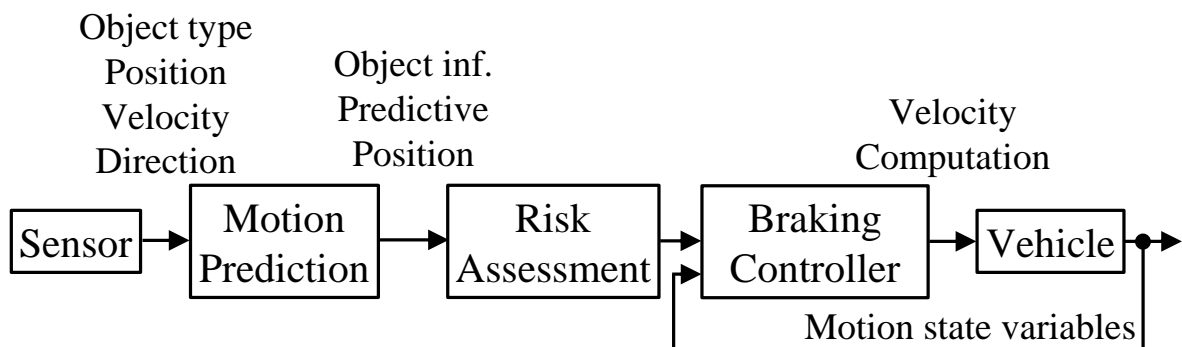


Fig. 1.3.2 Autonomous braking control system based on motion prediction

まず，自車両前方に存在する歩行者・自転車，障害物や道路境界の位置，移動体の進行方向および移動速度等の状態量は車載センサにより検出可能であることを前提とする．検出した対象者の動きを，後述するポテンシャルフィールド法に基づく移動予測手法により予測する．この予測位置から，自車両が対象へ接近する際に安全な側方間隔を維持することが可能であるかを評価し，安全性が確認された場合には自動減速制御は作動せずに走行する．安全な側方間隔を維持することができずに危険であると判断された場合には，自車両の速度を自動的に制御し，安全な速度で走行させるものである．

1.4 本論文の構成

第 1 章 序論 では、日本における交通事故の傾向、既存の対歩行者衝突回避システムと問題点について述べ、問題解決のための方法を提案した。

第 2 章 運転行動分析と交通調査 では、運転指導員が無信号交差点を通過する際の減速行動を分析する。また、一般単路においてどのような場面が見受けられるかを把握するため、交通調査を実施する。

第 3 章 無信号交差点における歩行者飛び出し予測に基づく減速手法の構築 では、熟練ドライバの走行データ収集実験の概要と、取得した走行データを示す。また、歩行者飛び出し予測に基づく無信号交差点における規範速度モデルを構築し、構築した手法により導出される速度プロファイルと運転指導員の速度プロファイルをシミュレーションにより比較する。

第 4 章 単路における歩行者・自転車の移動軌跡の分析 では、交通調査の結果を参考に決定した対象場面に対し、歩行者・自転車の移動軌跡の取得実験について述べ、収集した移動軌跡の分析を行う。

第 5 章 単路における歩行者・自転車の移動予測手法の構築 では、移動軌跡の分析結果に基づき、ポテンシャルフィールド法を用いて移動予測手法を構築する。

第 6 章 移動予測手法に基づく自動減速システムの有効性検証 では、歩行者・自転車の移動予測に基づく自動減速制御手法について述べ、移動予測手法と自動減速制御の有効性を確認する。

第 7 章 結論 では、本論文のまとめと得られた知見、今後の課題を示す。

第 2 章

運転行動解析と交通調査

第 1 章で、歩行者の飛び出しや進路変更などの危険を予測し、事前に減速する必要性を述べた。そこで、第 2 章では本研究で対象とする場面を決定するための運転指導員の運転行動解析および交通調査について述べる。

2.1 無信号交差点における運転指導員の運転行動解析

第 1 章で述べた無信号交差点において、どのような運転行動が規範的であるかを把握するため、本節では常時記録型ドライブレコーダを用いた運転指導員の市街地走行データ収集と、収集したデータの解析結果について示す。

2.1.1 実験車両

運転指導員の運転行動データ収集は、図 2.1.1 に示す実験車両 **ASTERISK (Active Safety Technology by Estimating RISK)**、トヨタ自動車株式会社製、マーク X) を用いて行う。ASTERISK には、常時記録型ドライブレコーダ (アイティエス 21 企画社製) が搭載されており、車両前方 3 方向、車両後方、ドライバの顔、足元の計 6 方向の映像を記録するためのカメラと、車両速度、前後方向加速度、ブレーキ圧等のデータ取得のためのドライブレコーダ本体により構成されている。ドライブレコーダはデータ取得サンプリング周波数 30 Hz で動作する。

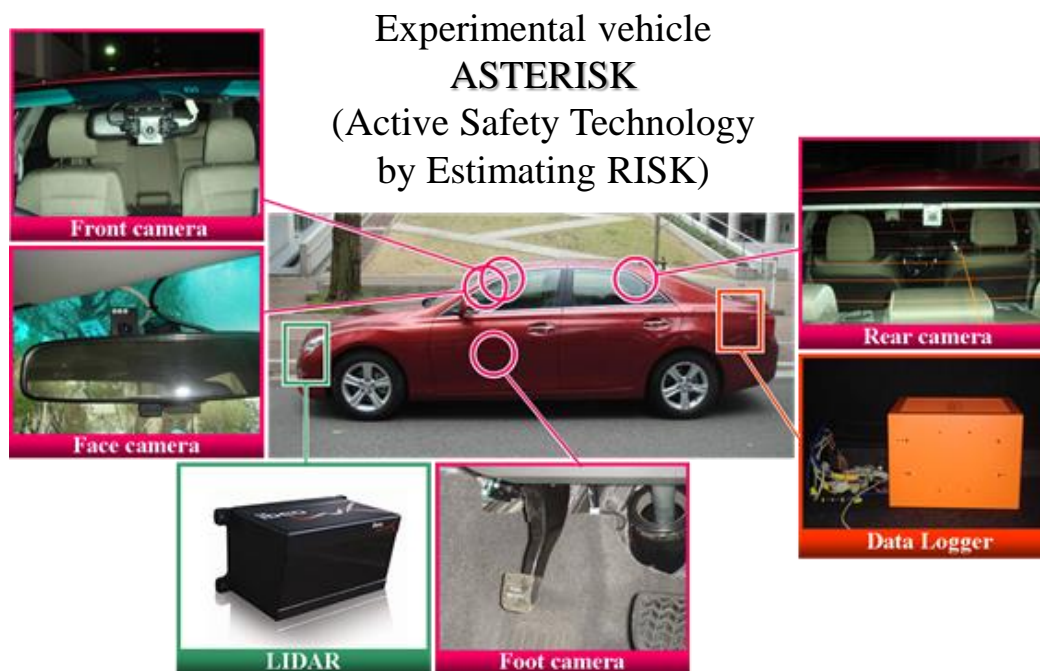


Fig. 2.1.1 Experimental vehicle

ドライブレコーダにより記録した走行データを図 2.1.2 に示す。図 2.1.2 の①が映像データ, ②がドライブレコーダより取得した速度等の各種データ, ③は GPS より取得した位置情報データである。

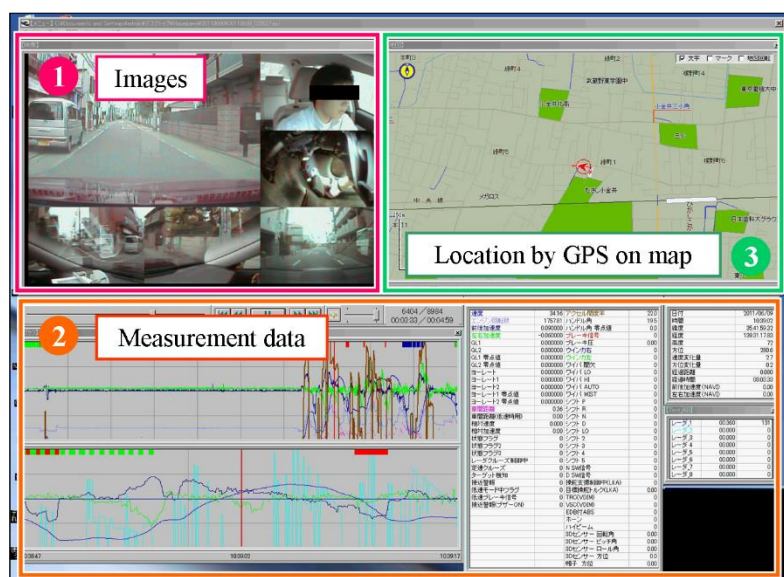


Fig. 2.1.2 Driving data viewer

2.1.2 運転指導員

運転指導員による市街地走行データ取得のため、都内の自動車教習所にご協力いただいた。被験者の選定条件を表 2.1.1 に示す。表 2.1.1 の各選定条件に当てはまるそれぞれの指導員を、教習所の代表者に選定していただいた。被験者のデータを表 2.1.2 に示す。

Table 2.1.1 Selecting condition of subjects

1. The person who has testing coach skill
2. The person who is true of all the following contents A) License acquisition years are over 20 years B) Coaching years are over 10 years C) Annual running distance with 4 wheel vehicle is over 5,000km D) In driving, the driver have consciousness of safety driving. And the driver have never caused an accident and had never violation
3. The person who is true of all the following contents A) License acquisition years are over 10 years and less than 20 years B) Coaching years are over 5 years C) Annual running distance with 4 wheel vehicle is over 5,000km D) In driving, the person have consciousness of safety driving. And the driver have never caused an accident and had never violation

Table 2.1.2 Data of instructors

Subject	Skill	Sex	Age	Coaching year	License acquisition years
E1	Testing coach	male	41	14years and 7 months	22years and 4months
E2	Driving coach	male	54	16years	36years and 8months
E3	Driving coach	male	36	6years	16years and 11months

2.1.3 実験条件

実験条件を以下に示す。

- 被験者：運転指導員 3 名
- 実験経路：全長約 6.1km 所要時間約 20 分

- 実験時間帯：午前8時30分～9時30分
- 天候：晴または曇
- 走行周数：各被験者1周 / 1日×6日 = 6周

実験経路を図2.1.3に示す。実験経路における交差点の総数は、優先側道路の交差点のみで107交差点あり、各交差点にID付けを行った。非優先側道路の交差点は1交差点である。



Fig. 2.1.3 Route of experiment

2.1.4 運転行動解析

図 2.1.3 の実験経路に示す ID8, 94 の交差点を図 2.1.4 に示す。



Fig. 2.1.4 Intersection ID8 and ID94

図 2.1.4 に示すように ID8 の交差点については路側帯が存在するため，路側帯がドライバの運転行動に与える影響を考慮し，路側帯の存在しない ID94 の無信号交差点について熟練ドライバの運転行動の解析を行う．取得した運転行動データのうち，交差点に進入する際に他車両や歩行者などの減速要因が存在する場合を除き，熟練ドライバ E1, E2, E3 それぞれについて，ID94 の交差点を通過する際の運転行動データについて解析を行う．熟練ドライバ E1, E2, E3 の解析対象の運転行動データを図 2.2.5 から図 2.2.7 に示す．図 2.2.5 から図 2.2.7 は，縦軸が上から速度 [km/h]，前後方向加速度 [m/s²]，横軸は車両前端から交差点入口までの距離 x_{int} [m]であり， $x_{nt} = 0$ の位置は，自車先端が交差点入り口の角に到達した時点を示している．

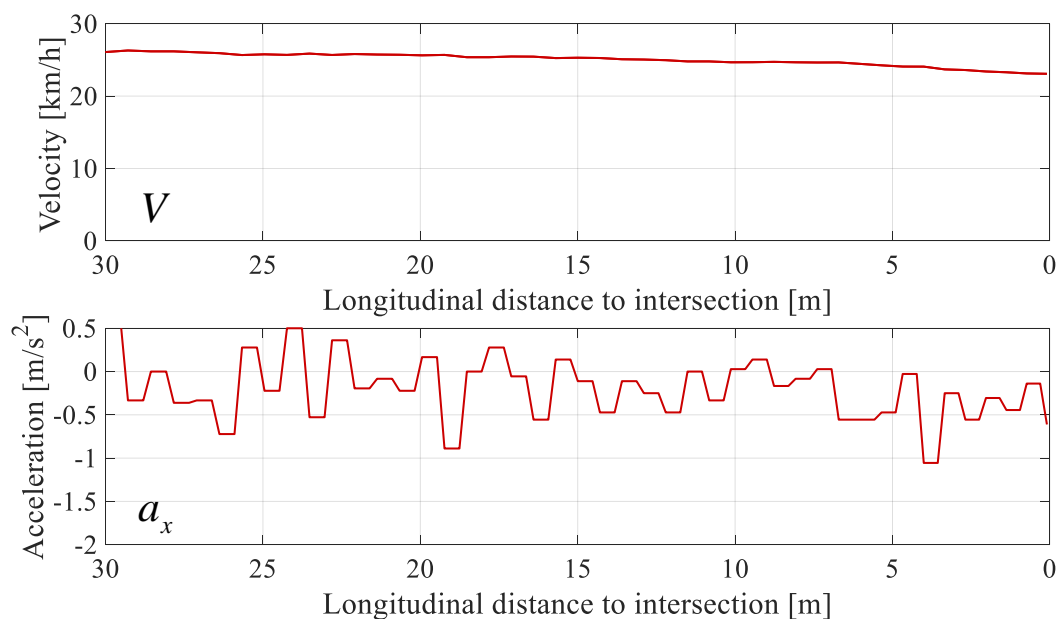
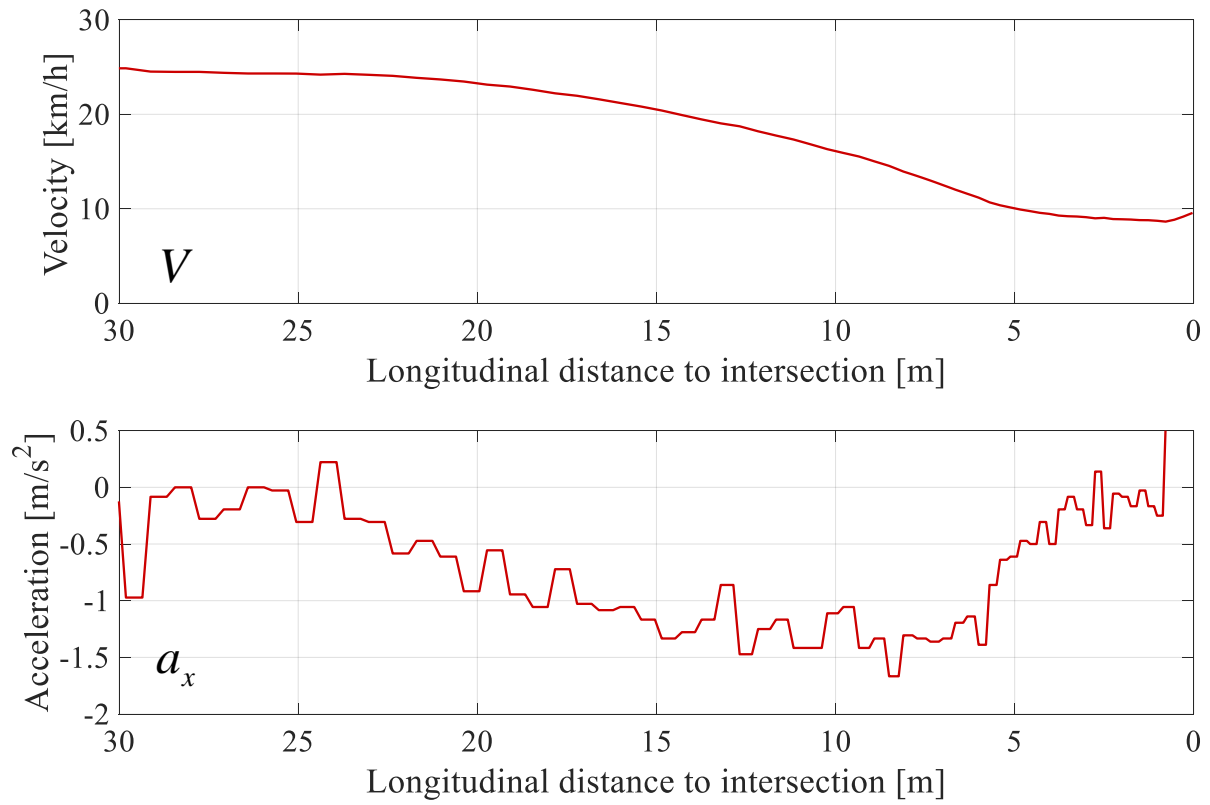
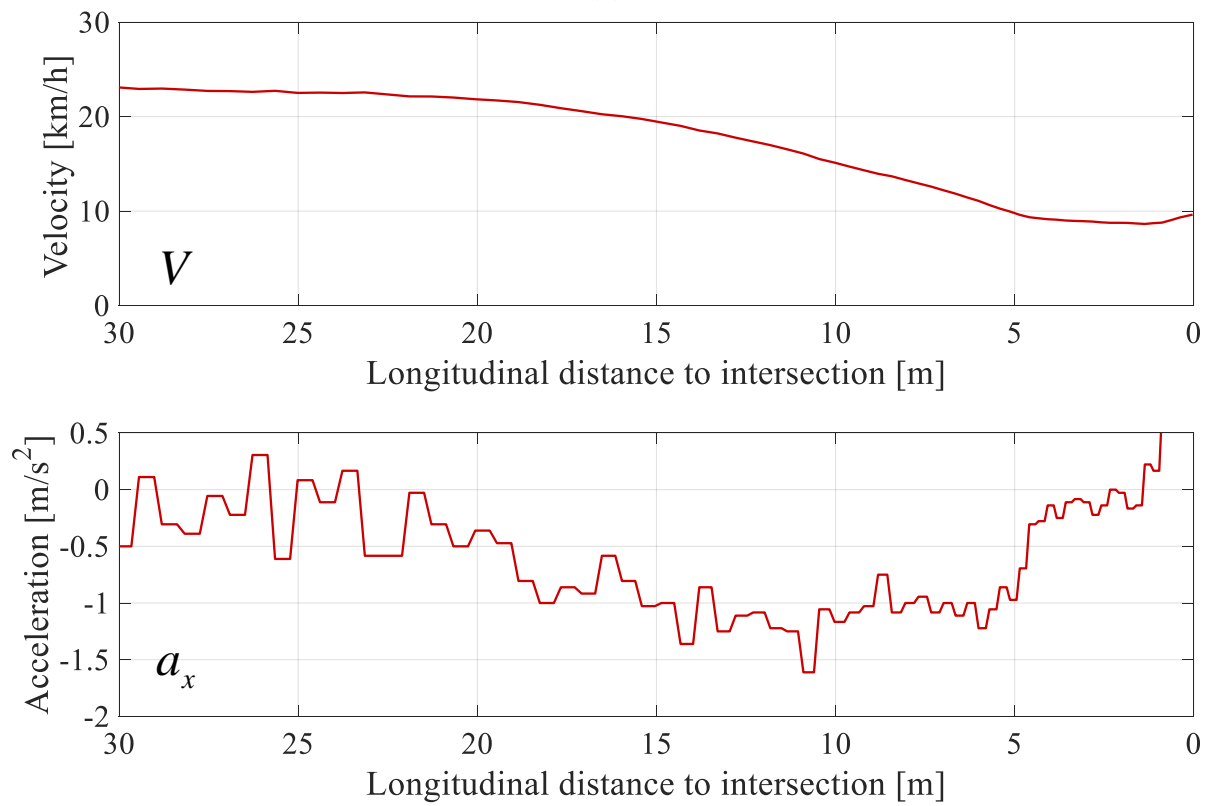


Fig. 2.1.5 Measured data of expert driver E1 at intersection ID94

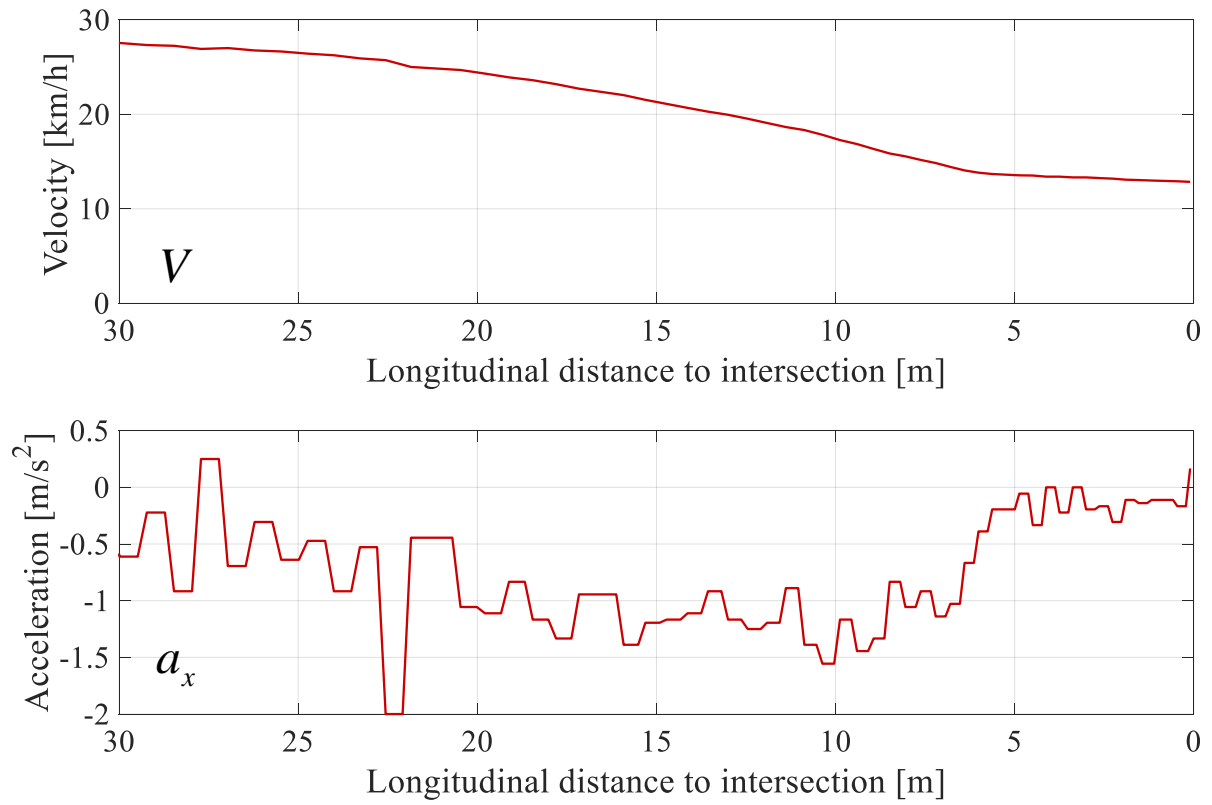


(a)

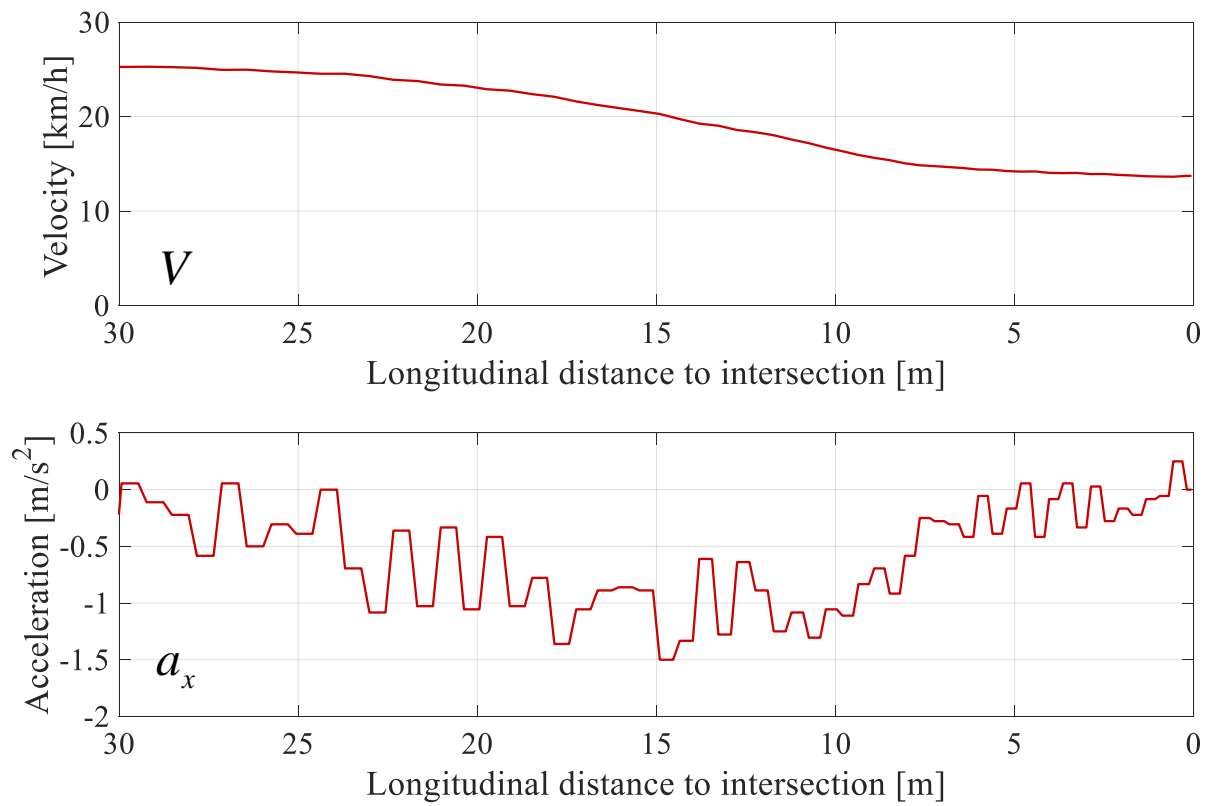


(b)

Fig. 2.1.6 Measured data of expert driver E2 at intersection ID94



(a)



(b)

Fig. 2.1.7 Measured data of expert driver E3 at intersection ID94

次に無信号交差点進入時における自車速度と自車側面から道路境界までの横方向距離の関係について解析を行う。自車左側面から道路境界までの横方向距離の取得は、実験車両に搭載されたカメラの画像データにより行う。画像データより、車両中心からの横方向距離を取得するため、図 2.1.8 に示すように車両を静止させた状態で車両先端中心からの距離を測定し、実験車両に搭載されたカメラにより撮影した。図 2.1.8 に示す車両先端からの距離の基準を記録した画像データから、自車中心から道路境界までの横方向距離を計測するためのフレームを作成し、録画された運転指導員の走行画像から横方向距離を測定した。自車中心から道路境界までの横方向距離を計測するためのフレームを図 2.1.9 に示す。



Fig. 2.1.8 Preparation for Measurement of lateral distance from vehicle

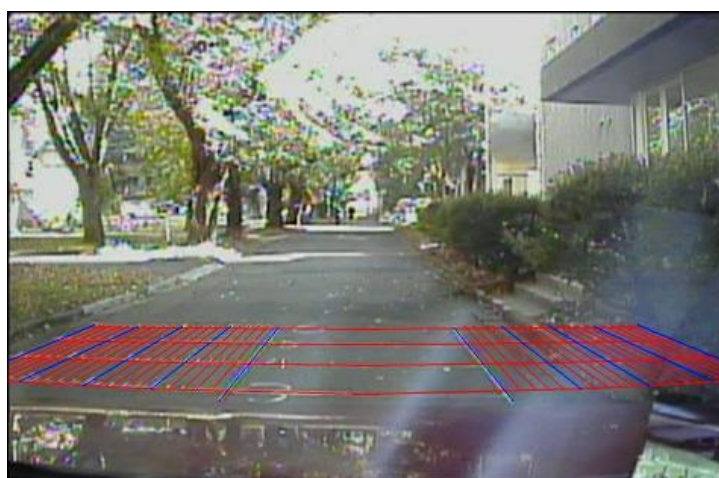


Fig. 2.1.9 Measurement of lateral distance from vehicle

図 2.1.5 について、熟練ドライバ E1 については交差点進入時に減速行動が見られなかったため、熟練ドライバ E2, E3 について解析を行う。熟練ドライバ E2, E3 の交差点進入速度と自車中心から道路境界までの横方向距離を表 2.1.3 に示す。

Table 2.1.3 Expert drivers behavior on the intersection

Expert driver ID	Velocity on intersection [km/h]	Lateral distance to road boundary [m]
E2(a)	24.8	2.4
E2(b)	23.1	2.4
E3(a)	27.7	2.7
E3(b)	26.1	2.7

図 2.1.5 から図 2.1.7 より、熟練ドライバの運転行動には個人差が存在するが、運転指導員は無信号交差点進入時に減速行動を行っており、無信号交差点における運転行動は再現性があることがわかる。これより熟練ドライバは図 2.1.4 に示す無信号交差点の死角から歩行者などが飛び出すことを予測し、減速行動をとっていると考えられる。表 2.1.3 から熟練ドライバ E3 は熟練ドライバ E2 に比べて交差点進入速度が高く、自車中心から道路境界までの横方向距離は大きいことがわかる。これは交差点における死角を考えたとき、自車中心から道路境界までの横方向距離と比例して交差点進入時の見通しが広がるためであり、熟練ドライバの減速行動は自車中心から道路境界までの横方向距離と関係があると考えられる。先行研究において、熟練ドライバの運転行動は模範とすべき運転行動であることが示されており(ポンサトーン 2012), 熟練ドライバの運転行動を危険予測運転行動モデルとして定式化することで、無信号交差点における対歩行者衝突事故防止につながると考えられる。

2.2 交通調査に基づく対象場面の選定

本研究で対象とする、一般単路において歩行者や自転車が自車両の走行に影響を及ぼす可能性のある場面を選定するため、交通調査を実施する。交通調査を行う道路の写真を図 2.2.1 に示す。この道路においては歩行者、自転車および自動車が路側帯と車道の双方を利用して通行する場面が多く見受けられることから、調査を実施するのに適当であると判断した。こ

の道路に対して定点カメラを設置し、朝 8 時から朝 9 時、および朝 10 時から朝 11 時の時間帯でデータを各 2 日間、計 4 日分の映像データを取得し、目視により交通状況を調査した。注目する対象としては、自動車の走行に影響を及ぼす可能性のある場面として、歩行者や自転車が道路脇から車道中央側へ移動している場面を集計する。ただし、歩行者や自転車の横断行動については、個々人の目的地が大きく影響していると考えられ、これを予測することは容易ではない。そのため、本研究ではこのような横断行動は対象外として扱う。

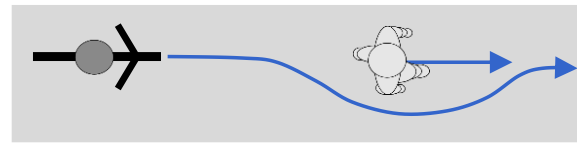


Fig. 2.2.1 The road where traffic survey was executed

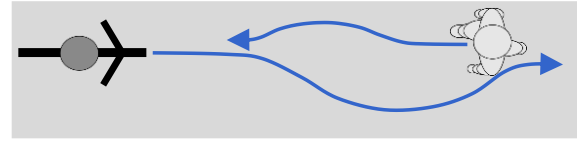
調査の間にカメラの前を通過した歩行者・自転車の交通量を表 2.2.1 に示す。日時によらず、歩行者より自転車が多い結果となっている。記録した動画中に見受けられた、歩行者・自転車が道路脇から道路の中心側へ膨らむような動きを見せた場面を図 2.2.2 に示す。図 2.2.2 の通り、追い越し、すれ違い、駐車車両などの静止物回避、脇道からの頭出し車両回避、駐車車両横での追い越しである。これらの場面の集計結果を表 2.2.2 に示す。

Table 2.2.1 The traffic of pedestrians and cyclists

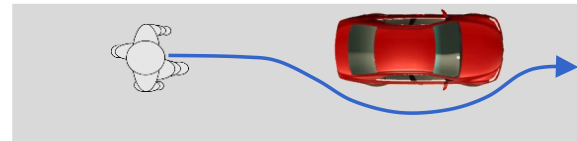
Subject	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Sum
	8:00~9:00		10:00~11:00		
Ped.	61	83	47	59	250
Cyc.	298	303	274	292	1167



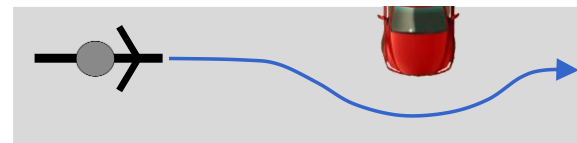
Overtake



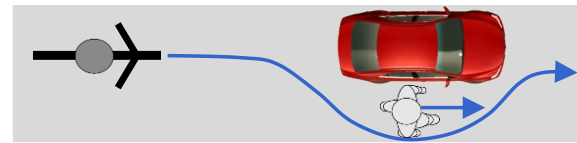
Passing



Avoiding parked vehicle



Avoiding vehicle waiting on intersection



Overtake on the side of parked vehicle

Fig. 2.2.2 Images of the observed scene

Table 2.2.2 The result of analysis

Scene	Subject	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Sum
		8:00~9:00		10:00~11:00		
Overtake	Cyc. - Ped.	21	26	6	13	66
	Cyc. - Cyc.	23	10	18	24	75
Passing	Ped. - Ped.	1	9	0	2	12
	Ped. - Cyc.	13	10	12	12	47
	Cyc. - Cyc.	4	8	3	3	18
Avoiding parked vehicle	Ped.	0	1	1	2	4
	Cyc.	1	15	56	32	104
Avoiding vehicle waiting on intersection	Ped.	1	0	0	0	1
	Cyc.	5	1	1	0	7
Overtake on the side of parked vehicle	Cyc. - Ped.	0	0	1	2	3

表 2.2.2 より、自転車が歩行者や他の自転車を追い越すために道路中央側へ移動する場面が多く見られた。また、自転車が駐車車両を回避するために道路中央側へ移動する場面も単独で多く見られたが、これは駐車車両の有無と、歩行者や自転車の交通量に大きく左右されることが考えられる。

まず単純な場面における移動予測手法を構築した後、複雑な場面へ移動予測手法を応用していくことを目標とする。そこで、歩行者と自転車の交通量の差を考慮し、単純な場面として歩行者が駐車車両を回避して移動する場면을対象として設定し、移動予測手法を構築する。その次に、交通調査において日時によらず多く観測された自転車の他者追い越し場면을複雑な場面として研究対象に設定し、移動予測手法を応用する。

2.3 まとめ

本章では、将来の自動運転システムに繋がる運転支援システムの概要について述べ、移動予測が必要となる対象場面を選定するため、運転指導員の運転行動解析と交通調査を実施した。それぞれの結果を踏まえ、本研究では無信号交差点と一般単路に注目し、無信号交差点における危険予測に基づく自動減速システムと、一般単路における移動予測に基づく自動減速システムを構築する。まず、一般単路における単純な場面として歩行者の駐車車両回避場面に対する移動予測手法を構築する。その次に、複雑な場面として自転車が他者を追い越す場面を設定し、これに対して移動予測手法を適用することを目指す。

第 3 章

無信号交差点における歩行者飛び出し予測に基づく自動減速手法の構築

第 3 章では，無信号交差点における歩行者飛び出し予測に基づく自動減速手法の構築について述べる．まず，無信号交差点における歩行者予測手法について示し，ポテンシャルフィールドの概念を用いた，歩行者飛び出し予測に基づく潜在的歩行者衝突リスクについて述べる．最後に歩行者衝突リスクを回避する自動減速手法について述べ，シミュレーションの結果を示す．

3.1 歩行者飛び出し予測

本節では無信号交差点進入時における，死角からの歩行者飛び出し予測について述べる．無信号交差点における自車と飛び出す可能性のある歩行者の関係を図 3.1.1 に示す．図 3.3.1 について，自車中心の先端から進行方向に x 軸，横方向に y 軸の移動座標系を設定する．時々刻々において歩行者が交差点の角から飛び出すことを想定し，前方予測位置が交差点に到達する時刻における，自車中心から予測歩行者までの y 方向距離 \tilde{y}_{ped} を求める．

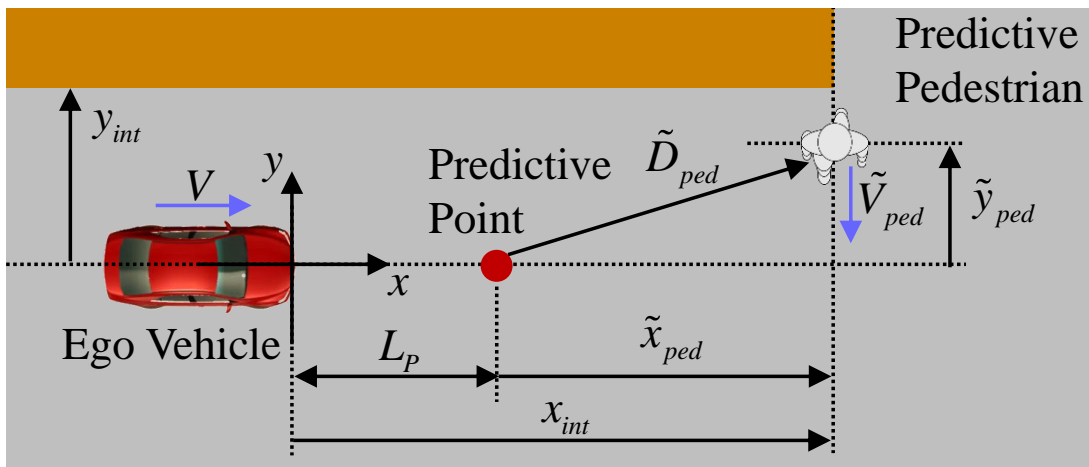


Fig. 3.1.1 Overview of predictive pedestrian in unsignalized intersections

図 3.1.1 に示すように自車先端から x 方向に L_p 前方の地点を前方予測位置とする。自車は直進状態のまま交差点に進入すると仮定すると、自車位置を原点とした移動座標系から見た、前方予測位置から予測歩行者までの x 方向距離 \tilde{x}_{ped} は式(3.1.1)で表される。

$$\tilde{x}_{ped} = x_{in} - L_p \quad (3.1.1)$$

前方予測位置が交差点入口に到達するまでの交差点到達予測時間 (Time-to-Intersection) \tilde{T}_{ii} は式(3.1.2)により算出される。

$$\tilde{T}_{ii} = \frac{\tilde{x}_{ped}}{V} = \frac{x_{in} - L_p}{V} \quad (3.1.2)$$

ただし、 V は自車速度である。

無信号交差点における歩行者の飛び出し場面で最も危険な場面として、交差点入口の死角から歩行者が飛び出す場合を考える。時々刻々の前方予測位置から予測歩行者までの y 方向距離 \tilde{y}_{ped} は交差点到達予測時間 \tilde{T}_{ii} を用いて式(3.1.3)で表される。

$$\tilde{y}_{ped} = \tilde{y}_{in} + \tilde{T}_{ii} \tilde{V}_{ped} \quad (3.1.3)$$

ただし、 \tilde{V}_{ped} は歩行者予測速度であり、歩行者飛び出し速度はヒヤリハットデータベースの分析から 1.0~1.5m/s が最も多いことを過去に報告されている(ウォンワイウィット 2012)。そこで本論文ではより急な歩行者の飛び出しを想定し、 $\tilde{V}_{ped}=1.5$ m/s とする。

式(3.1.2)、(3.1.3)から前方予測位置から予測歩行者までの y 方向距離 \tilde{y}_{ped} は式(3.1.4)で表すことができる。

$$\tilde{y}_{ped} = \tilde{y}_{in} + \tilde{T}_{ii} \cdot \frac{x_{in} - L_p}{V} \quad (3.1.4)$$

3.2 潜在的歩行者衝突リスク

本節では、3.1 節で述べた歩行者飛び出し予測に基づいた、無信号交差点進入時の潜在的歩行者衝突リスクについて述べる。まず 3.2.1 項にてリスクポテンシャルについて述べ、3.2.1 項で歩行者飛び出し予測に基づく、衝突回避のための潜在的歩行者衝突リスクの算出について述べる。

3.2.1 リスクポテンシャルの定義

まず、ポテンシャルフィールド法について述べる．ポテンシャルフィールド法とは主にロボットの経路選択に用いられる手法である．仮想的なポテンシャル場において、目的地は引力ポテンシャル、障害物は斥力ポテンシャルを発生すると考えるものであり、各ポテンシャル場の作用力によって移動物体の速度ベクトルの大きさと向きを決定し、経路決定を行う⁽¹¹⁾．図 3.2.1 に経路計画シミュレーションの一例を示す．

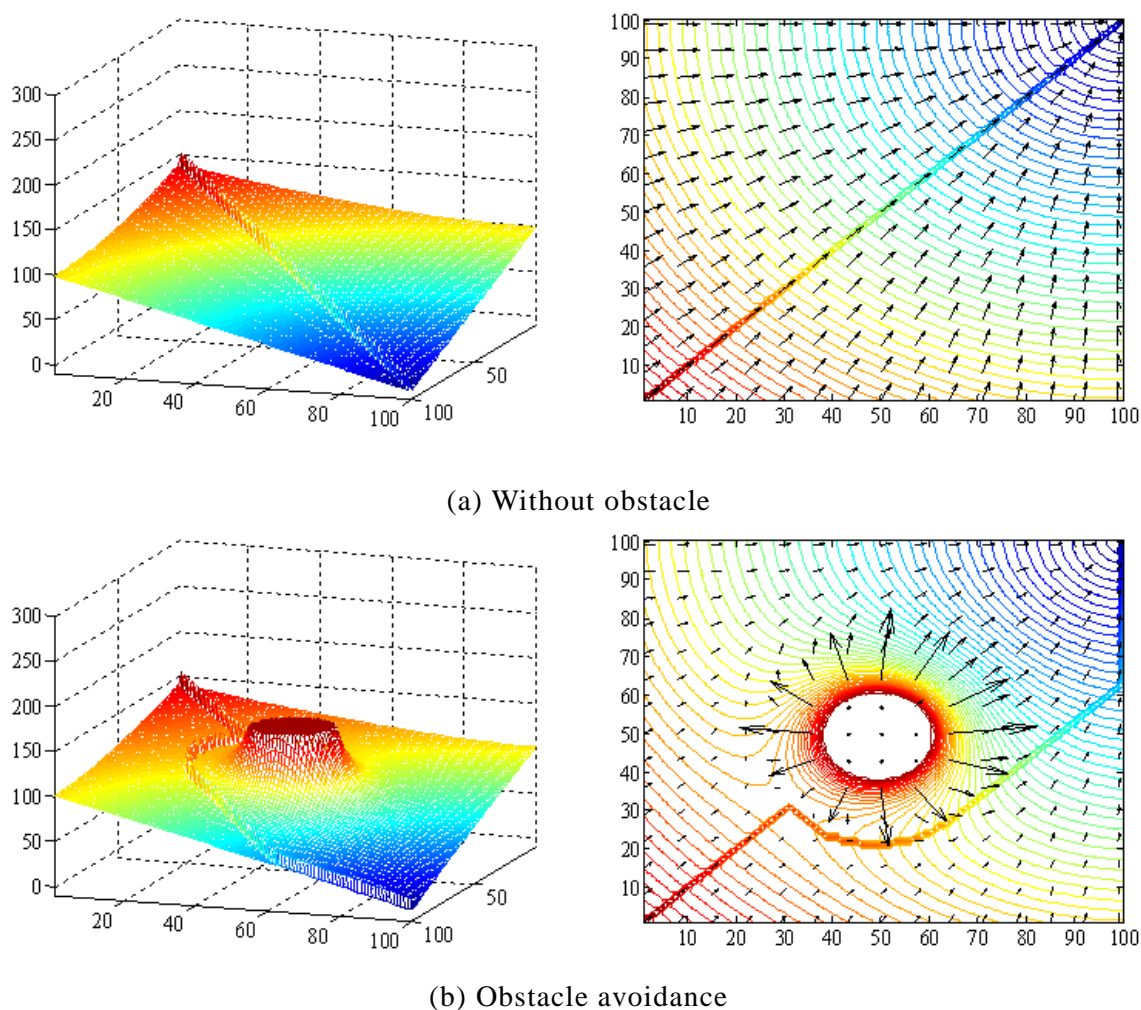


Fig. 3.2.1 One example of simulation results using potential field concept

本研究では、無信号交差点進入時に減速を行う自動減速手法の定式化を行うため、

引力ポテンシャルを発生する目的地は設定せず、歩行者を障害物として定義し、リスクポテンシャルから作用する斥力の車両前後方向成分の計算を行うことで目標速度の生成を行う。

本論文では、障害物により発生するリスクポテンシャルの発生源を前方予測位置の交差点到達予測時間 \tilde{T}_{ti} 秒後における予測歩行者位置とする。本論文では潜在的歩行者衝突リスクポテンシャル U_{int} をばねモデルを基本として、式(3.2.1)により定義する。

$$U_{int} = \frac{1}{2} k \left(\tilde{D}_{ped} - \tilde{D}_0 \right)^2 \quad (3.2.1)$$

ただし、 \tilde{D}_{ped} は前方予測位置から予測歩行者位置までの距離、 \tilde{D}_0 はリスクポテンシャルが作用し始める予測歩行者からの最大距離、 k_{int} はリスクポテンシャルのゲインであり、 \tilde{D}_0 および k_{int} の決定法については後述する。ポテンシャルフィールド法より、式(3.2.1)で定義されるリスクポテンシャルを自車の前後方向で偏微分を行うことで自車の前後方向に作用する斥力が算出される。リスクポテンシャルから予測位置に作用する斥力 F を式(3.2.2)に示す。

$$F = -\frac{\partial U_{int}}{\partial x} = k_{int} \left(\tilde{D}_{ped} - \tilde{D}_0 \right) \frac{\tilde{x}_{ped}}{\tilde{D}_{ped}} \quad (3.2.2)$$

3.2.2 衝突回避のための潜在的歩行者衝突リスク

リスクポテンシャルが作用し始める最大距離 \tilde{D}_0 は熟練ドライバが減速を開始したときの、前方予測位置と予測歩行者の直線距離として求める。先行研究において、運転指導員の減速タイミングは交差点到達予測時間が 2.5 sec から 4.0 sec の間にあることが報告されている(ボンサトーン 2012)。そこで本論文では減速開始タイミングを前方予測位置の交差点到達予測時間 \tilde{T}_{ti} が $\tilde{T}_{ti-0} = 3.5$ sec に達したときとする。このとき、前方予測位置から予測歩行者までの直線距離 \tilde{D}_0 は、式(3.2.3)により求めることができる。

$$\tilde{D}_0 = \sqrt{\tilde{x}_{ped}^2 + \tilde{y}_{ped}^2} = \sqrt{\left(\tilde{T}_{ti-0} \cdot V_0 \right)^2 + \left(y_{int} - \tilde{V}_{ped} \cdot \tilde{T}_{ti-0} \right)^2} \quad (3.2.3)$$

ただし V_0 は減速開始時の自転車速度である。

次に予測歩行者に対して減速を行う際、衝突を回避するための条件について述べる。熟練ドライバは潜在的歩行者衝突リスクを計算し、予測歩行者と衝突しない条件を満たすように減速し、交差点に進入していると仮定する。前方予測位置と予測歩行者の位置の関係を図 3.2.1 に示す。図 3.2.2 に示すように、交差点進入時に前方予測位置と歩行者予測位置が衝突しないための条件は、予測歩行者位置から式(3.2.4)のように表すことができる。

$$y_{i+n-t} - \tilde{V} \frac{\tilde{x}_{ped} - d}{V} \geq \frac{w_{car}}{2} + y_{safe} \quad (3.2.4)$$

ただし w_{car} [m] は車両横幅， y_{safe} [m] は横方向安全距離であり，走行する際に車両と歩行者の間にドライバが最低限取るべき距離とした。本論文では $y_{safe} = 0.5\text{m}$ とする。

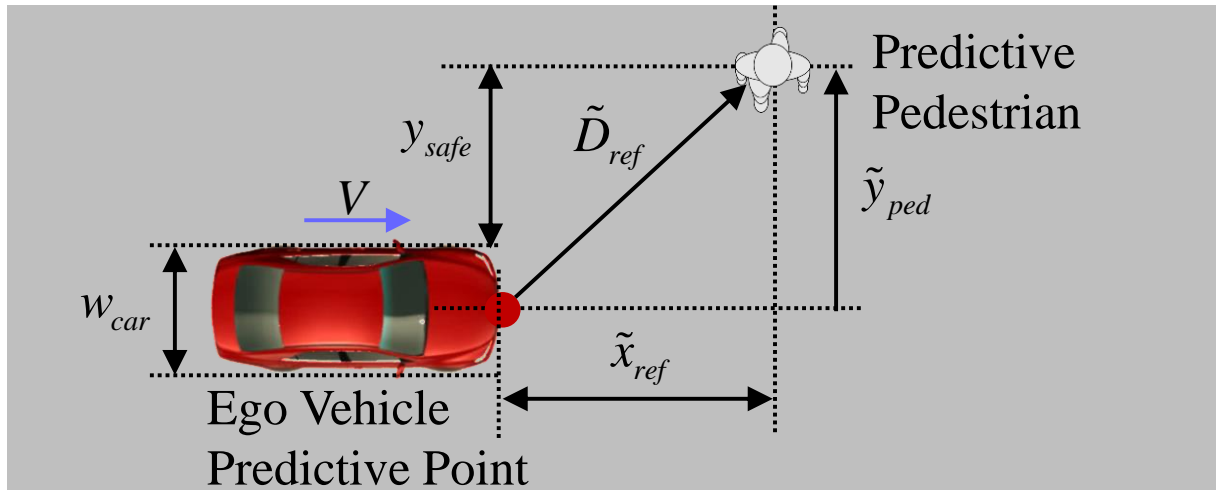


Fig. 3.2.2 Relation between vehicle predictive point and predictive pedestrian for collision avoidance

式(3.2.4)から前方予測位置と歩行者予測位置が衝突しない限界条件として式(3.2.5)が得られる。

$$y_{i+n-t} - \tilde{V} \frac{\tilde{x}_{ped} - d}{V} \geq \frac{w_{car}}{2} + y_{safe} \quad (3.2.5)$$

また，熟練ドライバは交差点に進入する際，飛び出してきた歩行者に対して停止して衝突回避できる速度を設定していると仮定すると，条件は制動距離の式から算出することができ，式(3.2.6)で表される。

$$\tilde{x}_{ped} = \frac{V^2}{2a_{int}} \quad (3.2.6)$$

ただし a_{int} [m/s²] 交差点に進入する際の最大減速度であり，交差点進入時最大減速度と定義する．本論文では $a_{int} = 2.5\text{m/s}^2$ とする．

熟練ドライバは以上の式(3.2.5)，(3.2.6)の関係を満たす速度を目標として減速を行うと仮定すると，式(3.2.5)，(3.2.6)を満たす速度と，そのときの前方予測位置から予測歩行者までの x 方向距離は式 (3.2.7)，(3.2.8) で表される．

$$V_{ref} = 2a_{int} \cdot \frac{y_{int} - \left(\frac{w_c a_{int}}{2} + r y \right)}{\tilde{V}_{ped}} \quad (3.2.7)$$

$$\tilde{x}_{ref} = 2a_{int} \left\{ \frac{y_{int} - \left(\frac{w_c a_{int}}{2} + r y \right)}{\tilde{V}_{ped}} \right\}^2 \quad (3.2.8)$$

ただし， V_{ref} [m/s] は式(3.2.5)，(3.2.6)を満たす速度であり，交差点進入参照速度と定義する． \tilde{x}_{ref} は自車速度が V_{ref} の時の前方予測位置から交差点入口までの距離であり，交差点進入参照距離と定義する．このとき，前方予測位置から予測歩行者までの直線距離 \tilde{D}_{ref} は式(3.2.9)のように求まる．

$$\tilde{D}_{ref} = \sqrt{x^2 + r y^2} = \sqrt{4a_{int}^2 \left\{ \frac{y_{int} - \left(\frac{w_c a_{int}}{2} + r y \right)}{\tilde{V}_{ped}} \right\}^4 + y^2} \quad (3.2.9)$$

交差点進入時最大減速度 a_{int} ，歩行者予測速度 \tilde{V}_{ped} ，自車中心から道路境界までの横方向距離 y_{int} を変化した場合の交差点進入参照速度 V_{ref} の変化を図 3.2.3(a)に，交差点進入参照速度 V_{ref} と交差点進入時最大減速度 a_{int} ，歩行者予測速度 \tilde{V}_{ped} の関係を図 3.2.3(b)に示す．

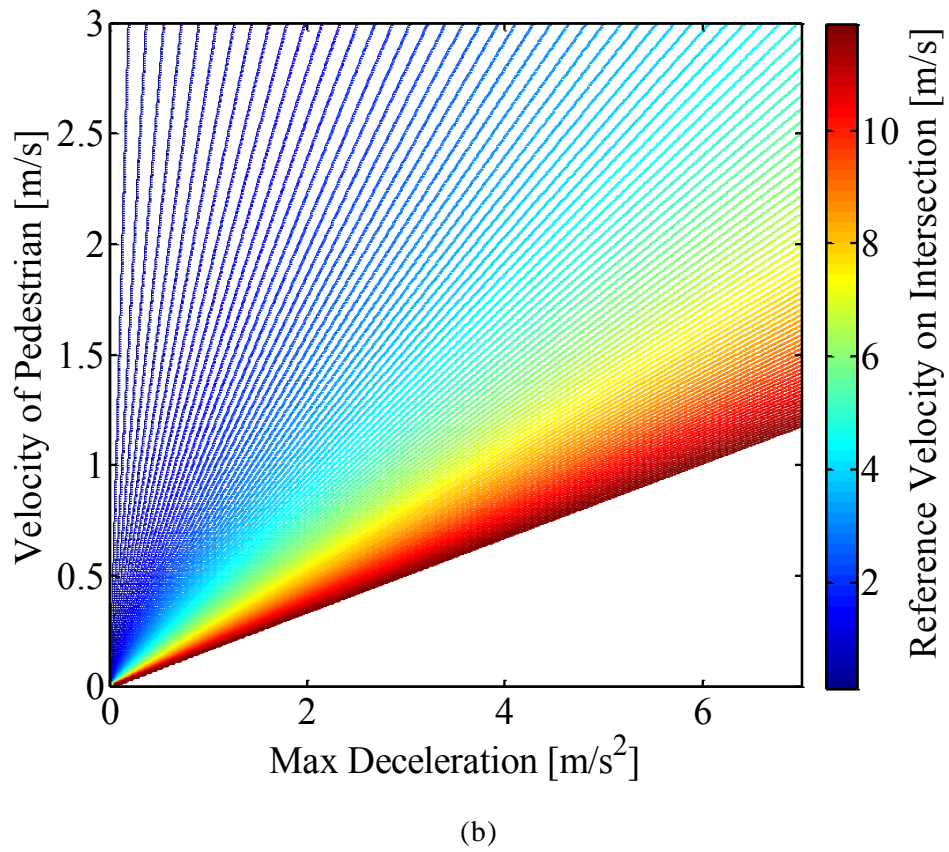
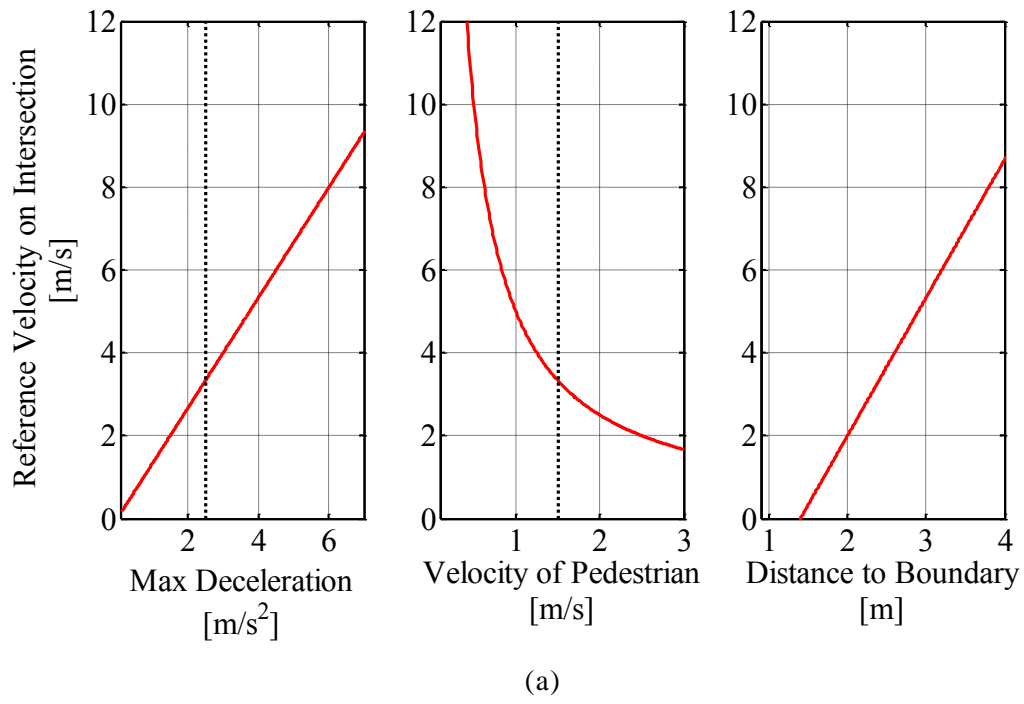


Fig. 3.2.3 Variation of reference velocity on intersection

図 3.2.1, 図 3.2.3 から交差点進入時最大減速度と, 自転車中心から道路境界までの距離が大きくなるほど交差点進入時参照速度は大きくなり, 歩行者予測速度が大きくなるほど交差点進入時参照速度は小さくなる関係にあることがわかる.

次に式(3.2.1)で定義されたリスクポテンシャルのゲインの算出を行う. 実車におけるブレーキ操作による減速を, 仮想的なポテンシャル場における運動に置き換えることで, 物理エネルギーの保存則からリスクポテンシャルのゲインを算出する. 減速開始前の自転車が持つ運動エネルギー U_{V_0} は式(3.2.10)で表せる.

$$U_{V_0} = \frac{1}{2} m_0^2 \quad (3.2.10)$$

ただし m は車両質量, V_0 は減速開始前の自転車速度である.

まず, 減速中に交差点進入時最大減速度が生じない場合について述べる. ある地点において前方予測位置と予測歩行者距離が \tilde{D}_{ref} のときのポテンシャル $U_{\tilde{D}_{ref}}$ は初期状態からの増加量として式(3.2.11)で表せる.

$$U_{\tilde{D}_{ref}} = \frac{1}{2} k_{int} (\tilde{D}_0 - \tilde{D}_{ref})^2 \quad (3.2.11)$$

このとき前方予測位置の速度は V_{ref} なので, 運動エネルギー $U_{V_{ref}}$ は式(3.2.12)で表される.

$$U_{V_{ref}} = \frac{1}{2} m V_{ref}^2 \quad (3.2.12)$$

式(3.2.10), (3.2.11), (3.2.12)を用いてエネルギー保存則を立てると, 図 3.2.4, 式(3.2.13)のように表すことができる.

$$U_{V_0} = U_{\tilde{D}_{ref}} + U_{V_{ref}} \Leftrightarrow \frac{1}{2} m V_0^2 = \frac{1}{2} k_{int} (\tilde{D}_0 - \tilde{D}_{ref})^2 + \frac{1}{2} m V_{ref}^2 \quad (3.2.13)$$

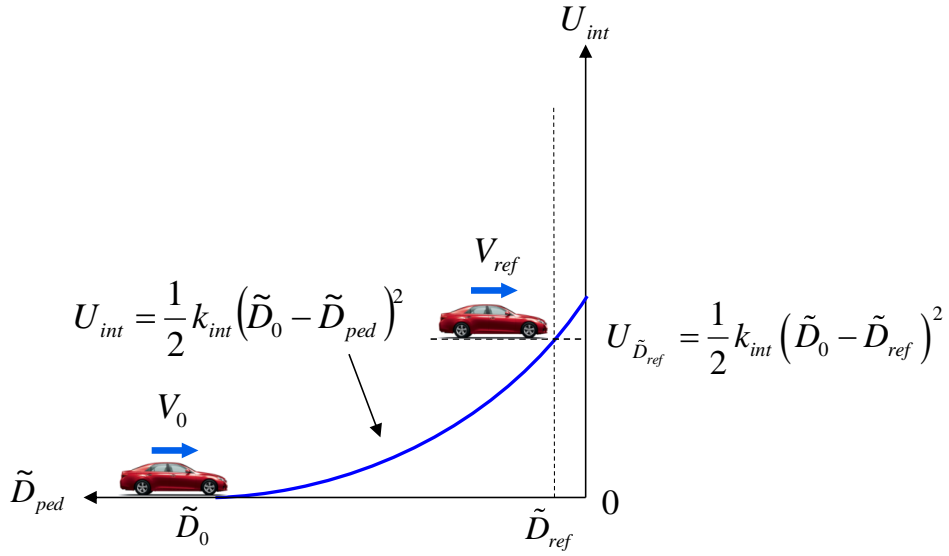


Fig. 3.2.4 Schema diagram of the law of conservation of energy in potential field

式(3.2.13)を解くことで、リスクポテンシャルのゲイン k_{int} を算出することができる。
算出されたゲイン k_{int} を式(3.2.14)に示す。

$$k_{int} = \frac{m(V_0^2 - V_{ref}^2)}{(\tilde{D}_0 - \tilde{D}_{ref})^2} \quad (3.2.14)$$

次に減速中に交差点進入時最大減速度 a_{int} が生じる場合について述べる。前方予測位置がリスクポテンシャルから受ける斥力と前後方向の減速度 a の関係は、式(3.2.15)により表される。

$$a = \frac{F}{m} \quad (3.2.15)$$

式(3.2.15)から最大減速度が生じるときの最大斥力 $F_{max-int}$ は式(3.2.16)で表される。

$$F_{max-int} = m a_{int} \quad (3.2.16)$$

これより、交差点進入時最大減速度と前方予測位置から予測歩行者までの距離の関係は式(3.2.17)で表される。

$$F_{max-int} = - \frac{\partial U_{int}}{\partial \tilde{D}} = k (\tilde{D}_0 - \tilde{D}_{ref}) \quad (3.2.17)$$

ただし、 $\tilde{D}_{a_{int}}$ は交差点進入時最大減速度 a_{int} が生じるときの前方予測位置から予測歩

行者位置までの距離である。

前方予測位置が受ける斥力が式(3.2.16)で表される最大斥力を超えないためには、最大減速度が生じた後のリスクポテンシャルの増加率は ma_{int} のまま一定であることが条件となる。 $\tilde{D}_{ped} < \tilde{D}_{a_{int}}$ のとき、前方予測位置が受ける斥力は式(3.2.18)により表される。

$$F = -\frac{\partial U_{i_{n=t}}}{\partial x} = m_i q \frac{\tilde{x}_{p_e}}{\tilde{D}_{p_e}} \quad (3.2.18)$$

式(3.2.18)について斥力が最大になるのは $\tilde{x}_{ped} = \tilde{D}_{ped}$ のときである。よって式(3.2.17)から最大減速度に到達したときの前方予測位置から予測歩行者までの距離 $\tilde{D}_{a_{int}}$ は式(3.2.19)のように表される。

$$\tilde{D}_{a_{int}} = \tilde{D}_0 - \frac{F_{max-int}}{k_{int}} = \tilde{D}_0 - \frac{ma_{int}}{k_{int}} \quad (3.2.19)$$

減速度が交差点進入時最大減速度となったときのポテンシャル $U_{a_{int}}$ は $\tilde{D}_{a_{int}}$ を用いて式(3.2.20)により表される。

$$U_{a_{int}} = \frac{1}{2} k_i (\tilde{D}_{a_{int}})^2 \quad (3.2.20)$$

減速度が最大となった時点から、前方予測位置から予測歩行者距離までの距離が \tilde{D}_{ref} になるまでのポテンシャルは線形に増加し、増加量は式(3.2.21)により表される。

$$U_{\tilde{D}_{ref}} = m_i q \left(\tilde{D}_{a_{int}} - \tilde{D}_{ref} \right) \quad (3.2.21)$$

式(3.2.10), (3.2.12), (3.2.20), (3.2.21)を用いてエネルギー保存則を立てると、図 3.2.5, 式(3.2.22)のように表すことができる。

$$\begin{aligned} U_{V_0} &= U_{V_{ref}} + U_{a_{int}} + U_{\tilde{D}_{ref}} \\ \Leftrightarrow \frac{1}{2} m V_0^2 &= \frac{1}{2} m V_{ref}^2 + \frac{1}{2} k_{int} (\tilde{D}_0 - \tilde{D}_{a_{int}})^2 + ma_{int} (\tilde{D}_{a_{int}} - \tilde{D}_{ref}) \end{aligned} \quad (3.2.22)$$

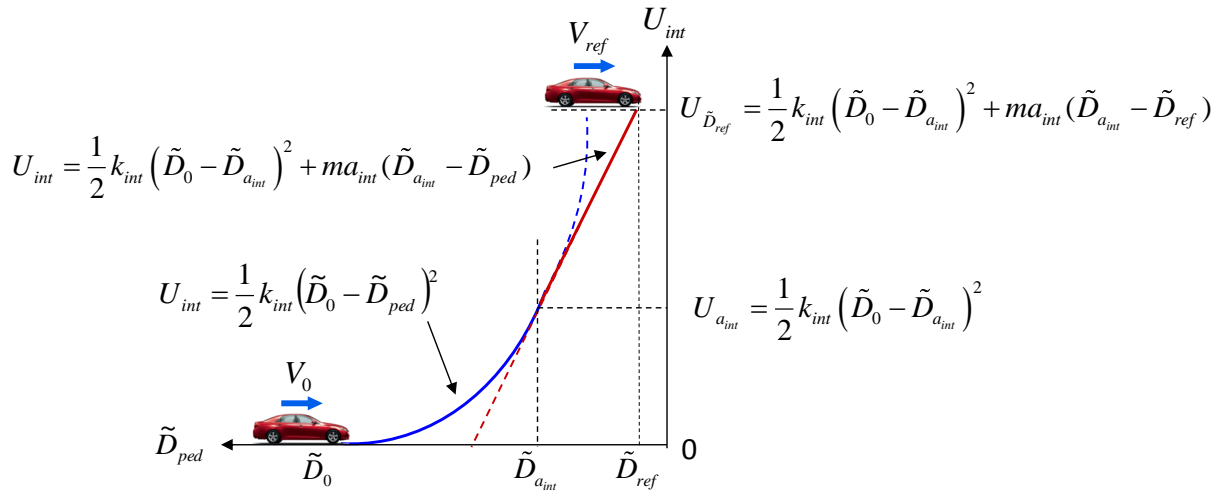


Fig. 3.2.5 Schema diagram of the law of conservation of energy in potential field

式(3.2.22)を解くことで，最大減速度に到達するときのリスクポテンシャルのゲイン k_{int} を算出することができる．算出されたゲイン k_{int} を式(3.2.23)に示す．

$$k_{int} = \frac{ma_{int}}{2(\tilde{D}_0 - \tilde{D}_{ref}) - (V_0^2 - V_{ref}^2)} \quad (3.2.23)$$

式(3.2.14)，(3.2.23)から，リスクポテンシャルのゲインの算出をまとめたものを式(3.2.24)に示す．

$$k_{int} = \begin{cases} \frac{m(V_0^2 - V_{ref}^2)}{(\tilde{D}_0 - \tilde{D}_{ref})^2} & \text{if } \tilde{D}_{a_{int}} < \tilde{D}_{ref} \\ \frac{ma_{int}}{2(\tilde{D}_0 - \tilde{D}_{ref}) - (V_0^2 - V_{ref}^2)} & \text{if } \tilde{D}_{a_{int}} \geq \tilde{D}_{ref} \end{cases} \quad (3.2.24)$$

3.3 自動減速手法

本節では 3.2 節で定義したリスクポテンシャルに基づいて，無信号交差点において減速を行う自動減速手法を構築する．図 3.2.2 に示した通り，ドライバは自車位置から L_P [m] 前方に前方予測位置を設定しているものと仮定する．前方予測距離 L_P の値の決定法は後述する．減速開始タイミングは 3.1 節で述べたように，前方予測位置における交差点到達予測時間 \tilde{T}_{ti} が $\tilde{T}_{ti-0} = 3.6$ sec に達したときとする．図 3.3.2 に自動減速手法のブロック線図を示す．

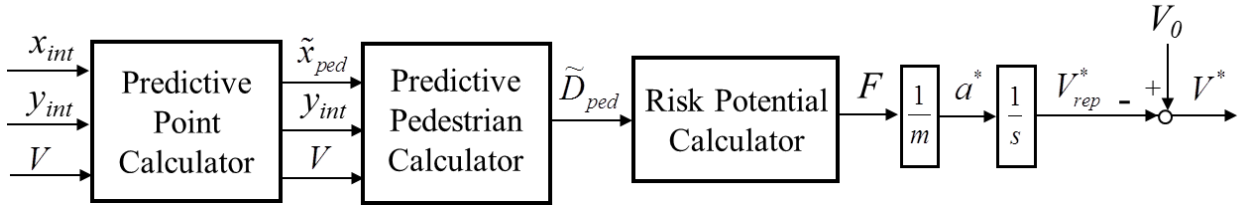


Fig. 3.3.2 Block diagram of diver model

図 3.3.2 に示すように，ドライバはまず自車位置に対する前方予測位置の算出を行い，無信号交差点における予測歩行者の位置を算出する．歩行者飛び出し予測を行うことで，無信号交差点における潜在的な歩行者衝突リスクの予測を行う．算出された潜在的歩行者衝突リスクから，前方予測位置における斥力を算出し，自車位置における減速力として用いる．

減速開始後，自車両はリスクポテンシャルから前方予測位置に作用する斥力 F に基づいて減速を行う．目標減速度 a^* は式 (3.3.1) により表される．

$$a^* = \frac{F}{m} \quad (3.3.1)$$

目標速度 V^* は式 (3.3.2) により表される．

$$V^* = V_0 - \int a^* dt = V_0 - \int \frac{F}{m} dt \quad (3.3.2)$$

ただし V_0 は減速開始前の初速度である．

3.4 減速シミュレーション

本節では，3.3 節で述べた自動減速手法を用いた無信号交差点進入時の減速シミュレーションを行ったので，その結果について示す．3.4.1 項でシミュレーション条件について述べ，3.4.2 項でシミュレーションに基づく前方予測距離の決定について述べ，3.4.3 項で無信号交差点進入時のシミュレーション結果について熟練ドライバの運転行動との比較を行う．

3.4.1 シミュレーション条件

シミュレーションに用いる各パラメータを表 3.4.1 に示す.

Table 3.4.1 Parameter value of simulation

Definition	Symbol	Value	Unit
Vehicle weight	m	1500	kg
Vehicle width	d	1.8	m
Road width	w	5.8	m
Safety distance	y_{safe}	0.5	m
Max deceleration	a_{max}	2	m/s ²
Predictive pedestrian velocity	\tilde{V}_{ped}	1.5	m/s

シミュレーションにおける自車の初期状態は第 2 章で述べた熟練ドライバと同様の条件とし, 3.3 節で述べた自動減速手法と熟練ドライバの運転行動の比較を行う. 初期条件を表 3.4.2 に示す.

Table 3.4.2 Parameter value of simulation in Expert driver

Symbol	Value	Unit
V_0	E2(a) : 24.9	km/h
	E2(b) : 23.1	
	E3(a) : 27.6	
	E3(b) : 25.4	
y_{int}	E2(a) : 2.4	m
	E2(b) : 2.4	
	E3(a) : 2.7	
	E3(b) : 2.7	

3.4.2 前方予測距離のパラメータ決定

本項ではシミュレーションに基づいて前方予測距離 L_P の決定を行う．3.4.1 項で示した熟練ドライバ E2, E3 の各 2 回の走行条件に基づいて自動減速のシミュレーションを行い，交差点手前 30m 前から時々刻々の熟練ドライバの速度 V_{expert} と自動減速手法により算出された目標速度 V^* の誤差の評価を行うことにより決定する．速度誤差の評価は 2 乗誤差により行うものとし，評価式を式 (3.4.1) に示す．

$$V_{error} = \sum (V^* - V)^2 \quad (3.4.1)$$

誤差の評価範囲は交差点手前 30m 前から交差点入口までとし，前方予測距離 L_P は 0.1m から 10.0m まで 0.1m ごとに変化させ，誤差が最少となる前方予測距離を算出する．

E2(a)の結果を表 3.4.3, E2(b)の結果を表 3.4.4, E2(a)の条件における結果を表 3.4.5, E2(b)の結果を表 3.4.6 に示す．

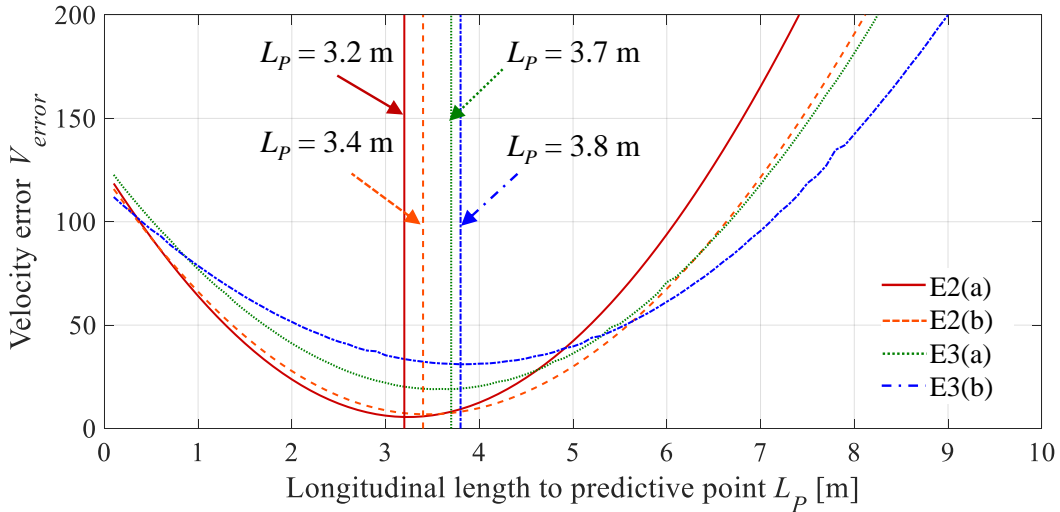


Fig. 3.4.1 Velocity error of driver model and expert drivers

図 3.4.1 より速度誤差が最小となる前方予測距離は，E2(a)の条件において $L_P = 3.2\text{m}$ ，E2(b)の条件において $L_P = 3.4\text{m}$ ，E3(a)の条件において $L_P = 3.7\text{m}$ ，E3(b)の条件において $L_P = 3.8\text{m}$ であることがわかる．以上の結果から自動減速手法における前方予測距離を，各条件における平均値をとることにより決定する．結果を式(3.4.2)に示す．

$$L_p = (3 \cdot 2 + 3 + 4 \cdot 0) \cdot 7 \cdot 3 = \quad (3.4.2)$$

3.4.3 シミュレーション結果

熟練ドライバ E2(a)の条件における交差点進入時の減速シミュレーションについて、減速開始時点から 4 秒後まで、1 秒おきの自車位置、前方予測位置、歩行者予測位置を図 3.4.2 に示す。図 3.4.2 の縦軸は道路中心を原点とした固定座標系の原点からの Y 方向距離、横軸は固定座標系の原点からの X 方向距離である。また赤線で囲まれた長方形は自車位置、青色で示された丸は前方予測位置、マゼンダで示された正方形は予測歩行者位置、等高線は潜在的歩行者衝突リスクの大きさを表す。また E2(a)の条件におけるシミュレーション結果を図 3.4.3, E2(b)の条件におけるシミュレーション結果を図 3.4.4, E3(a)の条件におけるシミュレーション結果を図 3.4.5, E3(b)の条件におけるシミュレーション結果を図 3.4.6 に示す。図 3.4.3 から図 3.4.6 の縦軸は上から速度、前後方向加速度、横軸は交差点入口からの x 方向距離であり、実線は自動減速手法、破線は熟練ドライバの運転行動を表す。

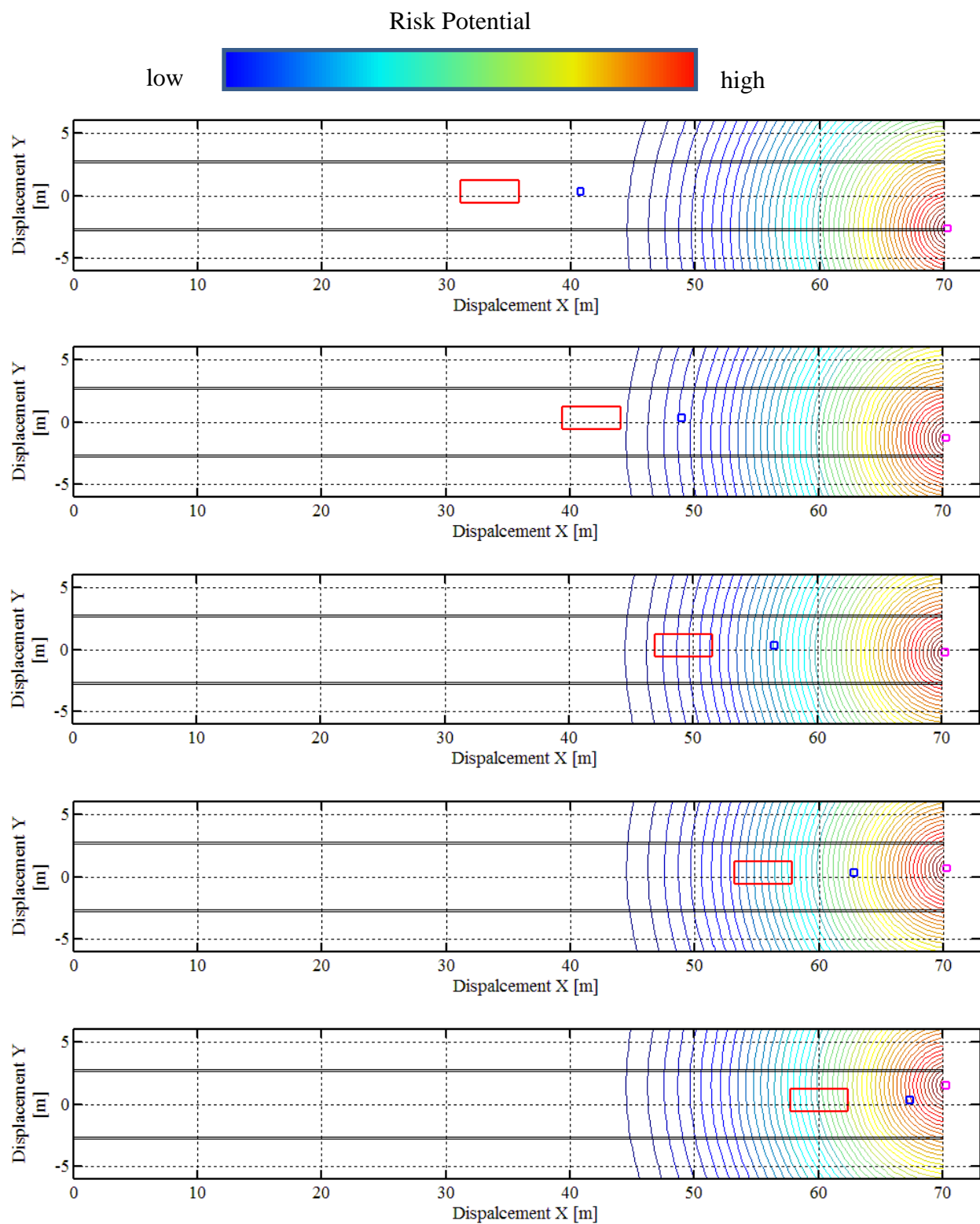


Fig. 3.4.2 Relation between vehicle and predictive pedestrian in simulation

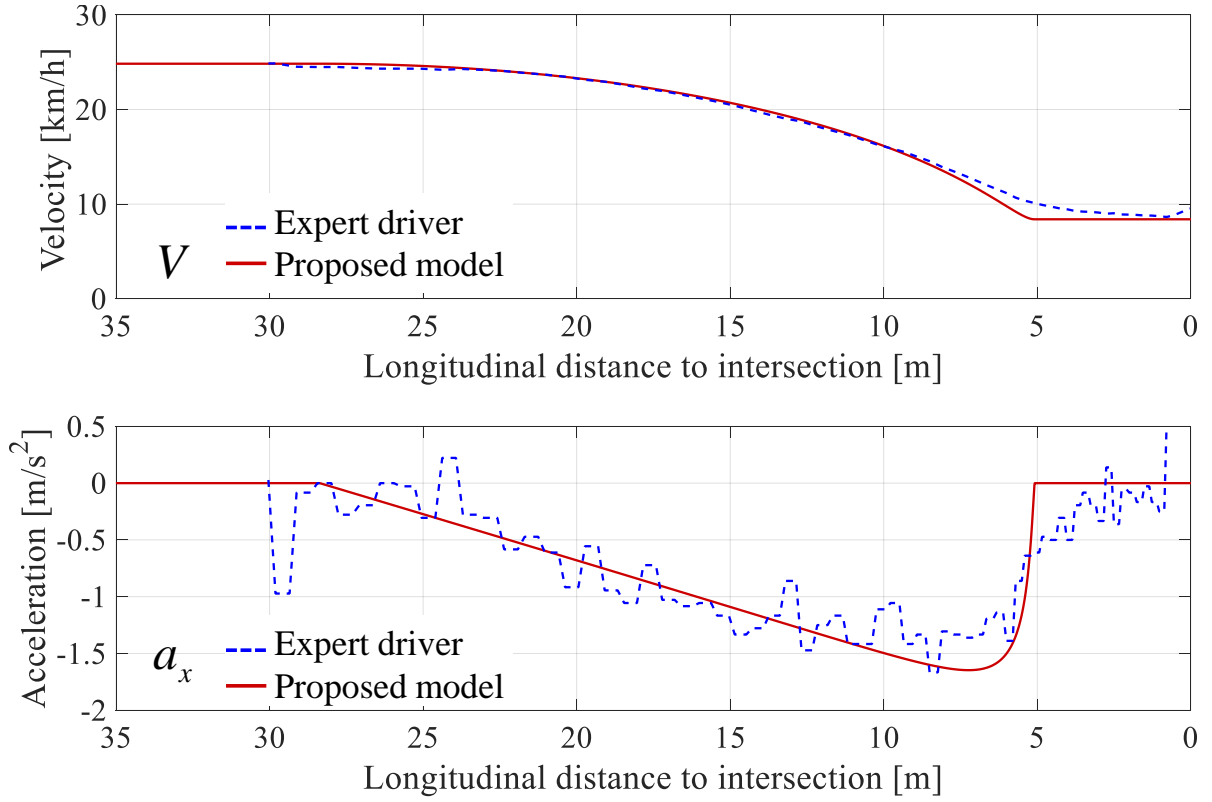


Fig. 3.4.3 Comparison driver model and Expert driver E2(a) in simulation

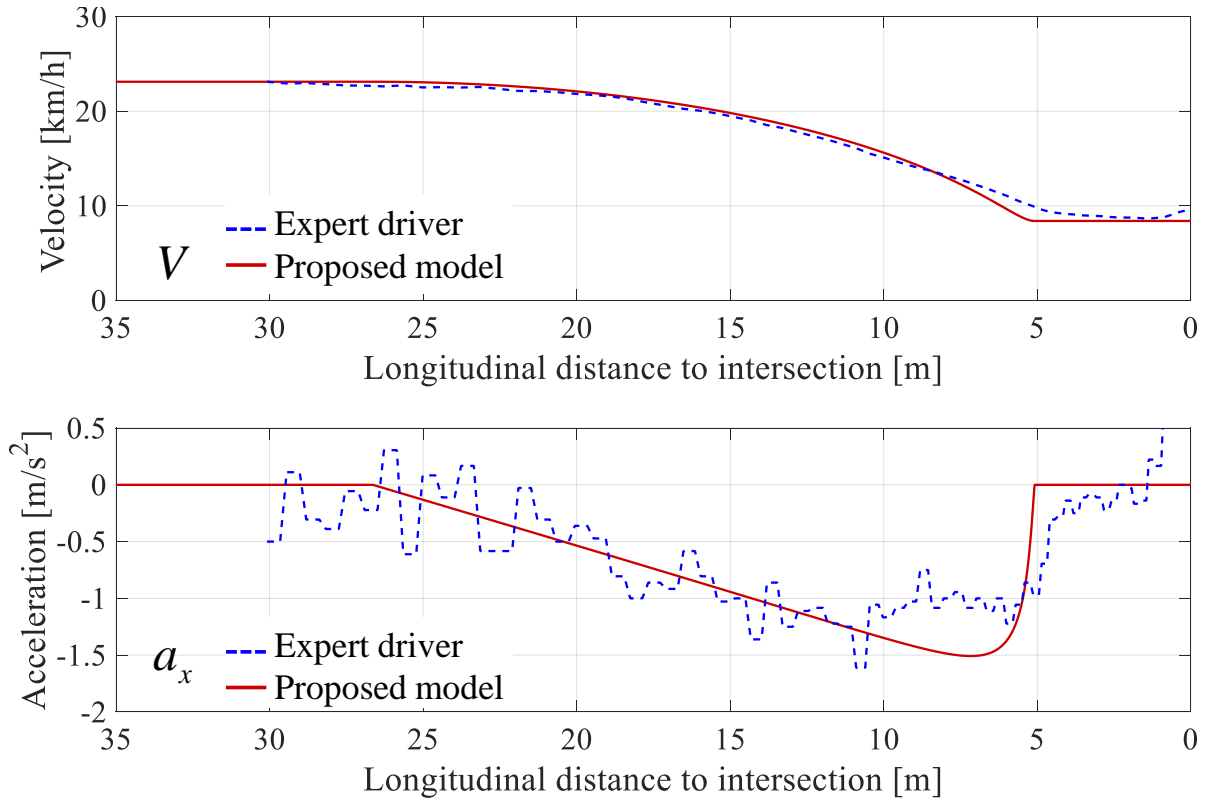


Fig. 3.4.4 Comparison driver model and Expert driver E2(b) in simulation

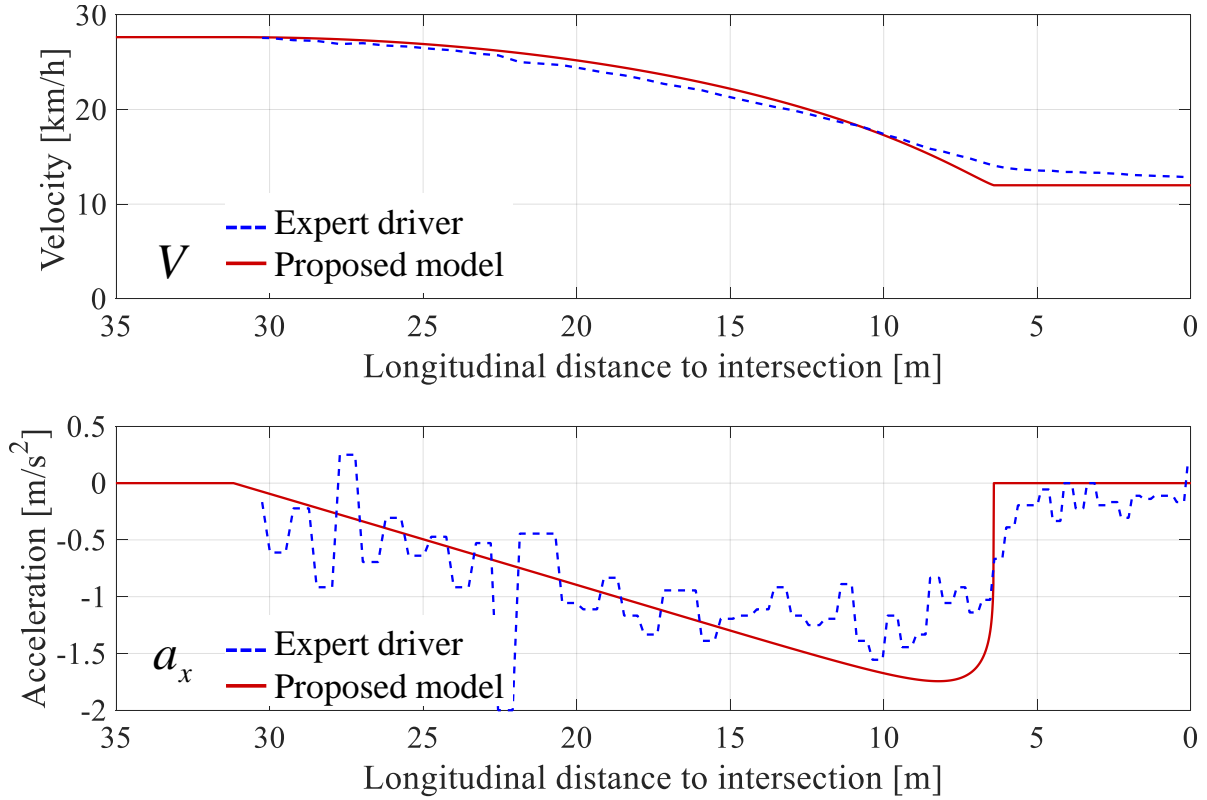


Fig. 3.4.5 Comparison driver model and Expert driver E3(a) in simulation

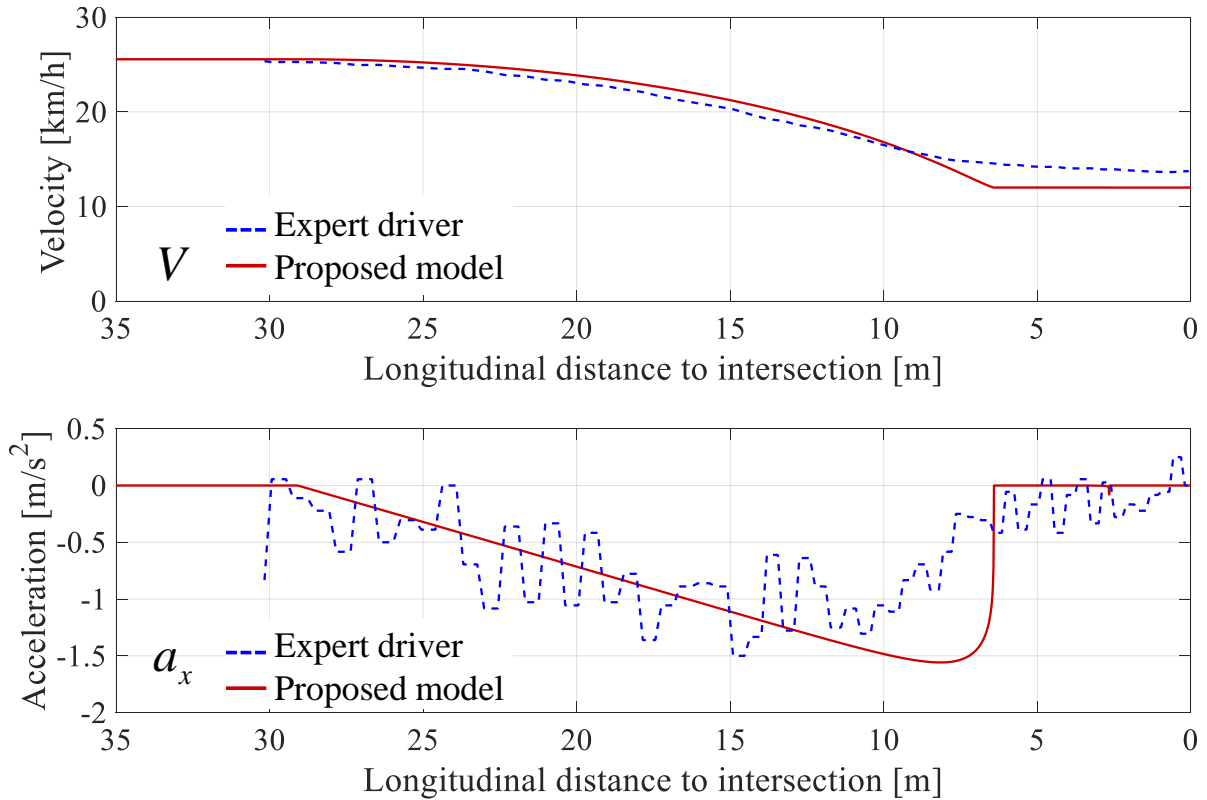


Fig. 3.4.6 Comparison driver model and Expert driver E3(b) in simulation

熟練ドライバ E2, E3 それぞれの条件における, 式(3.4.1)で算出される速度誤差を式(3.4.3)に示す. 式(3.4.3)中の添え字 E2(a), E2(b), E3(a), E3(b)は条件を示す.

$$\begin{aligned}
 V_{error-E2(a)} &= \sum (V^* - V_{expert})^2 = 3.20 \\
 V_{error-E2(b)} &= \sum (V^* - V_{expert})^2 = 6.87 \\
 V_{error-E3(a)} &= \sum (V^* - V_{expert})^2 = 19.0 \\
 V_{error-E3(b)} &= \sum (V^* - V_{expert})^2 = 31.1
 \end{aligned}
 \tag{3.4.3}$$

図 3.4.3 から図 3.4.6 より, 無信号交差点進入時において, 自動減速手法より算出された目標速度と目標加速度は, 誤差は存在するが, 熟練ドライバの速度プロファイルと加速度プロファイルに合致していることがわかる. 第 2 章で述べた自車中心から道路境界までの距離と交差点進入速度の関係についても, 自動減速手法では自車中心から道路境界までの横方向距離が大きくなるにつれて交差点進入速度が大きくなっており, 構築した自動減速手法が熟練ドライバの運転行動を模擬できているといえる.

次に E3(a)の条件において初速度 V_0 を変化させた場合に自動減速手法による減速結果について図 3.4.7 に示す. 図 3.4.7 中の黒色の点線は交差点進入参照速度 V_{ref} を示す.

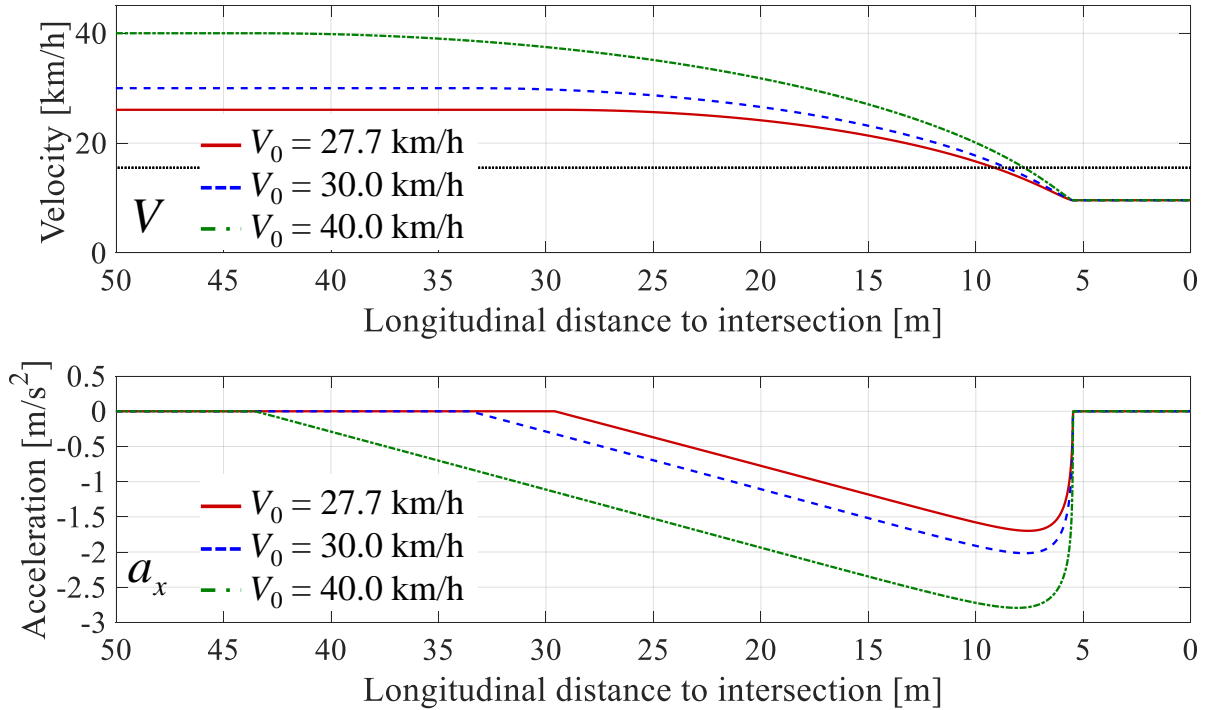


Fig. 3.4.7 Variation of Initial velocity in driver model

図 3.4.5 から、初速度によって最終的な速度に差があるが、初速度の変化に関わらず、図 3.4.5 中に鎖線で示した交差点進入参照速度に、前方予測位置から予測歩行者までの x 方向距離が交差点進入参照距離となる位置で到達しており、初速度に関わらず 3.3 節で示した予測歩行者との衝突を回避する条件を満たしていることがわかる。

3.5 まとめ

本章では無信号交差点進入時の、歩行者の飛び出し予測に基づく潜在的歩行者衝突リスクの算出について述べた。得られた知見を以下に示す。

- 潜在的歩行者衝突リスクに基づいて減速を行う自動減速手法を構築し、歩行者の飛び出しに対して
- シミュレーションによる熟練ドライバとの比較から、提案する潜在的歩行者衝突リスクと、それに基づき減速する自動減速手法は熟練ドライバを模擬した無信号交差点進入時の自動減速手法として妥当であることが確認された。

第 4 章

単路における歩行者・自転車の移動軌跡の解析

第 4 章では，第 2 章で研究対象として選定した，一般単路における歩行者・自転車の動きを解析していく．

4.1 安全性を考慮した解析項目

日本では自動車教習所において，背面通行の歩行者や自転車を追い越す際は，自車両と追い越し対象までの側方間隔を 1.5m 以上空けるよう指導される．また，追い越し時に十分な側方間隔を維持することが不可能である場合は徐行する必要がある．このような運転行動を前提とし，本研究の対象場面で起こり得る危険性について考察する．第 2 章で設定した対象場面のうち，歩行者が駐車車両を回避して移動する場면을図 4.1.1(a)，(b)に示す．図 4.1.1(a)は，歩行者が駐車車両へ向かって移動する中，自車両が歩行者の後方から追い越しを試みる場面である．自車両は歩行者が青い破線矢印の軌道で駐車車両を回避すると予測したのに対し，図 4.1.1(b)のように実際は赤い点線矢印の軌道を取ったとする．このような状況において，(a)の段階で自車両は歩行者との側方間隔を維持できると判断して追い越しを試みるが，(b)の段階になって実際には側方間隔を維持することが不可能であるとわかる．危険な追い越しになってしまうことがわかった時には，自車両と歩行者の進行方向の距離は非常に接近した状態になり，急減速せざるを得なくなる危険がある．このような事態を避けるため，道路脇から道路中心へ進路を変更し得る歩行者や自転車が，いつ進路を変更するのか（相対距離 x_{rel} [m]または 衝突余裕時間 T_{tc} [sec]），障害物や追い越し対象との側方間隔をどれくらい空けるのか（側方間隔 y_{rel} [m]）という二点に関して予測を行う必要がある．そこで，実験により歩行者および自転車の挙動を計測し，解析する．

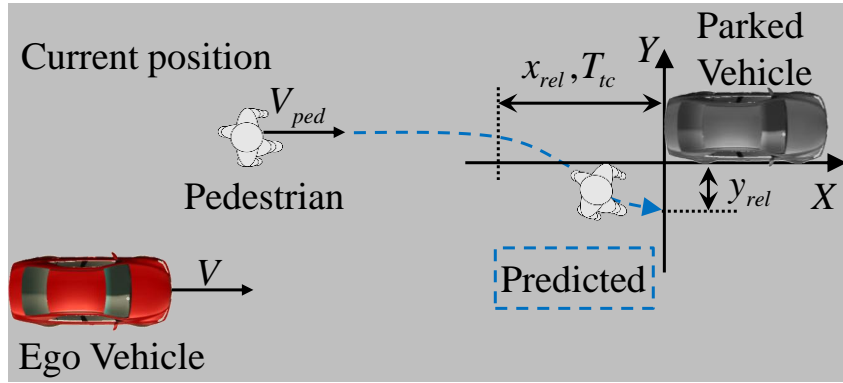


Fig. 4.1.1 (a) Danger hidden in the target situation

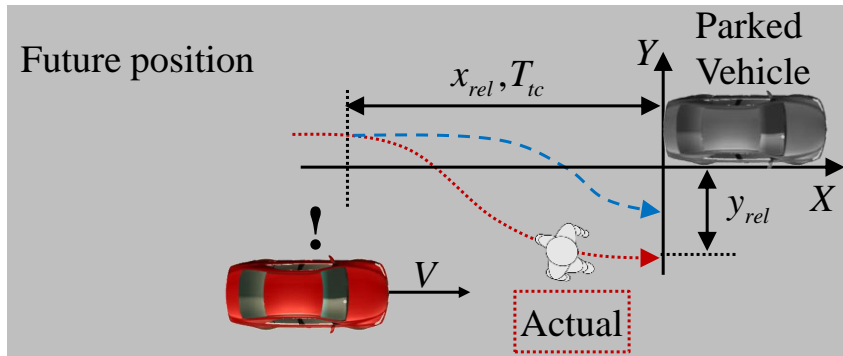


Fig. 4.1.1 (b) Danger hidden in the target situations

4.2 歩行者の駐車車両回避場面における移動軌跡の解析

4.2.1 歩行者移動軌跡の取得実験

まず，駐車車両回避場面における歩行者の挙動を解析するためのデータ収集実験について述べる．実験の概要を図 4.2.1 に示す．駐車車両を避けて移動する歩行者の挙動を，LIDAR により記録する．歩行者は初期位置(X_{ped0}, Y_{cyc0}) = (-30.0, 1.0)からスタートし，ゴール地点(X_{Goal}, Y_{Goal}) = (30.0, 1.0)の地点を目標に移動する．歩行者役の被験者には普段同様に回避行動を取ってもらうように指示した．被験者は合計 17 人で，通常歩行および急ぎ歩行の移動を 1 人あたり 2 回ずつ行う．

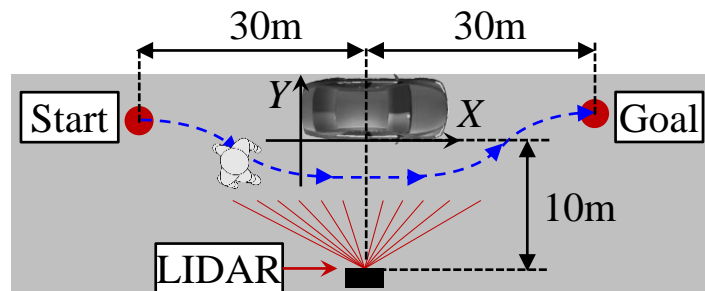


Fig. 4.2.1 Pedestrian trajectory measuring experiment

【実験装置】

歩行者の移動軌跡取得に用いたレーザレーダの仕様を表 4.2.1 に示す．このレーザレーダは，非接触性の測定システムであり，LMS システムはレーザ光のパルス伝播時間の測定の原理で距離を測定する．パルスレーザビームが内部の回転ミラーで方向を変えることで，周囲を扇形にスキャンする．レーザクラスは IEC 規格の Class1 であり，目に対して安全なレベルである(日本工業規格 2011)．測定データは，外部評価機器用としてシリアルインターフェイス経由でリアルタイムに供給される．本実験では，サンプリングタイム約 0.2 秒，視野角 $+50^{\circ} \sim -40^{\circ}$ ，角度分解能 0.25° で使用した．

Table 4.2.1 Specifications of LIDAR (LMS291-S05)

Field of view	100 , 180	degree
Scanning frequency	75	Hz
Operating range	0～80	m
Max. range with 10 % reflectivity	30	m
Angular resolution	0.25 , 0.5 , 1	degree
Response time	53 , 26 , 13	ms
MTBF	50,000	h
Resolution	10	mm
Data transmission rate	9.6 , 19.2 , 38.4 , 500	kbaud
Laser class	1	-
Systematic error	± 35	mm
Statistical error	± 5	mm
Operating voltage	$\geq 24 \pm 3.6$	V
Power consumption	30	W
Weight	4.5	kg
Dimensions	156 × 155 × 210	mm
Ambient operating temperature	0～50	°C
Storage temperature	$-30 \sim 70$	°C

4.2.2 回避行動の解析

実験により得られた全ての被験者の移動軌跡を図 4.2.2 に示す．図 4.2.2 は，駐車車両の右後端を原点とし，道路の進行方向の絶対座標を横軸に，道路横方向の絶対座標を縦軸とした．通常歩行を青い実線，急ぎ歩行を赤い破線で示す．全ての軌跡について，

ふらつきや個人差はあるが例外的な動きはなく、束のようにまとまった範囲を通っていることから、被験者によらず同様の行動モデルに基づいて移動していると考えられる。具体的には、歩行者は道路に沿って直進した後、駐車車両を回避するため任意のタイミングで進路を変更している様子がわかる。このデータから移動予測手法を構築するためには、回避行動を定量的に評価する必要がある。そこで本研究では、図 4.2.3 に示すように歩行者の移動軌跡を直線により近似し、評価指標として回避開始位置および回避開始タイミング、駐車車両の側方通過時における駐車車両との側方間隔を集計する。ただし、レーザレーダのノイズや自転車のふらつき等の影響により、回避開始位置を機械的かつ自動的に集計することは困難であると考え、回避開始位置の数値は軌跡データの目視により抽出する。ここで、回避開始タイミングは相対距離 x_{rel} [m] のみと、相対距離と相対速度を考慮した衝突余裕時間 T_{tc} [sec] の 2 種類を考察する。側方間隔は、図 4.2.3 の駐車車両の側方における Y 座標の中央値を取り集計する。回避開始時における相対距離 x_{rel} の集計結果を図 4.2.4、回避開始時における衝突余裕時間 T_{tc} の集計結果を図 4.3.5、駐車車両との側方間隔 y_{rel} の集計結果を図 4.2.6、歩行者の移動速度を図 4.2.7 に示す。

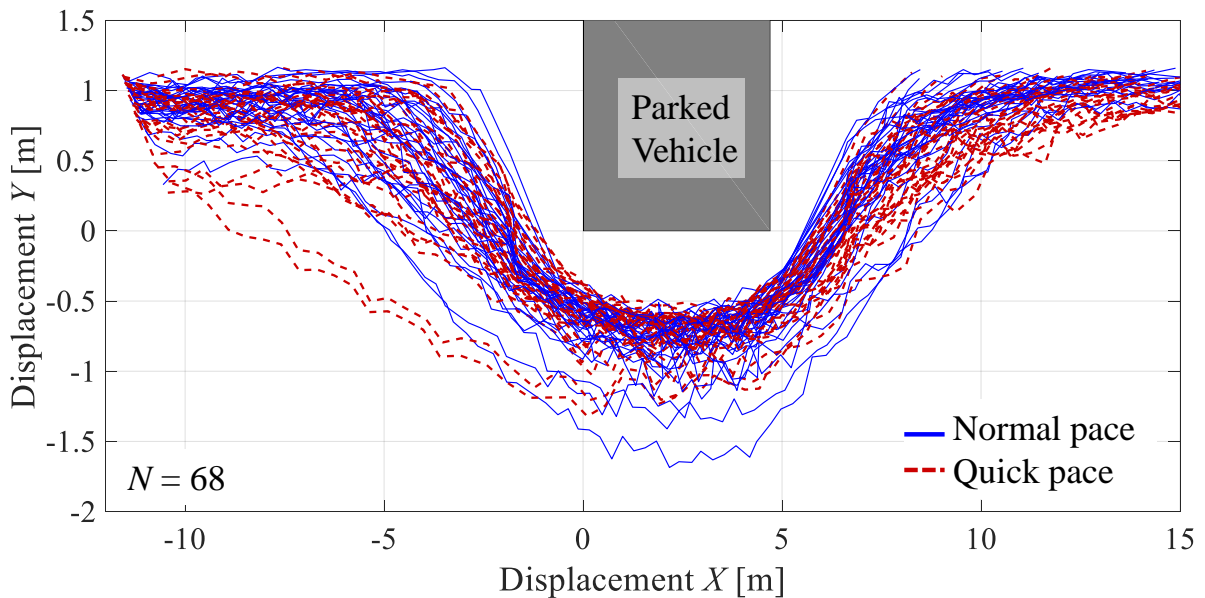


Fig. 4.2.2 All trajectories of pedestrian avoiding parked vehicle

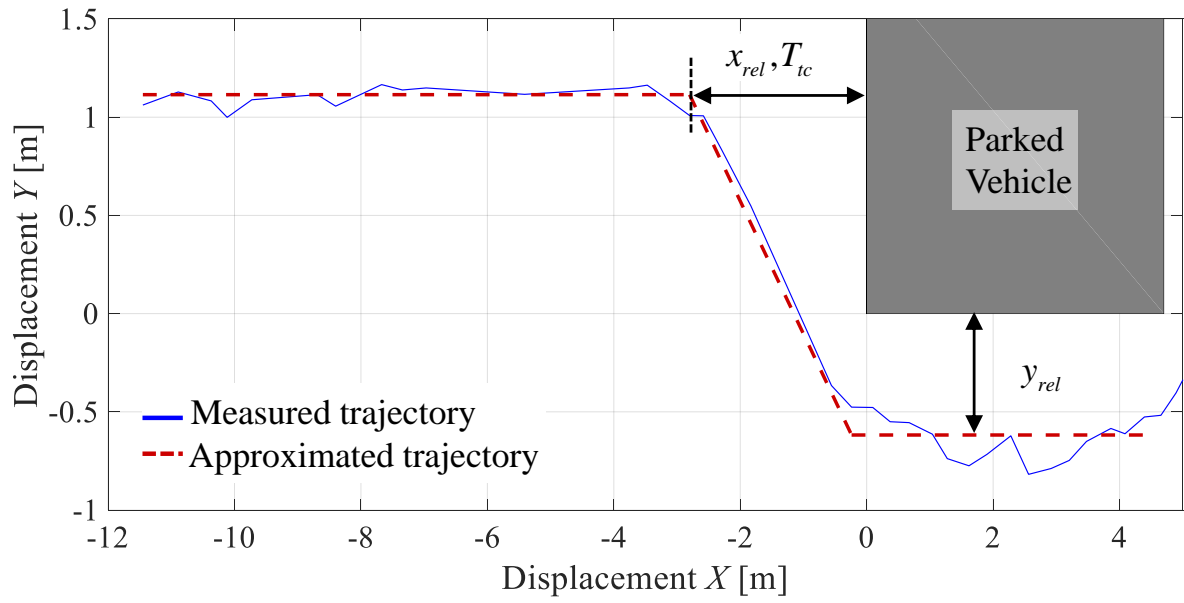


Fig. 4.2.3 Measured trajectory and Approximated trajectory

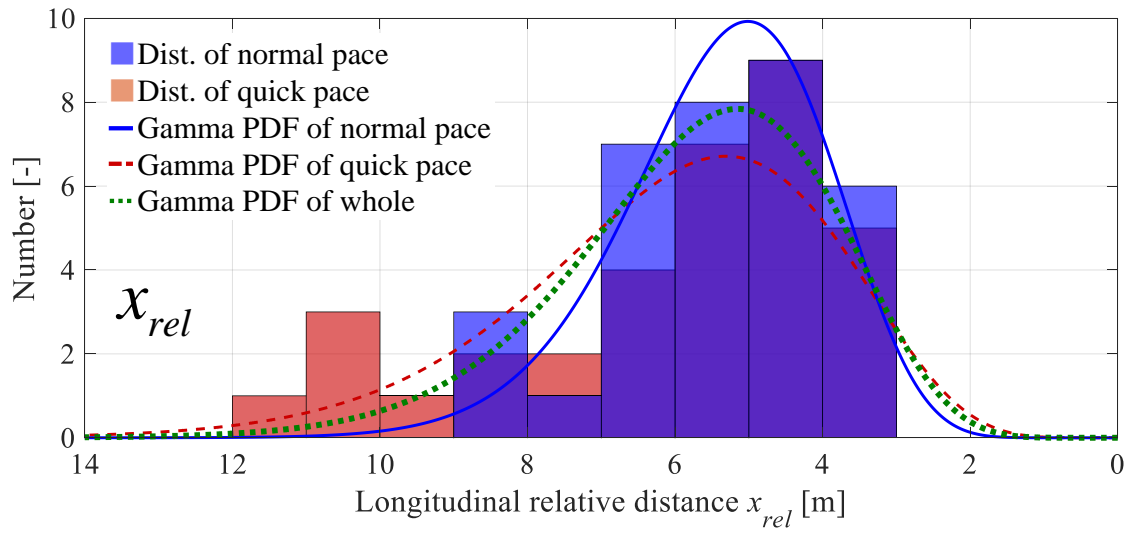


Fig. 4.2.4 Longitudinal relative distance x_{rel} at which avoiding starts

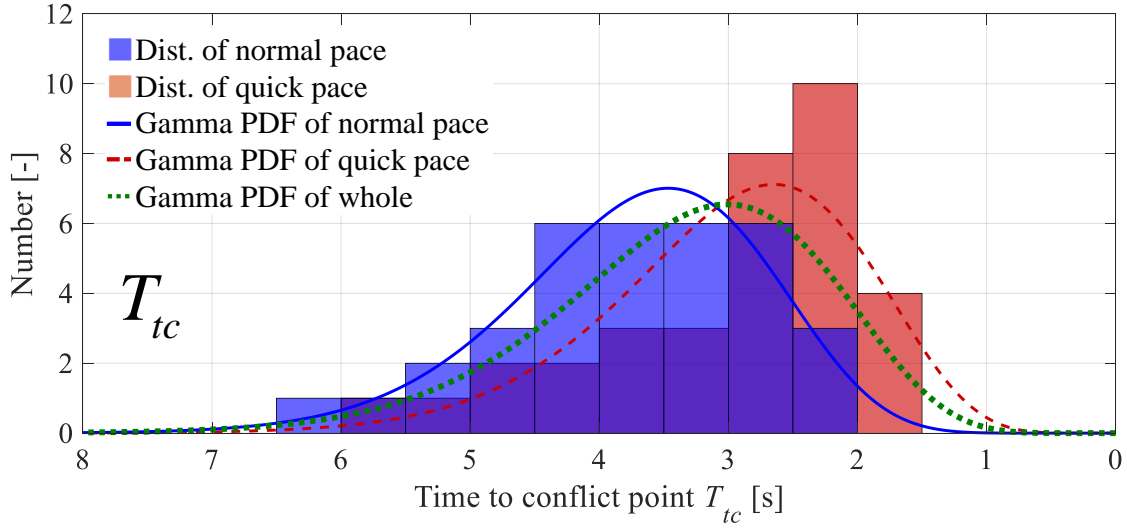


Fig. 4.2.5 Time to conflict point T_{tc} at which avoiding starts

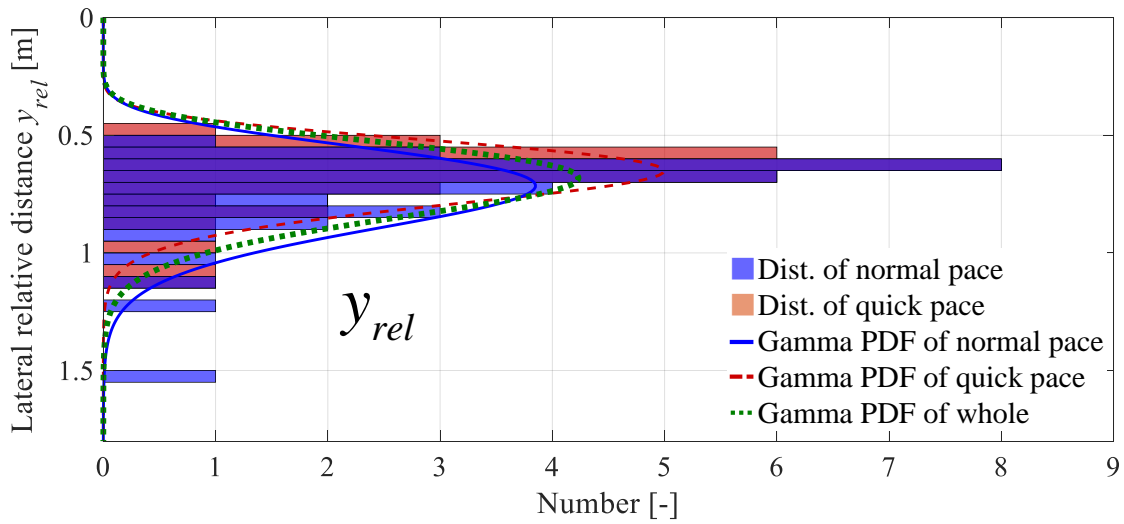


Fig. 4.2.6 Median of lateral relative distance y_{rel}

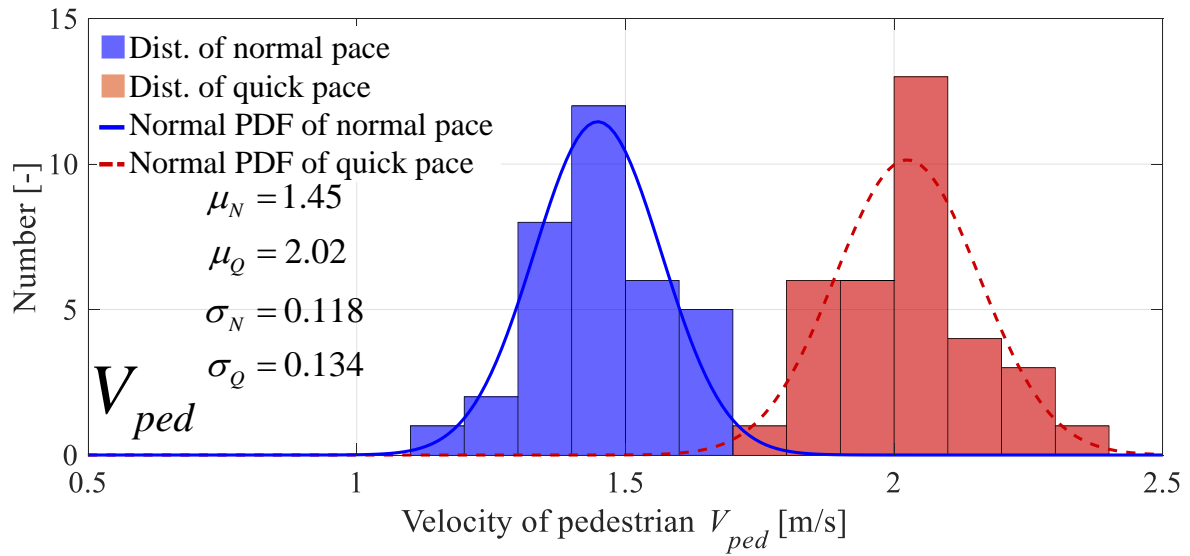


Fig. 4.2.7 Velocity of pedestrian V_{ped}

図 4.2.4 から図 4.2.6 について、回避開始タイミングの分布および駐車車両との側方間隔の分布は左右非対称の特徴的な類似した分布を持っている．本研究では、この分布を近似する方法として、ガンマ分布の確率密度関数（式(4.2.1)）を用いる．ガンマ分布は精密機器の耐久性など、ある対象が現在の機能を維持し続ける確率をよく近似するモデルとして知られており、交通参加者の行動継続に近似できると考え選定した．

$$f(x) = \frac{k-1}{\Gamma(k)\theta^k} x^{k-2} e^{-x/\theta} \quad (x > 0) \quad (4.2.1)$$

ただし、 $\Gamma(k)$ はガンマ関数である．図 4.2.4 から図 4.2.6 をみると、ガンマ分布が追越し開始タイミングおよび側方間隔をよく近似できていることがわかる．ガンマ分布の各パラメータを表 4.2.2 に示す．また、歩行者の移動速度については平均値から個人差によるばらつきであると考えられるため、正規分布により近似した．

Table 4.2.2 Parameters of Gamma PDF

	x_{rel} [m]			T_{tc} [sec]			y_{rel} [m]		
	Noraml	Quick	Whole	Normal	Quick	Whole	Normal	Quick	Whole
k	14.6	8.08	10.03	14.0	8.92	9.60	17.6	24.2	19.3
θ	0.368	0.751	0.570	0.267	0.340	0.350	0.0430	0.0281	0.0373
E	5.38	6.06	5.72	3.73	3.04	3.36	0.758	0.680	0.719
V	2.00	4.55	3.26	1.00	1.03	1.18	0.0326	0.0191	0.0268

4.2.3 移動予測に用いる指標と数値

第 4.2.3 項で示した結果から、歩行者が駐車車両を回避し始めるタイミングを予測する際、進行方向の相対距離 x_{rel} と衝突余裕時間 T_{tc} どちらの指標を用いることが妥当であるか考察する．考察のために、式(4.2.2)に示すガンマ分布の累積度数分布を用いて、図 4.2.4 から図 4.2.6 の結果における信頼区間とパラメータとの関連性を表 4.2.3 に示す．

$$F(x) = \frac{\gamma(k, x/\theta)}{\Gamma(k)} \quad (4.2.2)$$

ただし、 $\gamma(k, x/\theta)$ は不完全ガンマ関数である．また、ガンマ分布の確率変数を x とす

るとき，平均 $E(x)$ は式(4.2.3)，分散 $V(x)$ は式(4.2.4)のように表される．

$$E(x) = k\theta \quad (4.2.3)$$

$$V(x) = k\theta^2 \quad (4.2.4)$$

ここで，図 4.2.7 より歩行者の移動速度をみると，通常歩行と急ぎ歩行の平均値の差は 0.5 m/s 強となっている．歩行者の移動速度を走行中の車両が車載センサを用いて計測する場合，0.5 m/s の差は誤差として正しく検出できない可能性が高い．（酒井 2011）そこで，本研究では歩行者の移動速度によらず妥当な移動予測が行えるよう，通常歩行と急ぎ歩行の分布を合わせて求めたガンマ分布のパラメータを用いる．

表 4.2.3 の結果から，通常歩行の歩行者が駐車車両を回避するために進路を変更する際の衝突余裕時間 T_{tc} が 4.01 秒以下である確率は 32%程度存在する．また， T_{tc} が 6.91 秒以下であると想定すると，99%の事例がこの条件に該当する．これを相対距離の観点から見ると，仮に歩行者の移動速度が本実験で観測された最高速度の 2.2m/s であった場合，相対距離 x_{rel} が 15.2m 以下になった時点で回避開始の可能性を考慮する必要が生じるが，これは図 4.2.4 の結果と合致しない．よって，歩行者が駐車車両を追い越す際の指標は駐車車両までの進行歩行の相対距離 x_{rel} を用いることとする．解析結果から，歩行者が駐車車両を回避する場面では，回避開始タイミング $x_{rel} = 11.6m$ 以下，側方間隔 $y_{rel} = 1.3m$ と設定する．この条件においては 99%の駐車車両回避事例が該当する．

Table 4.2.1 Parameters of cumulative frequency distribution

%	x_{rel} [m]			T_{tc} [sec]			y_{rel} [m]		
	Noraml	Quick	Whole	Normal	Quick	Whole	Normal	Quick	Whole
68%	6.19	7.36	6.79	4.31	3.65	4.01	0.860	0.760	0.820
95%	8.05	10.3	9.22	5.63	5.02	5.47	1.10	0.940	1.03
99%	9.87	13.1	11.6	6.93	6.39	6.91	1.33	1.11	1.24

4.3 自転車の他者追い越し場面における移動軌跡の解析

4.3.1 自転車移動軌跡の取得実験

実験の概要を図 4.3.1 に示す。追い越す側の自転車，追い越される側の歩行者・自転車それぞれの挙動を LIDAR により記録し，解析する。追い越す側の自転車は，追い越し前に巡航速度まで加速できるように，初期位置（対歩行者は $X_{cyc0} = -65\text{m}$ ，対自転車は $X_{cyc0} = -75\text{m}$ ）からスタートする。その後，対歩行者の場合は $X_{cyc} = -55\text{m}$ ，対自転車の場合は $X_{cyc} = -65\text{m}$ の地点を通過する際，追い越される側の歩行者・自転車へ合図を送り，初期位置（対歩行者は $X_{ped0} = -40\text{m}$ ，自転車は $X_{ped0} = -45\text{m}$ ）から移動を開始する。追い越す側の被験者に普段の走行度同様に追い越し行動を行ってもらい，追い越される側は等速で直進するように指示した。被験者は合計 12 人で，歩行者および自転車の追い越しを 1 人あたり 5 回行う。

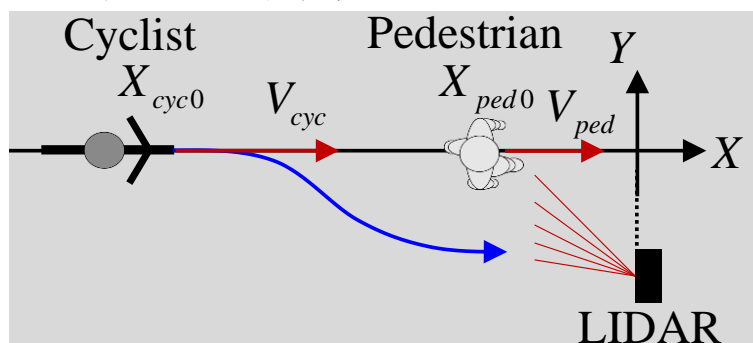


Fig. 4.3.1 Cyclist trajectory measuring experiment

【実験装置】

歩行者および自転車の移動軌跡取得に用いたレーザレーダの仕様を表 3.3.1 に示す。

本実験では，サンプリングタイム約 0.08 秒で使用した。

Table 4.3.1 Specifications of LIDAR (ibeo LUX)

Laser class	Class 1, Eye safe	-
Wave length	905	nm
Range	200(average)	m
Horizontal field of view	4 layers : 110(50 ~ -60)	degree
Vertical field of view	3.2	degree
Data update rate	12.5 / 25.0 / 50.0	Hz
Accuracy (distance independent)	10	cm
Angle resolution	Horizontal : 0.125	degree
	Vertical : 0.8	degree
Distance resolution	4	cm

4.3.2 追い越し行動の解析

対歩行者追い越し場面の全被験者の移動軌跡を図 4.3.2, 対自転車追い越し場面の全被験者の移動軌跡を図 4.3.3 に示す. 図 4.3.2, 図 4.3.3 の座標系は, 道路の進行方向を横軸に取った際の横方向の絶対座標を縦軸に, 追い越される側から見た追い越す側の進行方向に対する相対距離を横軸とした. また, 同一被験者の移動軌跡は同色で示す. 全ての軌跡について, 歩行者の駐車車両回避場面と同様に例外的な動きはなく, 同様の行動モデルに基づいて走行していると考えられる. このデータから移動予測手法を構築するため, 追い越し行動を歩行者の駐車車両回避場面と同じ方法で定量的に評価する. 追い越し時の側方間隔は, 図 4.3.2, 図 4.3.3 中における Y 座標の最小値の絶対値を取り集計する. ただし, 追い越し開始タイミングを機械的に自動的に集計することは歩行者の駐車車両回避場面と同様に困難であるため, 追い越し開始タイミングの数値は軌跡データの目視により抽出する. 対歩行者, 対自転車追い越し開始時における相対距離 x_{rel} の集計結果を図 4.3.4, 対歩行者, 対自転車追い越し開始時における衝突余裕時間 T_{tc} の集計結果を図 4.3.5, 追い越し時における側方間隔 y_{rel} の集計結果を図 4.3.6 に示す.

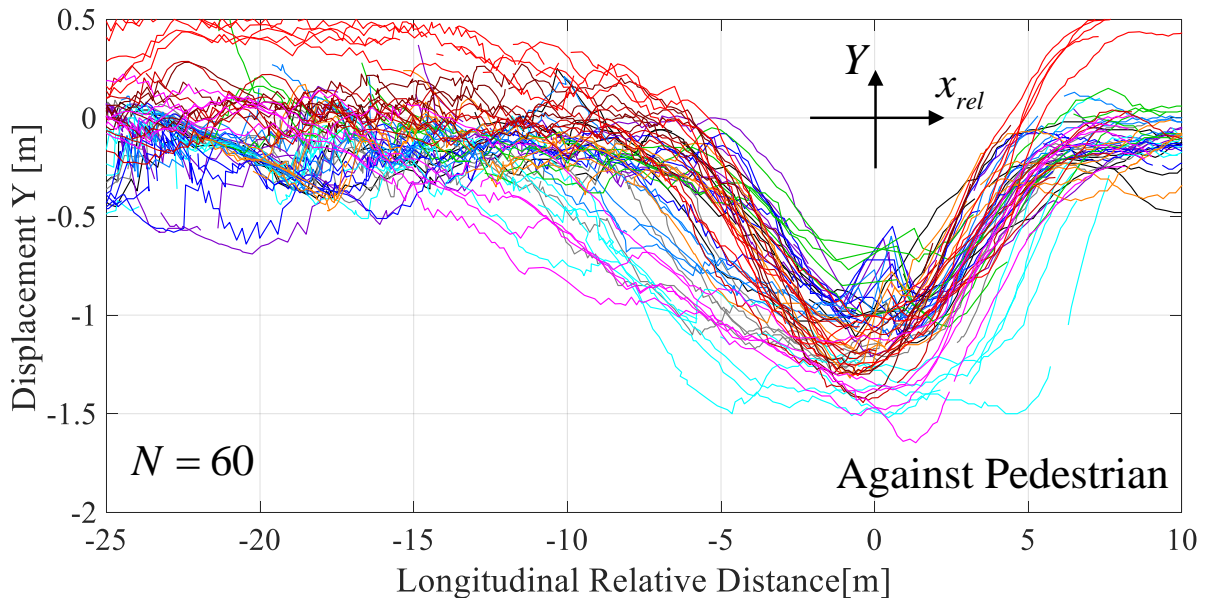


Fig. 4.3.2 All trajectories in overtaking pedestrian scenario

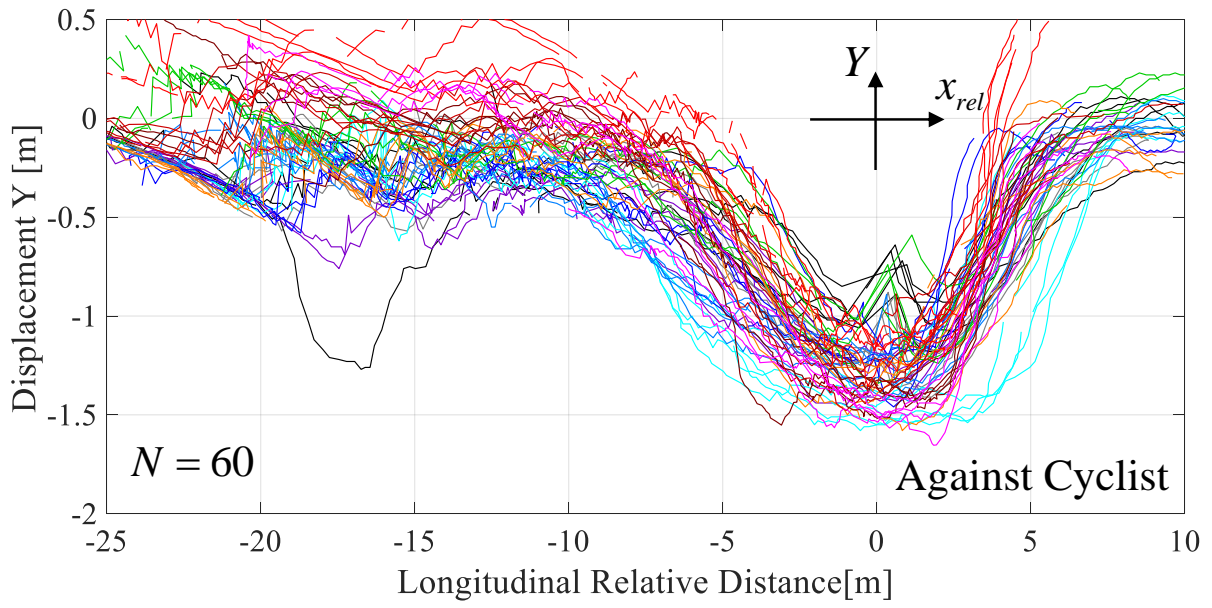


Fig. 4.3.3 All trajectories in overtaking cyclist scenario

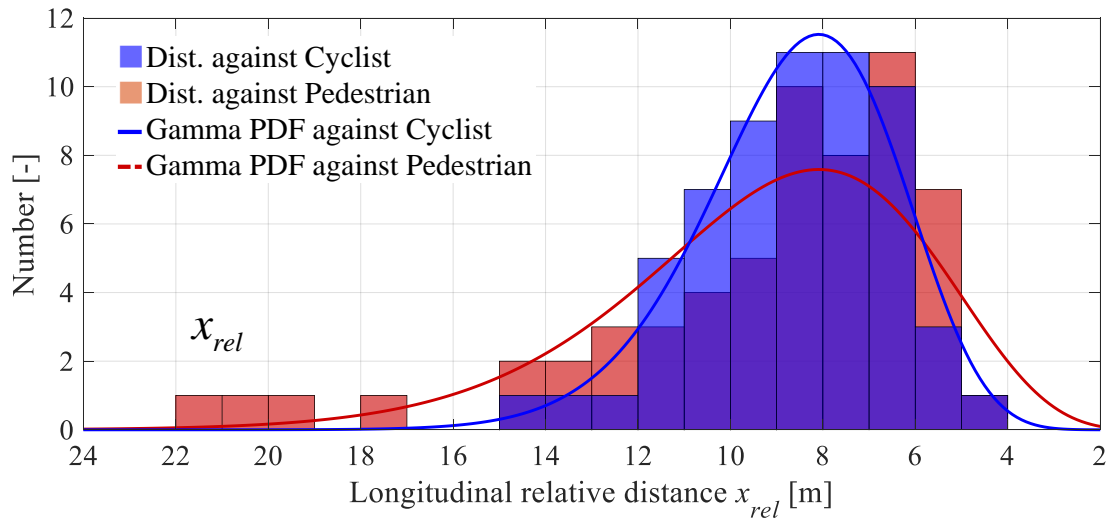


Fig. 4.3.4 Longitudinal relative distance x_{rel} at which overtaking starts

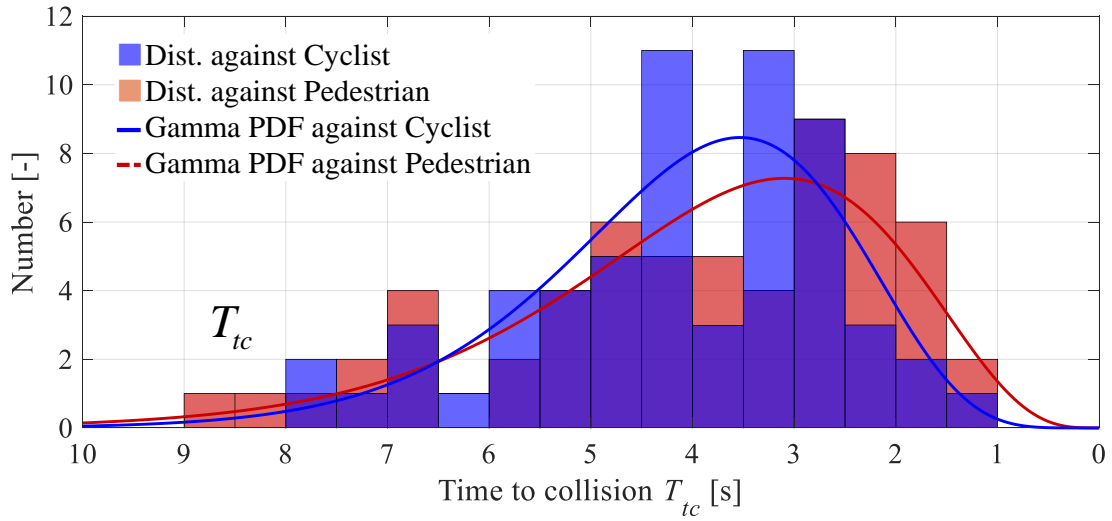
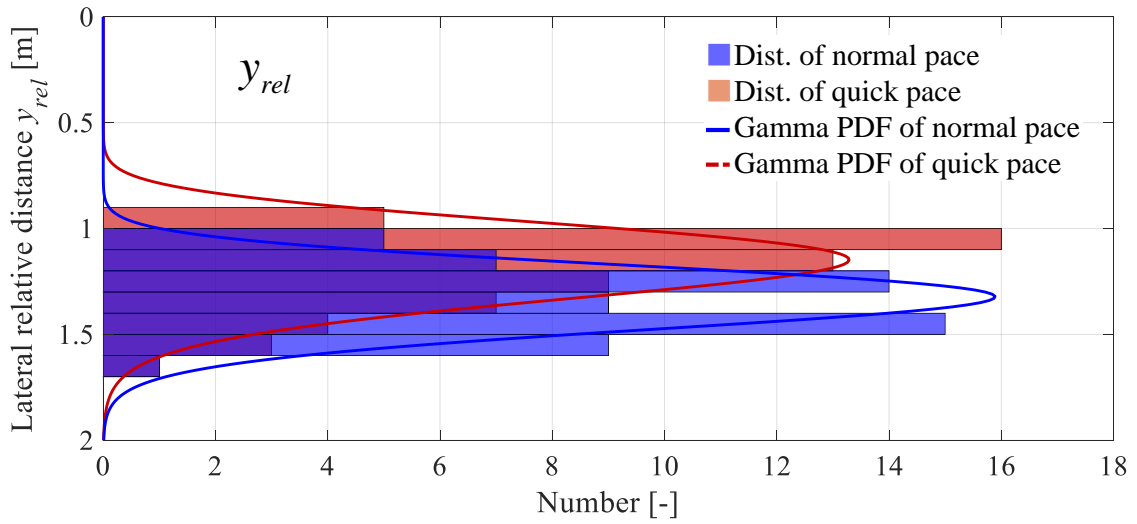

 Fig. 4.3.5 Time to collision T_{tc} at which overtaking starts

 Fig. 4.3.6 Maximum lateral relative distance y_{rel}

図 4.3.4 から図 4.3.6 について、追い越し開始タイミングの分布および歩行者を追い越す際の側方間隔の分布も、歩行者の駐車車両回避場面と同様に左右非対称の特徴的な類似した分布を持っているため、ガンマ分布の確率密度関数を用いる。ガンマ分布の各パラメータを表 4.3.2 に示す。

Table 4.3.2 Parameters of Gamma PDF

	x_{rel} [m]		T_{tc} [sec]		y_{rel} [m]	
	Ped.	Cyc.	Ped.	Cyc.	Ped.	Cyc.
k	16.3	7.73	4.71	7.41	41.8	78.2
θ	0.527	1.20	0.836	0.551	0.0282	0.0171
E	8.62	9.29	3.93	4.08	1.18	1.34
V	4.54	11.2	3.29	2.25	0.033	0.025

4.3.3 移動予測に用いる数値

4.2.3 項同様, ガンマ分布の累積度数分布 (式(2)) を用いて移動予測に用いる数値を考察する.

図 4.3.4 から図 4.3.6 の結果における信頼区間とパラメータとの関連性を表 4.3.3 に示す. 表 4.3.3 の結果から, 自転車が歩行者を追い越す際の衝突余裕時間 T_{tc} が 10 秒以下であると想定すると, 99%の事例がこの条件に該当する. これを相対距離の観点から見ると, 仮に自転車と歩行者の相対速度が 3m/s であった場合, 相対距離 x_{rel} が 30m 以下になった時点で追い越しの可能性を考慮する必要が生じるが, これは図 4.3.4 の結果と合致しない. 本実験では, 自転車が歩行者を追い越す場面において相対速度が最大 4m/s 弱であったことから, 自転車が他者を追い越す際の指標は歩行者の駐車車両回避場面同様, 追い越し対象までの進行歩行の距離 x_{rel} を用いることとする. 解析結果から, 自転車が歩行者を追い越す場面では, 追い越し開始タイミング $x_{rel} = 20\text{m}$ 以下, 側方間隔 $y_{rel} = 1.8\text{m}$, 自転車が他の自転車を追い越す場面では追い越し開始タイミング $x_{rel} = 15\text{m}$, 側方間隔 $y_{rel} = 1.8\text{m}$ と設定する. この条件においては 99% の追い越し事例が該当する.

Table 4.3.3 Parameters of cumulative frequency distribution

%	x_{rel} [m]		T_{tc} [sec]		y_{rel} [m]	
	Ped.	Cyc.	Ped.	Cyc.	Ped.	Cyc.
68%	11.4	9.90	5.10	5.00	1.28	1.42
95%	15.9	12.7	7.64	7.05	1.51	1.61
99%	20.4	15.4	10.23	9.10	1.73	1.79

4.4 4 章のまとめ

4 章では, 2 章で実施した交通調査を参考に選定した対象場面について, 移動予測を行う際に重要となるパラメータを現実にもった値にするため, 対象場面を再現した移動軌跡の取得実験を行った. それぞれの対象場面について移動軌跡を解析し, 回避や追い越しのために進路を変更し始めるタイミングおよび対象との側方間隔の分布を求め, 移動予測に用いる値を決定した.

第5章

単路における歩行者・自転車の移動予測手法の構築

本章では第2章で選定した研究対象場面に対し、第4章で得た移動軌跡の分析結果から、移動予測手法を構築する。5.1節では、対象場面の移動予測に用いるポテンシャルフィールドの設定について示す。5.2節では移動予測のための経路候補の生成および最適化に基づく妥当性の評価法について述べ、5.3節で本章のまとめと得られた知見を示す。

5.1 ポテンシャルフィールドの設定

対象場面における移動予測手法を構築するため、本研究ではばねの弾性エネルギーを用いたポテンシャルフィールドを設定していく。まず、横断や脇道への進入を除き、歩行者・自転車は通常道路脇を直進する。このことから、個々の歩行者・自転車から走行レーンまでの距離に比例して作用する引力ポテンシャルを図4.2.1のように設定する。ここで、仮に歩行者が絶対座標上 $Y = Y_L$ [m] の位置にある走行レーンから d_L [m] だけ離れていた場合、発生するポテンシャル U_L [Nm] は式(5.1.1)のように定義される。

$$U_L(d_L) = \frac{1}{2} k_L d_L^2 = \frac{1}{2} k_L (Y_{ped} - Y_L)^2 \quad (5.1.1)$$

ただし、 k_L [N/m] は走行レーンに作用する仮想ばねのばね定数である。

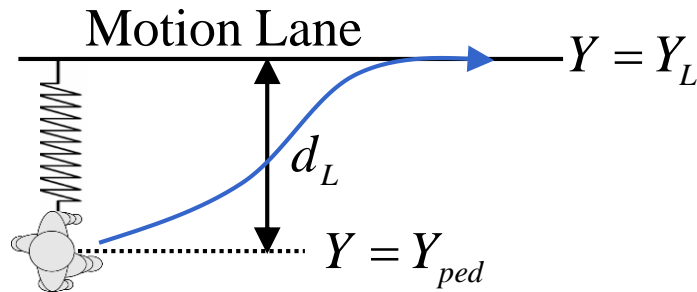


Fig. 5.1.1 Definition of motion lane potential

$Y = 0$ m の位置にある走行レーンのばね定数が $k_L = 1$ N/m のとき、走行レーンへ働く引力ポテンシャルを図 5.1.2 に示す。

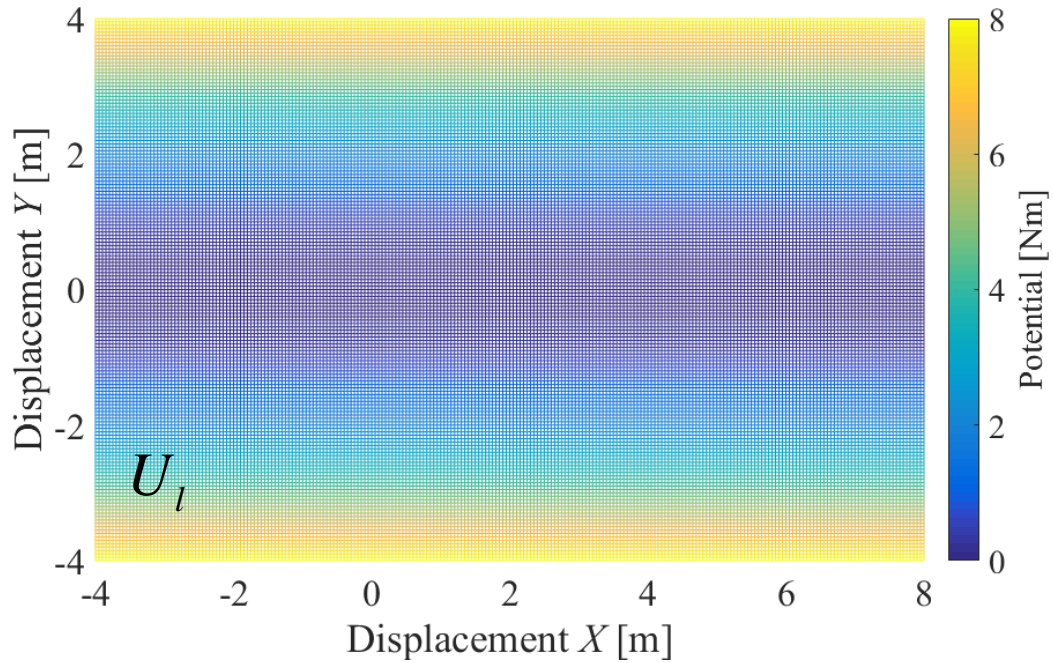


Fig. 5.1.2 Attracting potential of motion lane

また、移動予測を行う際に予測軌道が道路外へ逸脱しないよう道路境界を図 5.1.3 のように設定し、道路外において一定の斥力ポテンシャルを発生させる。

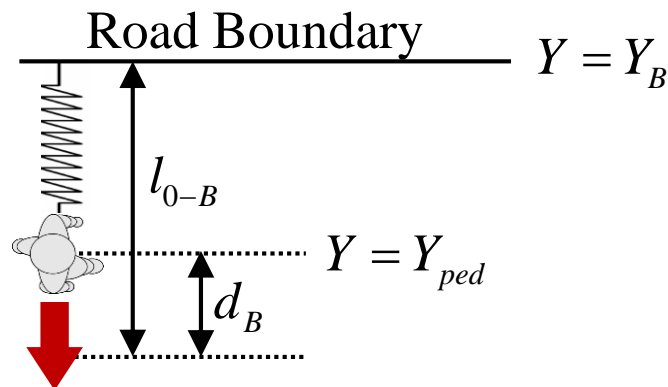


Fig 5.1.3 Definition of road boundary potential

道路境界から発生する斥力ポテンシャルを式(5.1.2)に示す。

$$U_B(d_B) = \frac{1}{2} k_B d_B^2 = \frac{1}{2} k_B (Y_{ped} - (Y_B - l_{0-B}))^2 \quad (5.1.2)$$

$Y_B = 1 \text{ m}$ より正方向の領域が道路外，道路境界から発生する斥力ポテンシャルのばねの自然長が $l_{0-B} = 1 \text{ m}$ ，ばね定数 k_B が $k_B = 10 \text{ N/m}$ のとき，発生する斥力ポテンシャルを図 5.1.4 に示す．

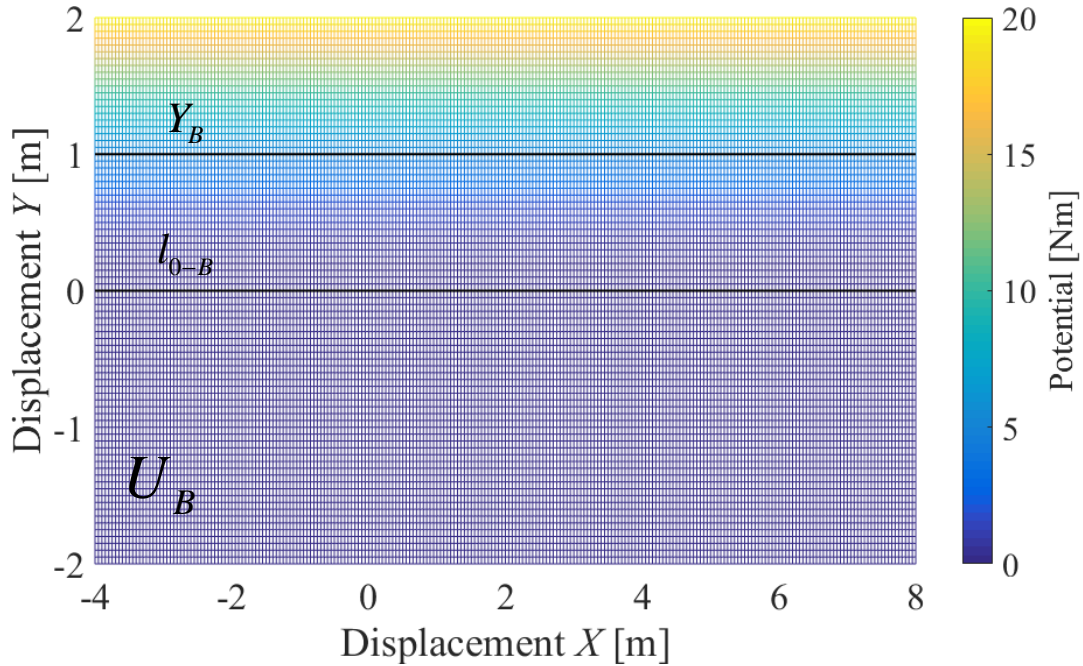


Fig. 5.1.4 Repulsive potential of road boundary

5.1.1 歩行者の駐車車両回避場面

歩行者が駐車車両を回避して移動する軌跡を再現するため，駐車車両に接近すると発生する斥力ポテンシャルを設定する．図 3.2.3 に示した移動軌跡の例より，歩行者の回避行動を再現する上で回避を開始する位置，側方間隔に作用する少なくとも 2 つのパラメータが必要である．第 3 章で示した通り，回避開始時における歩行者から回避対象までの進行方向距離は，回避時における側方間隔と比較して非常に長い．この点を考慮し，駐車車両から発生する斥力ポテンシャルは，進行方向に長く，横方向に短い自然長を持つ楕円形とする．駐車車両が発生させる斥力ポテンシャルを図 5.1.5 に示す．車両は前後方向に長いことから，駐車車両の前端から後端までの区間においては x 座標に関わらず y 軸方向の側方間隔のみで定められるものとする．

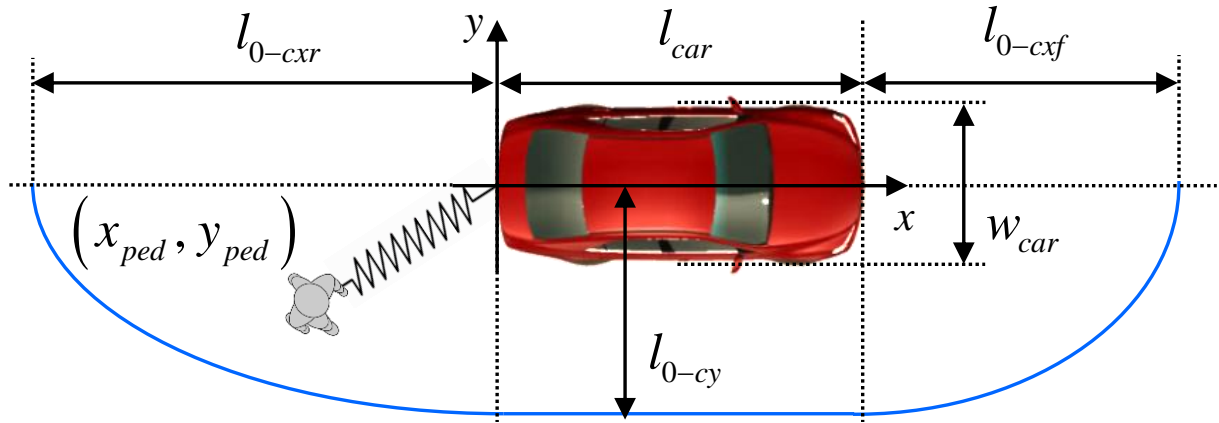


Fig. 5.1.5 Potential

駐車車両後端の区間において，図 5.1.6(a), (b)に示す通り真円と等価であるように仮想ばねの自然長からの変位 d [m]を求める．(a)において，仮想ばねの自然長となる楕円の円周を描く方程式は式(5.1.3)で表される．

$$\left(\frac{x}{l_{0-xcr}}\right)^2 + \left(\frac{y}{l_{0-yc}}\right)^2 = 1 \quad (5.1.3)$$

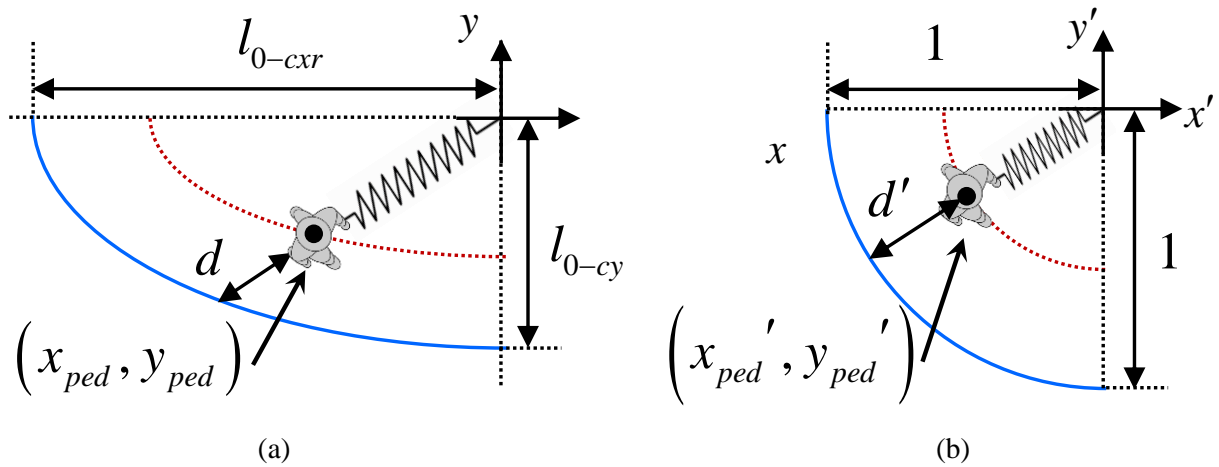


Fig. 5.1.6 Coordinate transformation

ただし， l_{0-xcr} [m]は駐車車両後方における仮想ばねの x 軸方向自然長， l_{0-yc} [m]は駐車車両後方および側方における仮想ばねの y 軸方向自然長である．ここで座標変換のために， x 軸を $x / l_{0-xcr} = x'$ ， y 軸を $y / l_{0-yc} = y'$ とおくと，図(a)から図(b)のように楕円から半径 1 の円へ変換できる．図(b)において，歩行者に作用する斥力ポテンシャル U_c [Nm]は，仮想ばねの変位 d' [m]から式(5.1.4)のように求めることができる．

$$\begin{aligned}
 U_c &= \frac{1}{2} k_c d'^2 \\
 &= \frac{1}{2} k_c \left(1 - \sqrt{x_{ped}'^2 + y_{ped}'^2} \right)^2 \\
 &= \frac{1}{2} k_c \left(1 - \sqrt{\left(\frac{x_{ped}}{l_{0-xcr}} \right)^2 + \left(\frac{y_{ped}}{l_{0-yc}} \right)^2} \right)^2
 \end{aligned} \tag{5.1.4}$$

ただし, k_c [N/m] は駐車車両が発生する斥力ポテンシャルの仮想ばねのばね定数である. 以上より, 図 5.1.5 に示すように駐車車両の後端中央を原点に相対座標系を取ったとき, 歩行者に作用する斥力ポテンシャル U_c を式(5.1.5)の通り設定する.

$$U_c = \begin{cases} \frac{1}{2} k_c \left(1 - \sqrt{\left(\frac{x_{ped}}{l_{0-xcr}} \right)^2 + \left(\frac{y_{ped}}{l_{0-yc}} \right)^2} \right)^2 & \text{if } x < 0, \left(\frac{x_{ped}}{l_{0-xcr}} \right)^2 + \left(\frac{y_{ped}}{l_{0-yc}} \right)^2 < 1 \\ \frac{1}{2} k_c \left(1 - \left| \frac{y_{ped}}{l_{0-yc}} \right| \right)^2 & \text{if } 0 < x_{ped} < l_{car}, -l_{0-yc} < y_{ped} < l_{0-yc} \\ \frac{1}{2} k_c \left(1 - \sqrt{\left(\frac{x_{ped}}{l_{0-xcf}} \right)^2 + \left(\frac{y_{ped}}{l_{0-yc}} \right)^2} \right)^2 & \text{if } l_{car} < x_{ped}, \left(\frac{x_{ped} - l_{car}}{l_{0-xcf}} \right)^2 + \left(\frac{y_{ped}}{l_{0-yc}} \right)^2 < 1 \end{cases} \tag{5.1.5}$$

ただし, l_{car} [m] は駐車車両の全長, l_{0-xf} [m] は駐車車両前方の進行方向における仮想ばねの自然長である. また, 斥力ポテンシャルは設定した仮想ばねの自然長より内側の領域内のみ作用する. 全長 $l_{car} = 5$ m, 車幅 $w_{car} = 1.8$ m の駐車車両の後端が $X = 0$ m, 車両の中心が $Y = 0$ m に位置し, $l_{0-xcr} = 4$ m, $l_{0-yc} = 3$ m, $l_{0-xcf} = 4$ m, $k_c = 1$ m, のとき, 駐車車両が発生する斥力ポテンシャルを図 5.1.7 に示す.

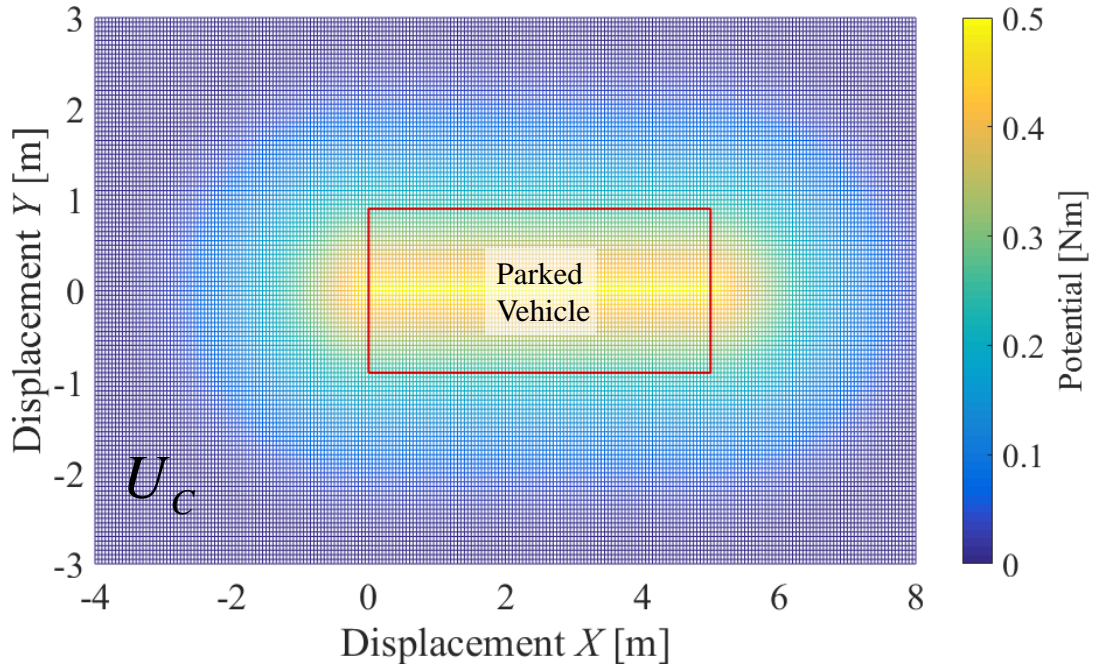


Fig. 5.1.7 Repulsive potential of parked vehicle

5.1.2 自転車の他者追い越し場面

歩行者と自転車の間、または自転車同士の間には作用する斥力ポテンシャルを図 5.1.8 のように設定する．駐車車両の回避場面同様，追い越し開始時における自転車から追い越し対象までの進行方向距離は，追い越し時における側方間隔と比較して非常に長い点を考慮し，進行方向に長く，横方向に短い自然長を持つ楕円形とする．図 5.1.8 に示すように，歩行者を中心とした移動座標系を取り，自転車の座標が (x_{cyc}, y_{cyc}) のとき，歩行者から自転車へ作用する斥力ポテンシャルは式(5.1.6)のように定義される．

$$U_{obj}(x, y) = \frac{1}{2} \left(k \sqrt{\left(\frac{x_c - x_o}{l_{0-xobj}} \right)^2 + \left(\frac{y_c - y_o}{l_{0-yobj}} \right)^2} \right)^2 \quad (5.1.6)$$

ただし， l_{0-xobj} [m]は x 軸方向の自然長， l_{0-yobj} [m]は y 軸方向の自然長， k_{obj} [N/m]は追い越し対象が発生する斥力ポテンシャルの仮想ばね定数である．また，斥力ポテンシャルは図 5.1.8 の楕円で示す自然長の内側に入ってから初めて作用する．図 5.1.8 のように歩行者を原点に座標系を取ったとき， $l_{0-xobj} = 5$ m， $l_{0-yobj} = 2$ m， $k_{obj} = 1$ N/m のとき，発生する斥力ポテンシャルを図 5.1.9 に示す．

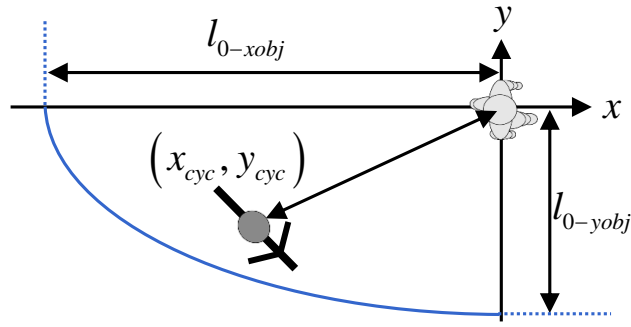


Fig. 5.1.8 Definition of repulsive potential between objects

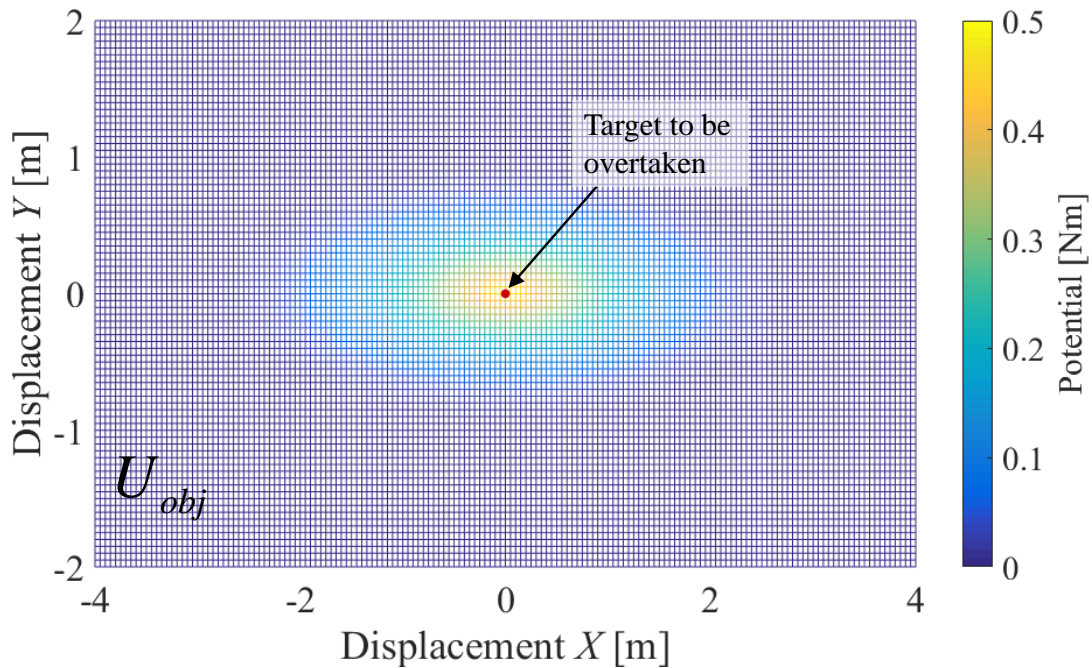


Fig. 5.1.9 Repulsive potential of the target to be overtaken

5.2 経路候補の生成およびポテンシャル最適化に基づく妥当性の評価

本研究では、対象者が将来、どのように移動するかを予測する際、図 5.2.1 に示すような経路候補を生成する。経路候補は予測対象者が $\Delta t = 1$ 秒毎に一定の角速度で進行方向を変えた場合を想定し、 1.5deg/sec 刻みで直進と左右の合計 31 の経路から構成される。また、各経路候補は 3 ステップ後までの通過点を持つ。各経路の妥当性を評価する方法としては、各通過点におけるポテンシャルの値を合計し、最小値を取った経路をその時刻における最適な経路として採用する。このとき、予測対象ではない対象者は初期位置での運動を継続するものとして考える。

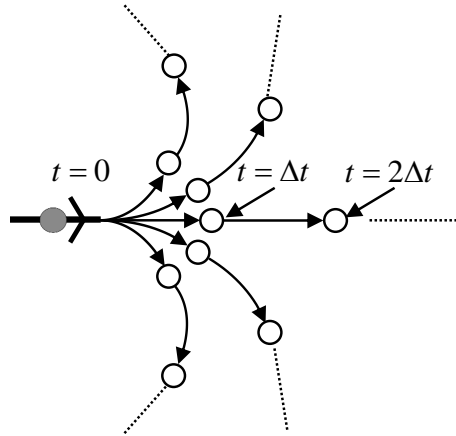


Fig. 5.2.1 Set of trajectory candidate

以上より求めた最適な経路に基づき，対象者の位置を Δt 秒だけ移動させ，そこを Δt 秒後の予測位置とする．ここで注意すべきことは，予測には数ステップ後までの候補点を用いながら，進める位置は 1 ステップ分に留める点にある．次の時刻における移動先を求める際には，上記の処理を繰り返し行う．図を用いて説明すると，図 5.2.2(a)に示す初期状態から，次のステップ $T_P = \Delta t$ 秒の状態を(b)に示すように予測した場合， Δt 秒後の予測位置から再び経路候補を描き，同様に描く経路の評価値を計算し，ポテンシャルの低い経路上へ移動させることで，予測時間 $T_P = 2\Delta t$ 秒後の予測位置とする．この行程を繰り返し，予測サンプリング $\Delta T_P = 1$ 秒毎に 5 秒後までの移動を予測する．

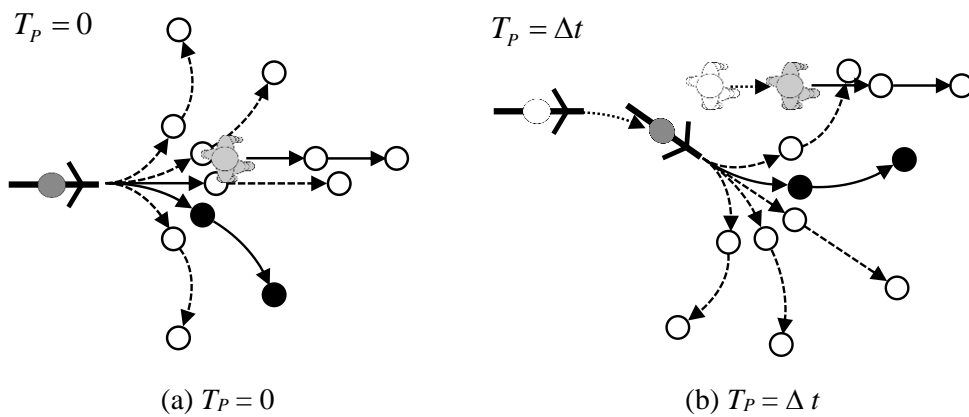


Fig. 5.2.2 Motion prediction using trajectory candidate

5.3 移動制限

5.3.1 可視判定

自転車の他者追い越し場面において、追い越しを行う自転車は追い越し対象が発生させる斥力ポテンシャルの影響によって進路を変更する挙動を取る。一方、追い越される側の歩行者や自転車が、後方から接近する自転車の斥力ポテンシャルの影響を受けて初期位置より更に路肩へ寄ってしまった場合、追い越しを行う自転車の移動予測結果について横方向の変位が小さく見積もられてしまう。よって、図 5.3.1 に示すように移動予測を行う対象の前方 (FOV = 180°) を可視領域とし、後方に位置する他者が発生する斥力ポテンシャルの影響は受けないものとする。ただし、一度可視領域に入った他者の影響は受け続けるものとし、追い越しを行う自転車は対象を追い越した後も影響を受けるものとする。

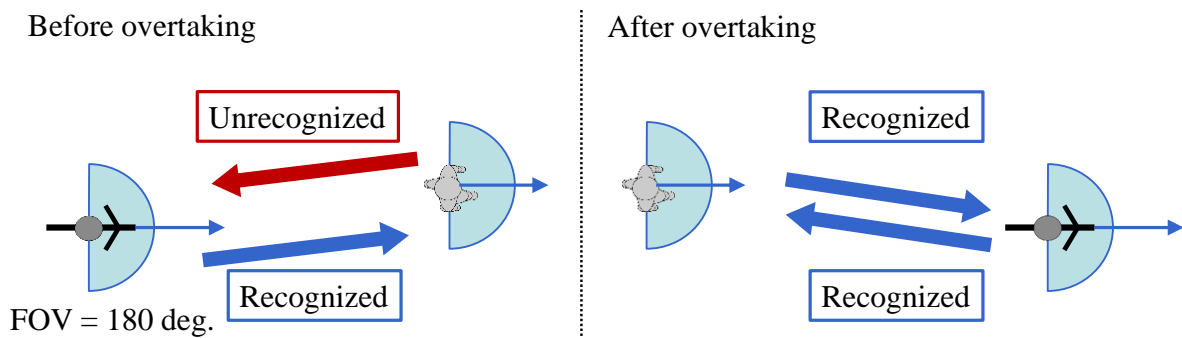


Fig. 5.3.1 Recognition considering field of view

5.3.2 目標地点の設定

今後、本研究で提案する移動予測手法を複雑な場面へ応用することも想定し、移動予測の際に用いる目標地点を設定する。複雑な場面の例として、1 対複数のすれ違い場面を図 5.3.2 に示す。このような場面において、移動の自由度が高いと他者や障害物を避けるために図の左から右へ移動する歩行者が U ターンするような予測結果が得られることも考えられる。そこで、パラメータ設定に大きく依存することなく不自然な挙動を制限するため、経路候補の最終的な移動方向のベクトルと目標地点へ向かうベクトルが成す角度に基づき、0° (目標地点へ向かう経路候補) で最小、180° (目標地点と真逆へ向かう経路候補) で最大となるような重みをポテンシャル値として加算する。ただし、重み係数などは試行錯誤的に決定する。目標地点へ向かうための重み U_G を式(5.3.1)に示す。

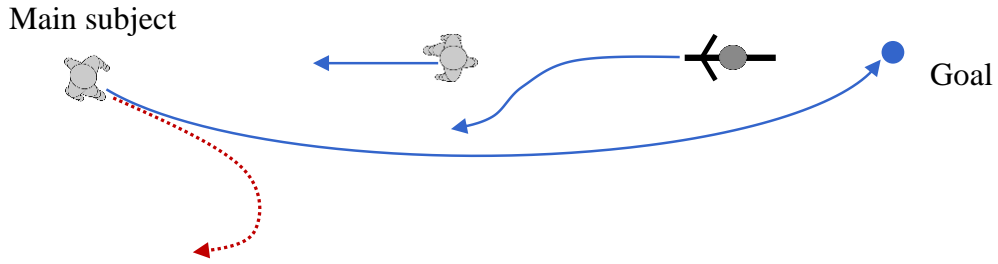


Fig. 5.3.2 Example of the complicated scene

$$U_G(\theta_G) = w_G \cdot \exp\left(-\frac{(\cos(\theta_G) + 1.0)^2}{\sigma_G}\right) \quad (5.3.1)$$

ただし, θ_G [rad] は目標地点と最終的な移動方向のなす角, w_G [Nm] は目標地点と異なる方向へ向かおうとした際に与えられるポテンシャル値の重み, σ_G は θ_G によって与えられるポテンシャル値の広がりに影響するパラメータである. 重み $w_G = 1.0$ Nm とし, σ_G を 0.05, 0.5, 5 と変化させた際の, 目標地点へ向かわない場合に加算されるポテンシャル値を図 5.3.3 に示す.

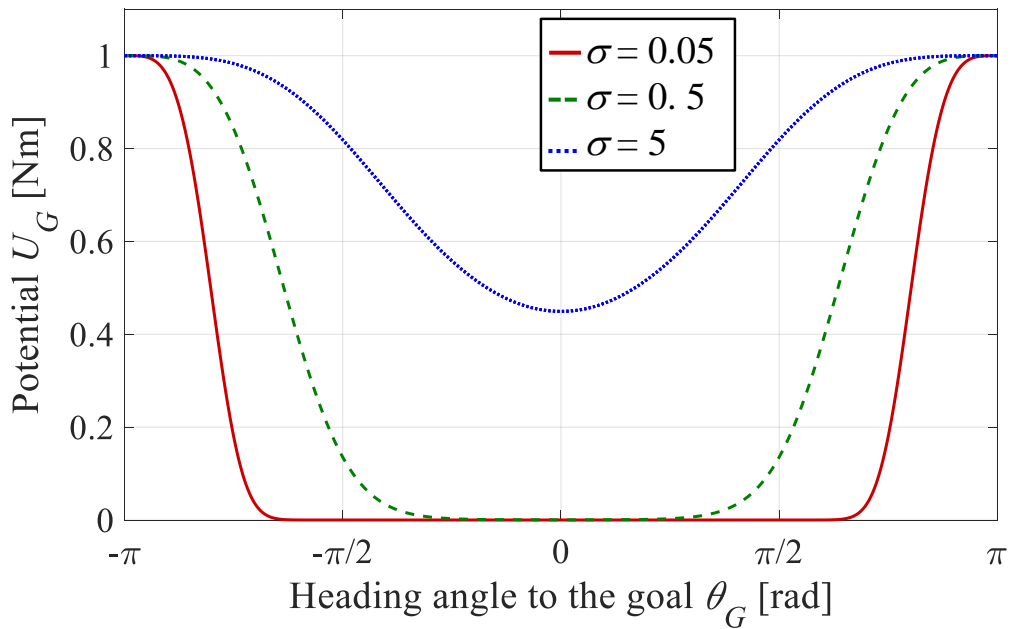


Fig. 5.3.3 Potential limits heading angle

5.4 移動軌跡の分析結果を反映したパラメータ設定

5.4.1 歩行者の駐車車両回避場面

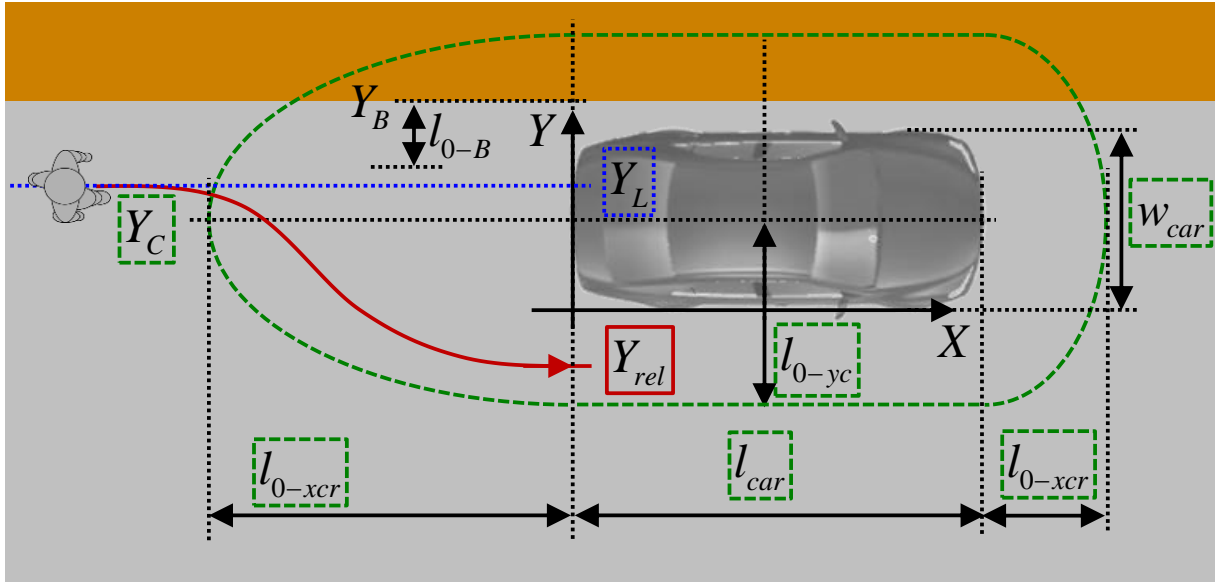


Fig. 5.4.1 Parameters of parked vehicle avoidance situation

歩行者の駐車車両回避場面において、図 5.4.1 のように車両右後端に座標系の原点を取り、道路進行方向を X 軸、横方向を Y 軸としたとき、歩行者の走行レーンが $Y = Y_L$ [m]、車両の左右中央が $Y = Y_C$ [m]、駐車車両が発生する斥力ポテンシャルについて横方向の仮想ばねの自然長が l_{0-yc} [m] のとき、歩行者が駐車車両の側方を通過する際の Y 座標を Y_{rel} [m] とする。このとき、駐車車両の前方から X 軸マイナス方向を見た際のポテンシャルの断面を図 5.4.2 に示す。図 5.4.2 について、ポテンシャル値が縦軸、図 5.4.1 の Y 軸が横軸である。歩行者を走行レーンへ戻そうとする引力ポテンシャルを青い点線、歩行者を駐車車両から遠ざけようとする斥力ポテンシャルを緑の点線、2 つのポテンシャルの和を赤い実線で示す。本研究で提案する移動予測手法はポテンシャル値の合計が最も低くなる経路を選択するため、歩行者は車両側方において、合計したポテンシャル値の極小値の部分を移動するものとして予測される。そこで、駐車車両の横を通過する際の側方間隔が第 4.2 節で設定した値となるよう、走行レーンへの引力ポテンシャルと駐車車両からの斥力ポテンシャルの各パラメータを設定する。

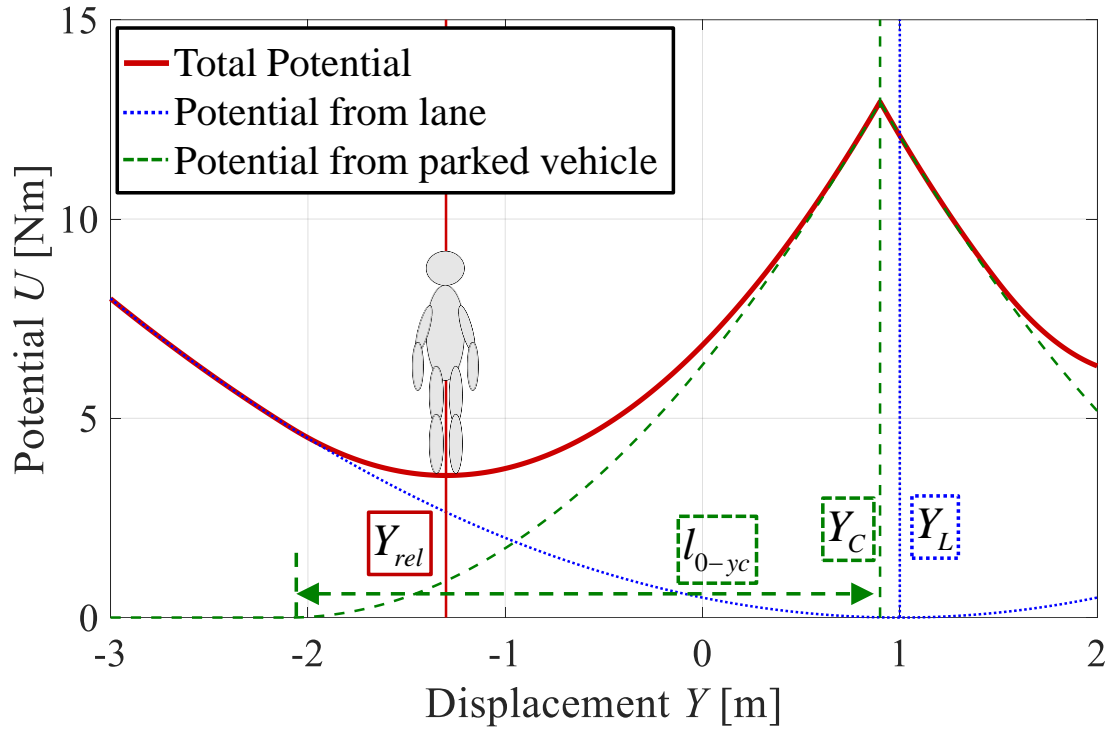


Fig. 5.4.2 Cross section of potential

図 5.4.1 のように座標系を取ったとき，駐車車両の横の領域で発生する斥力ポテンシャル U_c [Nm]は式(5.4.1)のように表される．

$$U_c(Y) = \frac{1}{2}k_c \left(1 - \left| \frac{Y - Y_C}{l_{0-yc}} \right| \right)^2 \quad (5.4.1)$$

よって，2つのポテンシャルの和は式(5.4.2)で表すことができる．

$$\begin{aligned} U(Y) &= U_l(Y) + U_c(Y) \\ &= \frac{1}{2}k_l(Y - Y_L)^2 + \frac{1}{2}k_c \left(1 - \left| \frac{Y - Y_C}{l_{0-yc}} \right| \right)^2 \end{aligned} \quad (5.4.2)$$

ここで， $Y = Y_{rel}$ の位置で極小値を取るような仮想ばねのばね定数を求めるため，式(5.4.2)を Y について微分（式(5.4.3)）する．

$$\frac{dU}{dY} = k_l(Y - Y_L) + \frac{k_c}{l_{0-yc}} \left(1 - \left| \frac{Y - Y_C}{l_{0-yc}} \right| \right) \quad (5.4.3)$$

式(5.4.3)は $Y = Y_{rel}$ の位置で極小値を取るため、式(5.4.4)が成り立つ。

$$U'(Y_{rel}) = k_l(Y_{rel} - Y_L) + \frac{k_c}{l_{0-yc}} \left(1 - \left| \frac{Y_{rel} - Y_C}{l_{0-yc}} \right| \right) = 0 \quad (5.4.4)$$

よって、走行レーンへの引力ポテンシャルと駐車車両の斥力ポテンシャルの間には式(5.4.5)の関係が成り立つように定める必要がある。

$$k_c = -\frac{Y_{rel} - Y_L}{l_{0-yc}} \frac{k_l l_{0-yc}^2}{Y_{rel} - Y_C}, \quad (5.4.5)$$

歩行者が駐車車両を回避するために進路変更をし始めるタイミングは、主に駐車車両が発生する斥力ポテンシャルの X 軸方向の自然長 l_{0-xcr} [m] と Y 軸方向の自然長 l_{0-yc} [m] によって変化する。直進する経路を取った場合、走行レーンへ戻そうとするポテンシャル値は発生しないが、駐車車両からの斥力ポテンシャル値は増加する。逆に、歩行者が駐車車両を避ける経路を取った場合、駐車車両からの斥力ポテンシャルは減少するが、走行レーンへ戻そうとするポテンシャル値は増加する。2つのポテンシャルの和が最小となる位置は求められるが、移動予測を行う際には予測対象の初期位置、移動速度、ポテンシャルを評価する経路候補の設定など複数の要因が影響するため、第 4.2 節で示した回避開始タイミングの値を取るよう試行錯誤的に決定する。参考として、自転車が歩行者を追い越す場面におけるパラメータの設定方法を図 5.4.3 に示す。

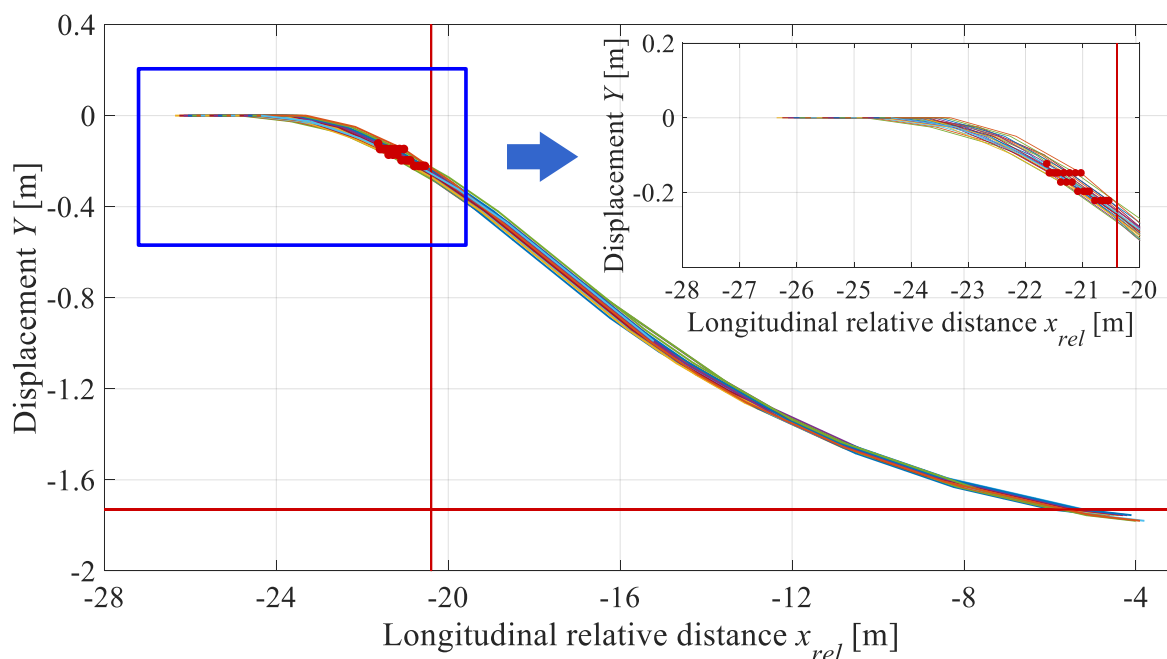


Fig. 5.4.3 Parameter setting

図 5.4.3 において、赤い実線で示した歩行者から自転車までの相対距離 $x_{rel} = -20.4$ m の直線と $Y = -1.73$ m の直線は、それぞれ 99% の追い越し事例を考慮する場合の追い越し開始時の相対距離と追い越し時の側方間隔を示す。自転車と歩行者の進行方向の初期相対距離を変化させ、移動予測シミュレーションを行う。図 5.2.2 に示したように、最もポテンシャルが低くなる経路候補を選択して 1 タイムステップずつ移動させることを繰り返し、追い越しを行う自転車が目標とする側方間隔に達するまで計算する。このとき、回避対象となる駐車車両、追い越し相手となる歩行者・自転車が発生する斥力ポテンシャルに関して、設定した条件を満たすように進行方向の仮想ばねの自然長および横方向の仮想ばねの自然長を調節する。

初期位置から Y 軸方向へ最初に 0.1 m 以上移動した際の X 座標を、回避・追い越しを開始した座標として記録する。この座標が、初期位置によらず設定した追い越し開始位置より手前になるようにする。また、回避・追い越し時に対象との側方間隔を維持していることにも注意する。ただし、歩行者・自転車の速度は、それぞれの場面における平均値を用いる。

ここで、駐車車両や歩行者・自転車が発生する斥力ポテンシャルの横方向の自然長が、進行方向のパラメータである回避・追い越し開始位置へ影響する理由を示す。自転車の自転車追い越し場面において、68% の追い越し事例を想定した際の全ポテンシャルを図 5.4.4 (a) , 図 5.4.4 (a) で設定したパラメータのうち、追い越される自転車が発生する斥力ポテンシャル

の横方向の自然長のみを 1.5 倍した際の全ポテンシャルを図 5.4.4 (b) に示す．各 X 座標から Y 軸方向にポテンシャルを見たとき，最小となる位置をマゼンタの点で示す．(a) ではポテンシャルの低い領域が自転車の前後方向 (X 軸方向) に広いのに対し，自転車の横方向 (Y 軸方向) の自然長のみ 1.5 倍した (b) では，ポテンシャルが低い領域が前後方向に縮小している様子がわかる．このように，回避・追い越し開始位置と，対象との側方間隔は，斥力ポテンシャルの前後方向，横方向それぞれの自然長に依存している．

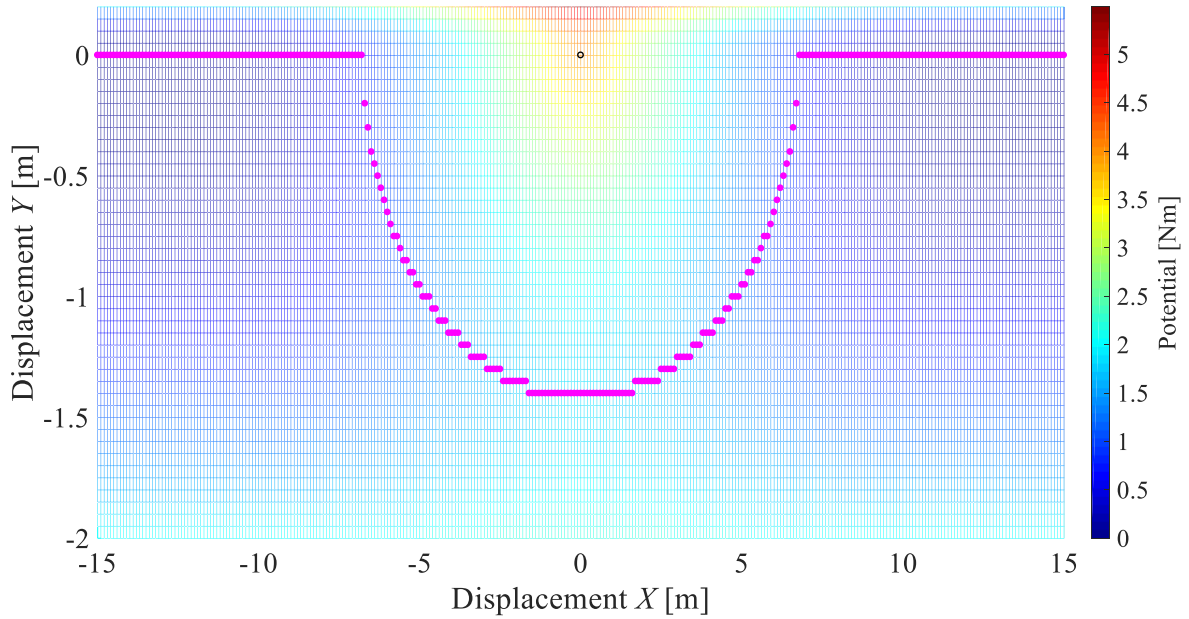


Fig. 5.4.4 (a) Effect of lateral natural length ($L_{0-y} = 2.56$ m)

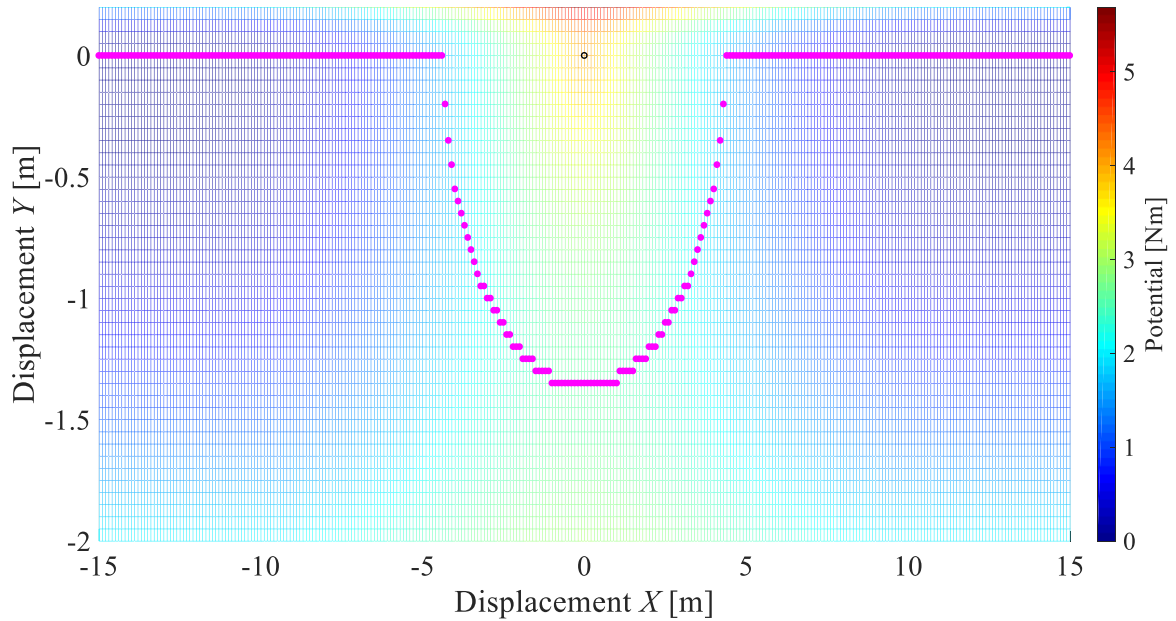


Fig. 5.4.4 (b) Effect of lateral natural length ($L_{0-y} = 3.83$ m)

以上より, 図 5.4.1 に示す歩行者の駐車車両回避場面における各パラメータの座標を表 5.4.1, 移動軌跡の分析結果を反映した仮想ばねの自然長とばね定数を表 5.4.2 の通り設定する.

Table 5.4.1 Parameters of displacement in parked vehicle avoidance situation

Subject	Vehicle			Lane	Road boundary	Lateral margin	
Symbol	Y_c [m]	l_{car} [m]	w_{car} [m]	Y_L [m]	Y_B [m]	Y_{rel} [m]	
Value	0.9	4.7	1.8	1	1.9	99%	-1.2
						95%	-1.0
						68%	-0.8

Table 5.4.2 Parameters of potential in parked vehicle avoidance situation

Subject	Parked vehicle							Lane	Road boundary	
Symbol	l_{0-xcr} [m]		l_{0-yc} [m]	l_{0-xcf} [m]		k_C [N/m]		k_L [N/m]	l_{0-yc} [m]	k_B [N/m]
Value	99%	14.0	2.5	99%	7.0	99%	23.4	1.0	0.7	100.0
	95%	13.5		95%	6.8	95%	17.1			
	68%	10.6		68%	5.3	68%	12.8			

歩行者の駐車車両回避場面におけるポテンシャルのパラメータを表 5.4.1 と表 5.4.2 の通り設定した際のポテンシャルフィールドを図 5.4.5 から図 5.4.7 に示す.

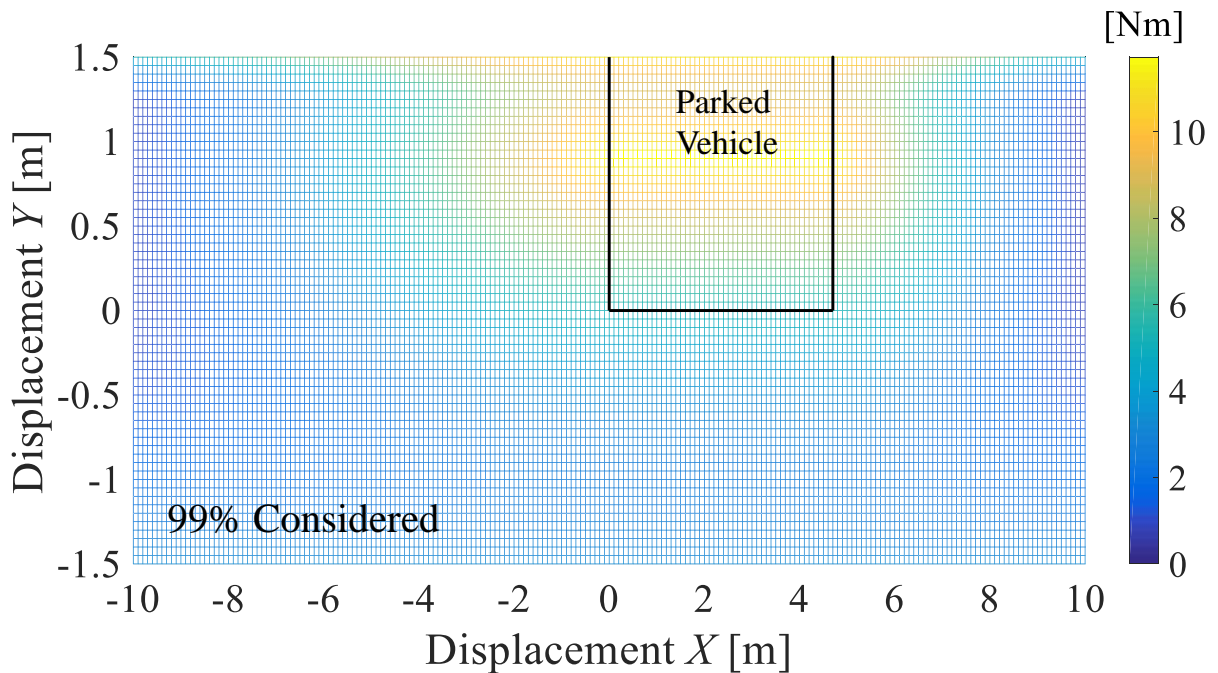


Fig. 5.4.5 Potential field of all factor considering 99% case

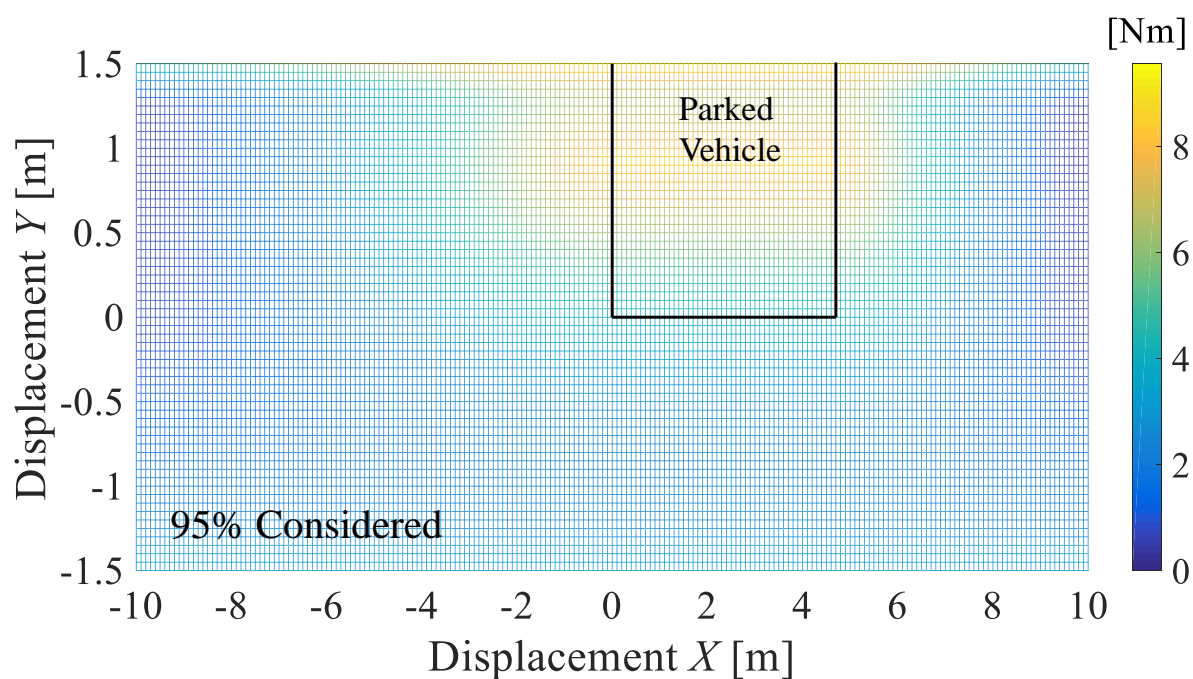


Fig. 5.4.5 Potential field of all factor considering 95% case

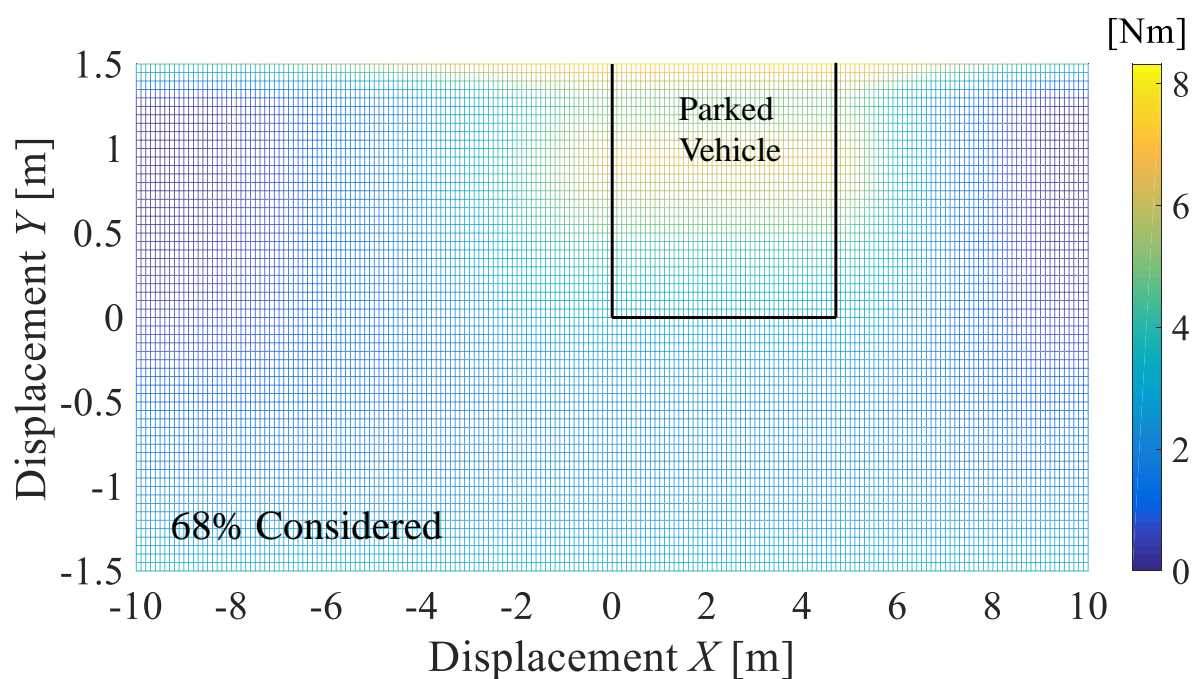


Fig. 5.4.7 Potential field of all factor considering 68% case

5.4.2 自転車の他者追い越し場面

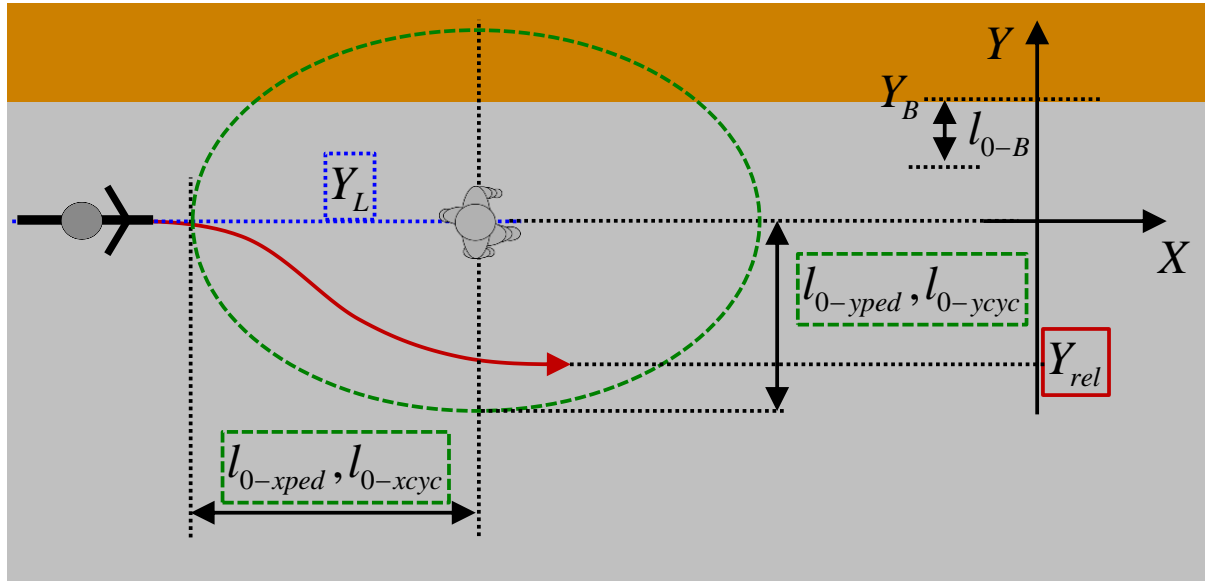


Fig. 5.4.8 Parameters of overtaking situation

自転車の他者追い越し場面において, 図 5.4.8 のように座標系を取り, 道路進行方向を X 軸, 横方向を Y 軸としたとき, 追い越しを行う自転車, 追い越される歩行者および自転車の走行レーンが $Y = Y_L$ [m], 追い越しを行う自転車と追い越し対象との側方間隔 $Y = Y_{rel}$ [m], 追い越し対象の歩行者・自転車が發生する斥力ポテンシャルの X 軸方向の自然長を l_{0-xped} , l_{0-xcyc} [m], Y 軸方向の自然長を l_{0-yped} , l_{0-ycyc} [m] とする. 各パラメータは, 5.4.1 項同様, 追い越しを行う自転車が追い越し対象の真横に位置した際のポテンシャルの極小値が第 4.3 節で設定した値を取るよう設定する. 図 5.4.2 中の駐車車両の中心位置 Y_c を, 追い越し対象の歩行者・自転車の位置 Y_{ped} , Y_{cyc} [m] に, 横方向のばねの自然長を l_{0-yped} , l_{0-ycyc} [m] に置き換えると, 走行レーンの引力ポテンシャルのばね定数 k_L と歩行者・自転車の斥力ポテンシャルのばね定数 k_{ped} , k_{cyc} はそれぞれ式(4.11)と式(4.12)で表される.

$$k_{ped} = -\frac{Y_{rel} - Y_L}{l_{0-yped} - Y_L} k_L \cdot l_{0-yped}^2 \quad (4.11)$$

$$k_{cyc} = -\frac{Y_{rel} - Y_L}{l_{0-ycyc} - Y_L} k_L \cdot l_{0-ycyc}^2 \quad (4.12)$$

追い越し開始タイミングを左右する，歩行者・自転車が発生する斥力ポテンシャルの進行方向の自然長 l_{0-xped} ， l_{0-xcyc} [m] についても，5.4.1 節で示した同様の方法で試行錯誤的に決定する．以上より，図 5.4.8 に示す自転車の歩行者追い越し場面における各パラメータを表 5.4.3，自転車の自転車追い越し場面における各パラメータを表 5.4.4 の通り設定する．

Table 5.4.3 Parameters of the scene cyclist overtakes pedestrian

Pedestrian						Lane	Road boundary		
Y_{ped} [m]	l_{0-xped} [m]		l_{0-yped} [m]	k_{ped} [N/m]		k_L [N/m]	Y_B [m]	l_{0-B} [m]	k_B [N/m]
0	99%	24.6	2.5	99%	14.0	1.0	1.5	1.5	100.0
	95%	21.2		95%	9.5				
	68%	15.2		68%	6.6				

Table 5.4.4 Parameters of the scene cyclist overtakes pedestrian

Cyclist						Lane	Road boundary		
Y_{cyc} [m]	l_{0-xcyc} [m]		l_{0-ycyc} [m]	k_{cyc} [N/m]		k_L [N/m]	Y_B [m]	l_{0-B} [m]	k_B [N/m]
0	99%	19.7	2.5	99%	16.1	1.0	1.5	1.5	100.0
	95%	17.6		95%	11.3				
	68%	16.4		68%	8.2				

自転車の歩行者追い越し場面におけるポテンシャルのパラメータを表 5.4.3 の通り設定した際のポテンシャルフィールドを図 5.4.9 から図 5.4.11 に，自転車が遅い自転車を追い越す場面におけるパラメータを表 5.4.4 の通り設定した際のポテンシャルフィールドを図 5.4.12 から図 5.4.14 に示す．

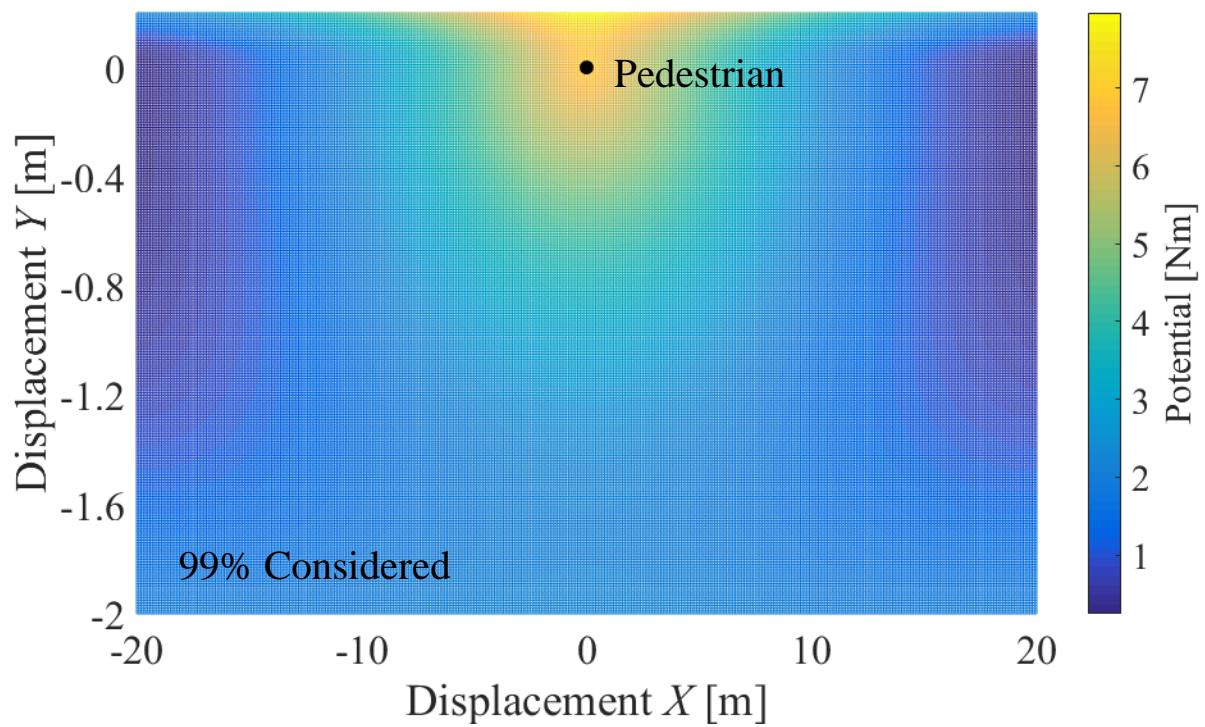


Fig. 5.4.9 Potential field of all factor considering 99% case in the scenario cyclist overtakes pedestrian

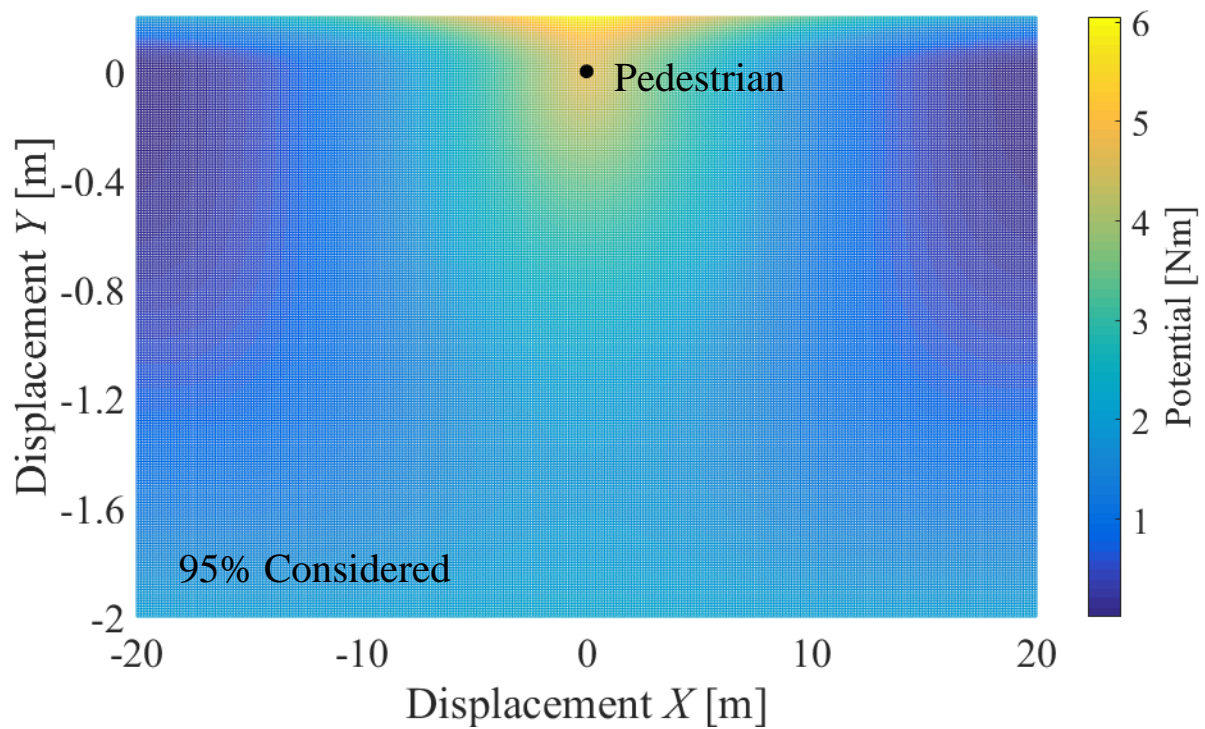


Fig. 5.4.10 Potential field of all factor considering 95% case in the scenario cyclist overtakes pedestrian

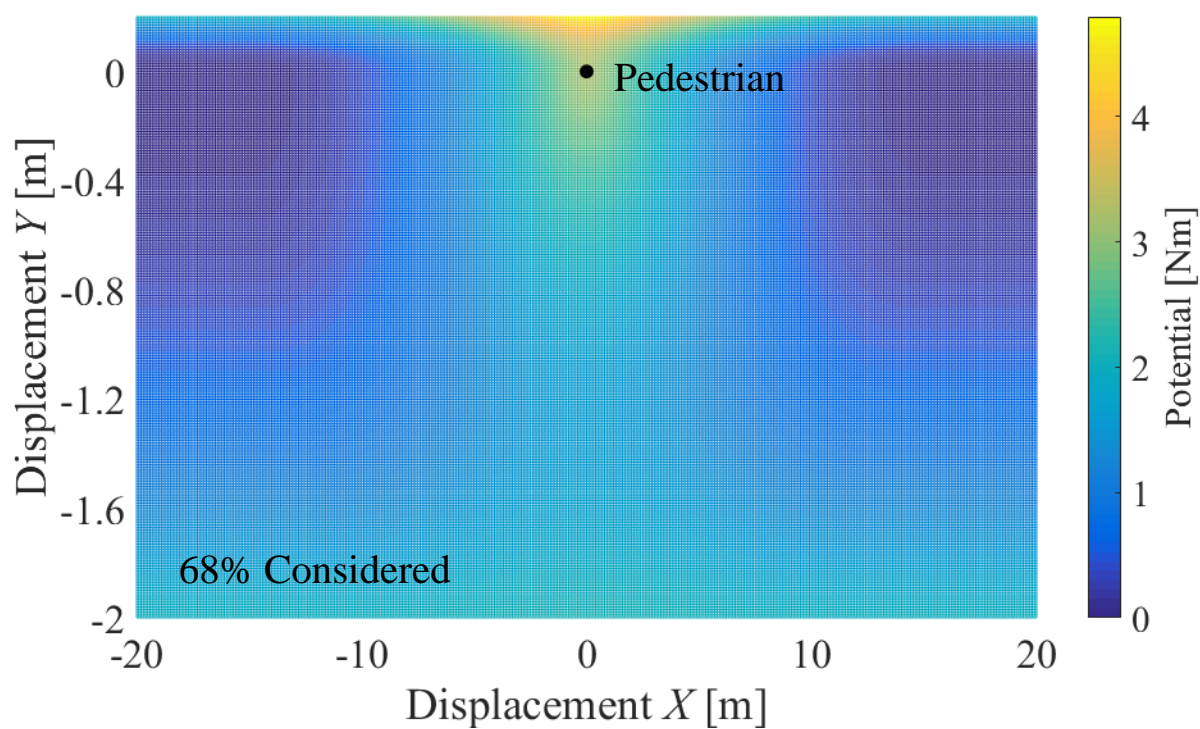


Fig. 5.4.11 Potential field of all factor considering 68% case in the scenario cyclist overtakes pedestrian

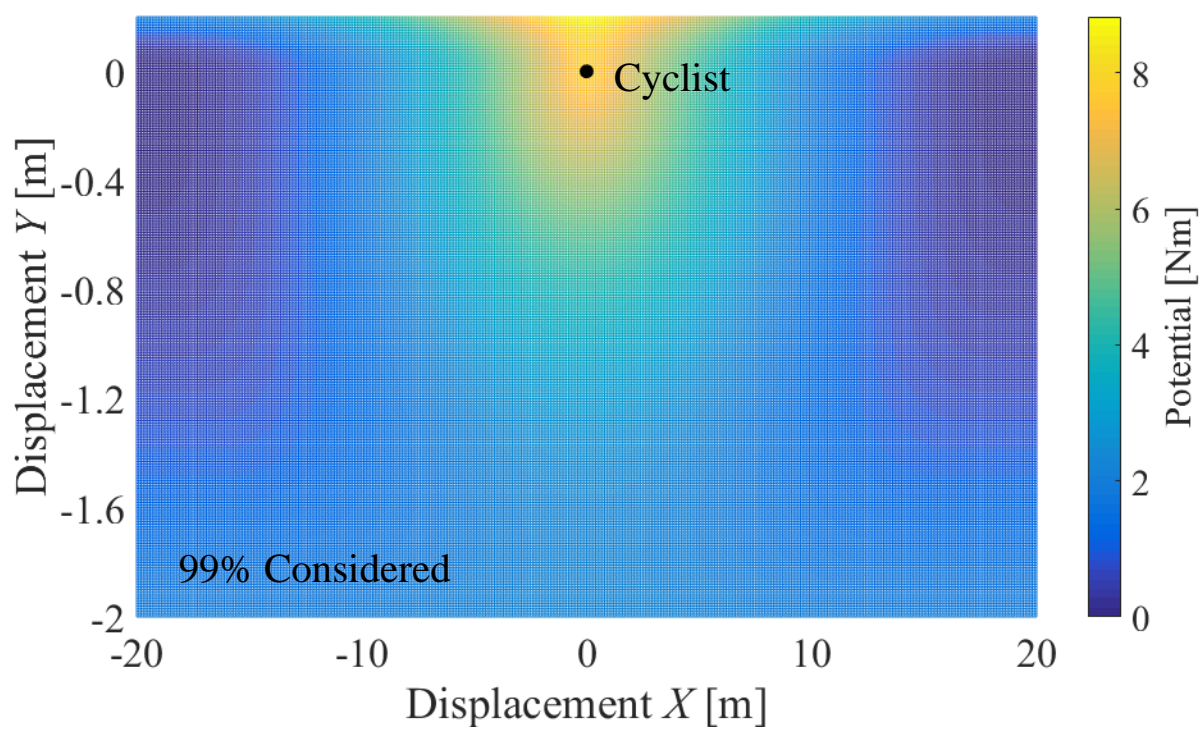


Fig. 5.4.12 Potential field of all factor considering 99% case in the scenario cyclist overtakes another cyclist

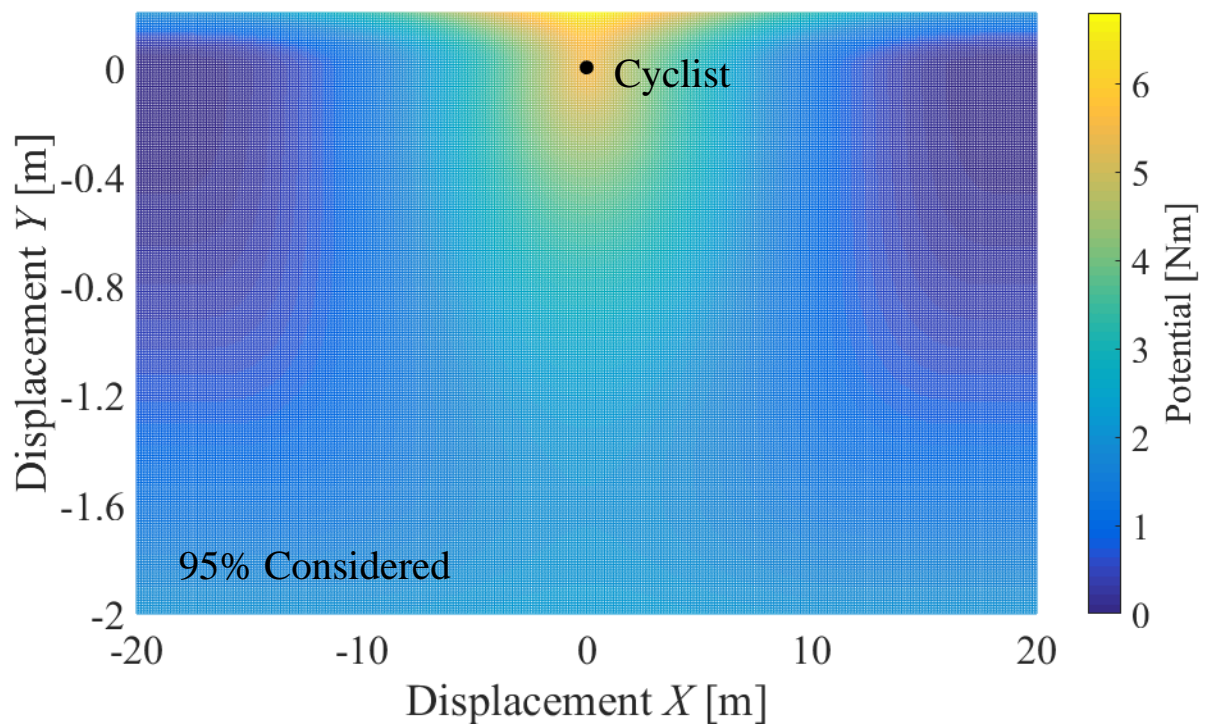


Fig. 5.4.13 Potential field of all factor considering 95% case in the scenario cyclist overtakes another cyclist

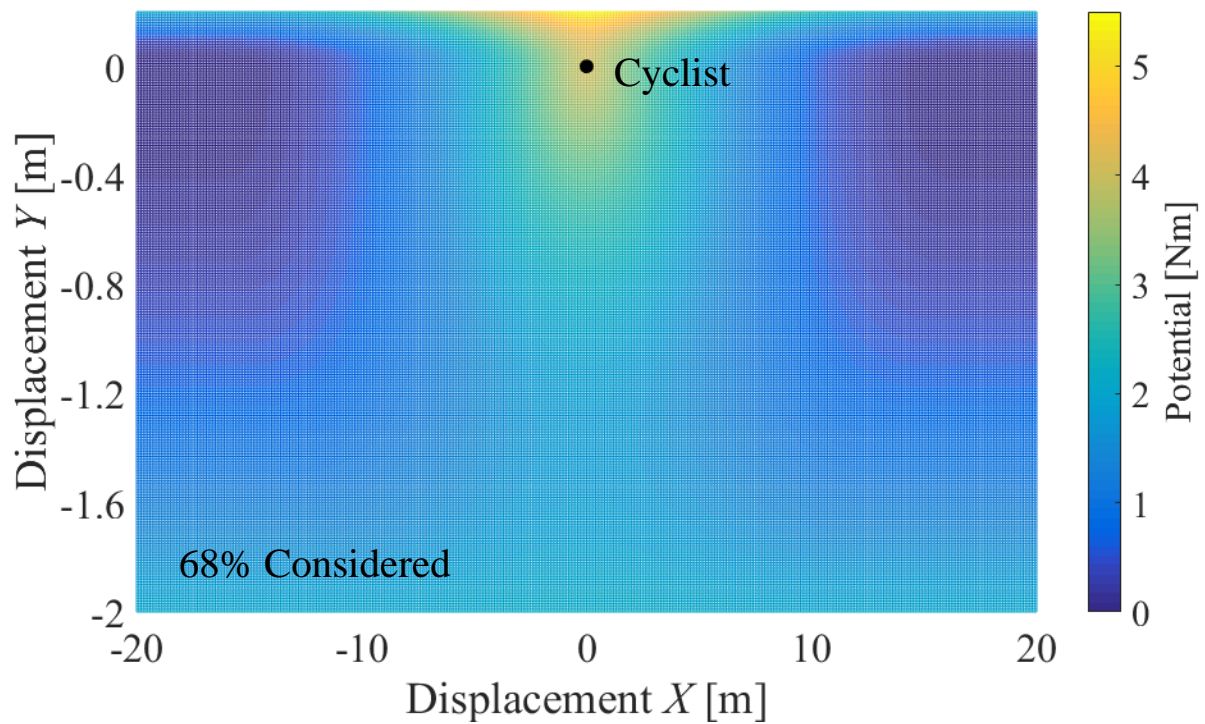


Fig. 5.4.14 Potential field of all factor considering 68% case in the scenario cyclist overtakes another cyclist

5.5 移動予測手法の検証

構築した移動予測手法について、移動予測シミュレーションを行った際に設計通りの予測結果を得ることができるのかどうかを検証する。

5.5.1 歩行者の駐車車両回避場面

移動予測シミュレーションでは、各時刻における歩行者の位置座標と移動速度を入力とし、そこから 1 秒刻みで 5 秒後までの予測位置を求め、妥当性を評価する。ポテンシャルフィールドの仮想ばねの自然長やばね定数は 5.4.1 項の表 5.4.1 および表 5.4.2 で示した値としたとき、99%の回避事例を考慮した全ての移動軌跡に基づく予測結果を図 5.5.1、このうち通常歩行時の移動軌跡に基づく予測結果を図 5.5.2、急ぎ歩行時の移動軌跡に基づく予測結果を図 5.5.3 に示す。同様に、95%の回避事例を考慮した全ての移動軌跡に基づく予測結果を図 5.5.4、このうち通常歩行時の移動軌跡に基づく予測結果を図 5.5.5、急ぎ歩行時の移動軌跡に基づく予測結果を図 5.5.6、68%の回避事例を考慮した全ての移動軌跡に基づく予測結果を図 5.5.7、このうち通常歩行時の移動軌跡に基づく予測結果を図 5.5.8、急ぎ歩行時の移動軌跡に基づく予測結果を図 5.5.9 に示す。

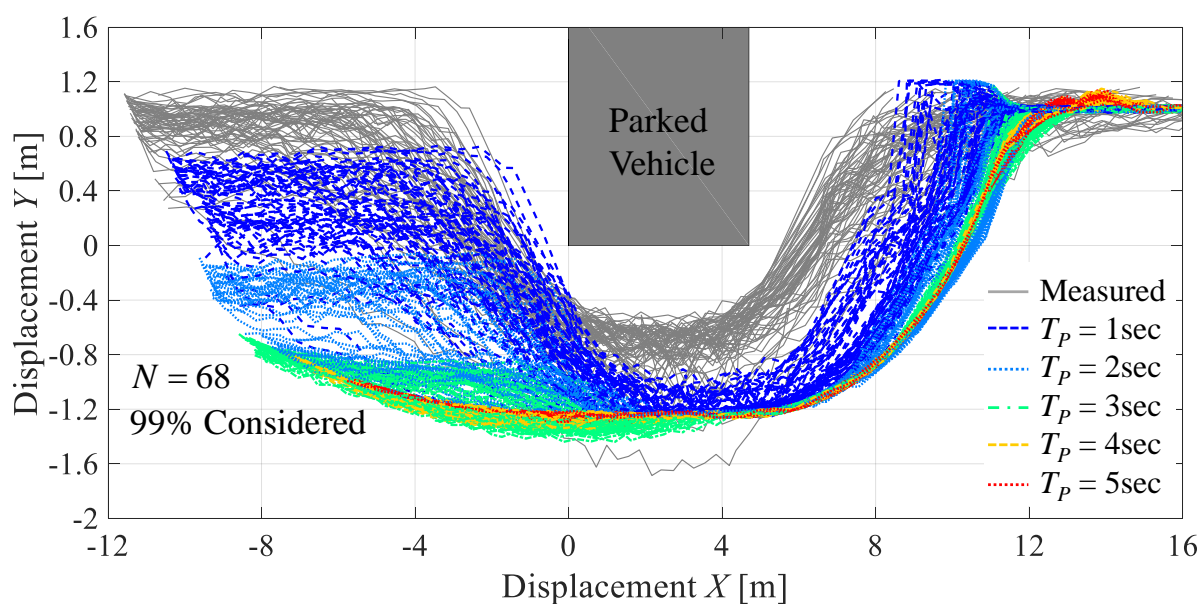


Fig. 5.5.1 All result of motion prediction in avoiding parked vehicle scene considering 99% case

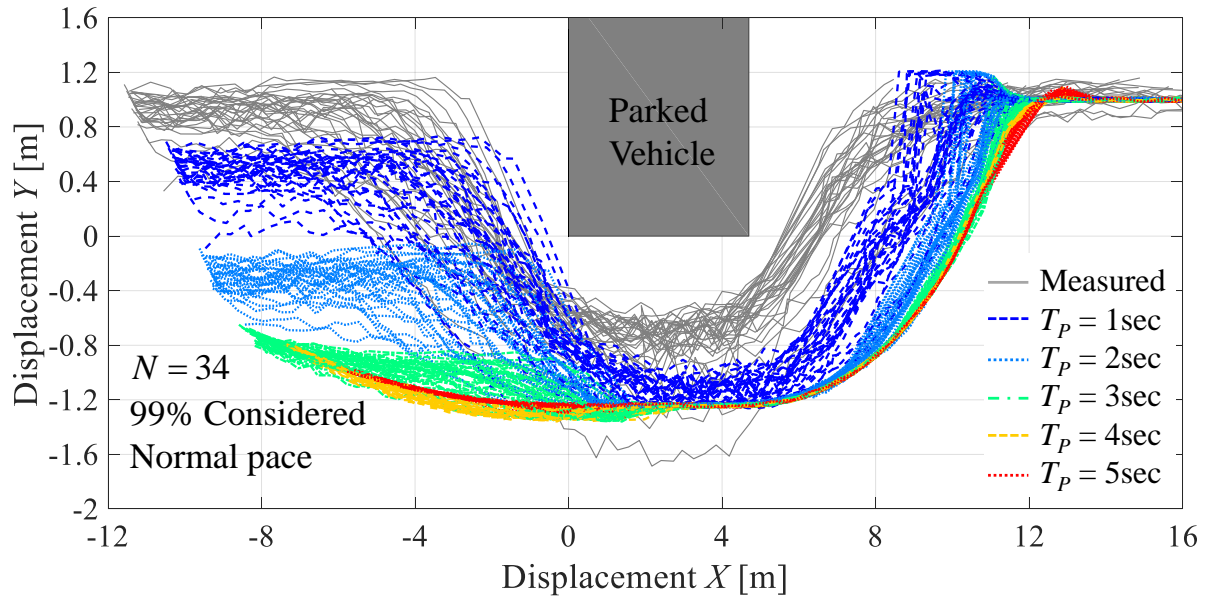


Fig. 5.5.2 Result of motion prediction of avoiding parked vehicle scene in normal pace considering 99% case

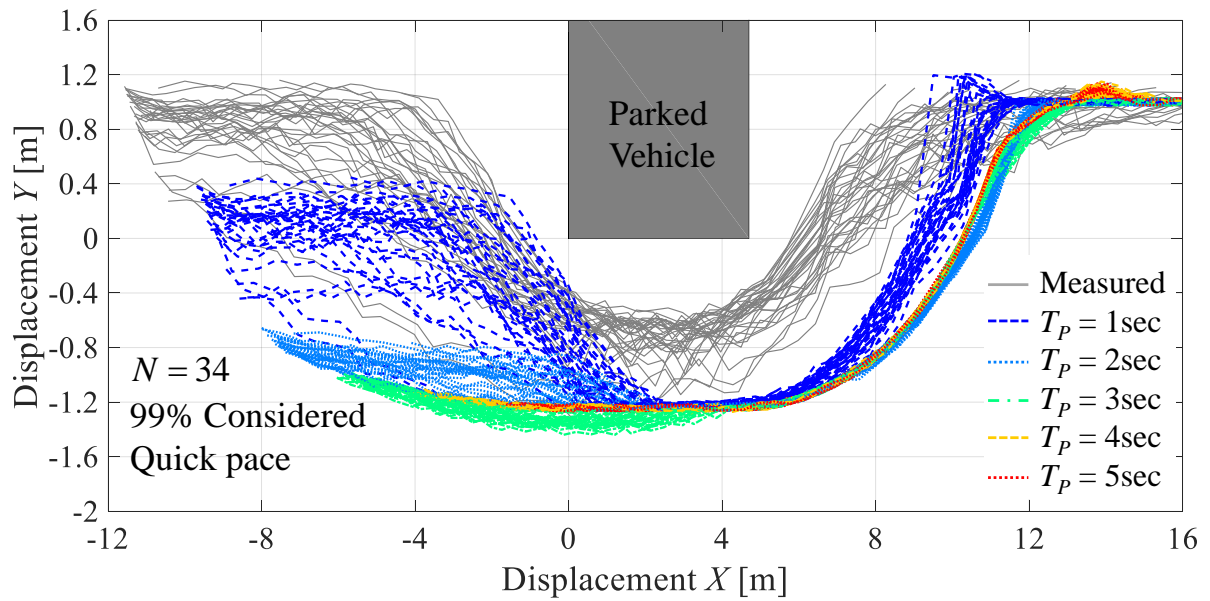


Fig. 5.5.3 Result of motion prediction of avoiding parked vehicle scene in quick pace considering 99% case

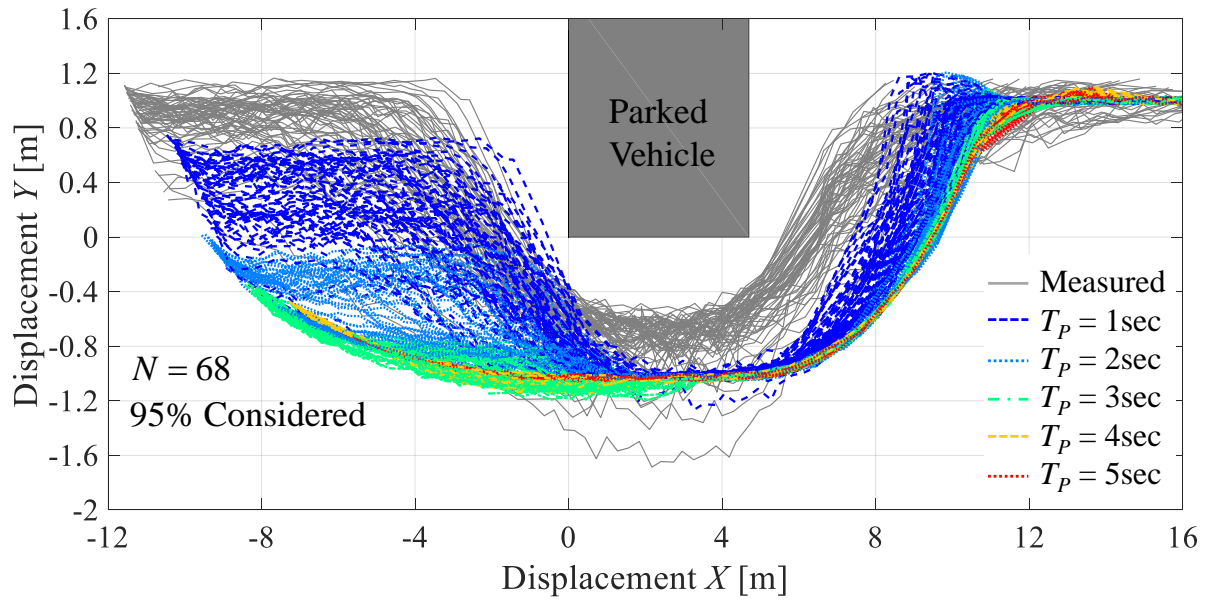


Fig. 5.5.4 All result of motion prediction in avoiding parked vehicle scene considering 95% case

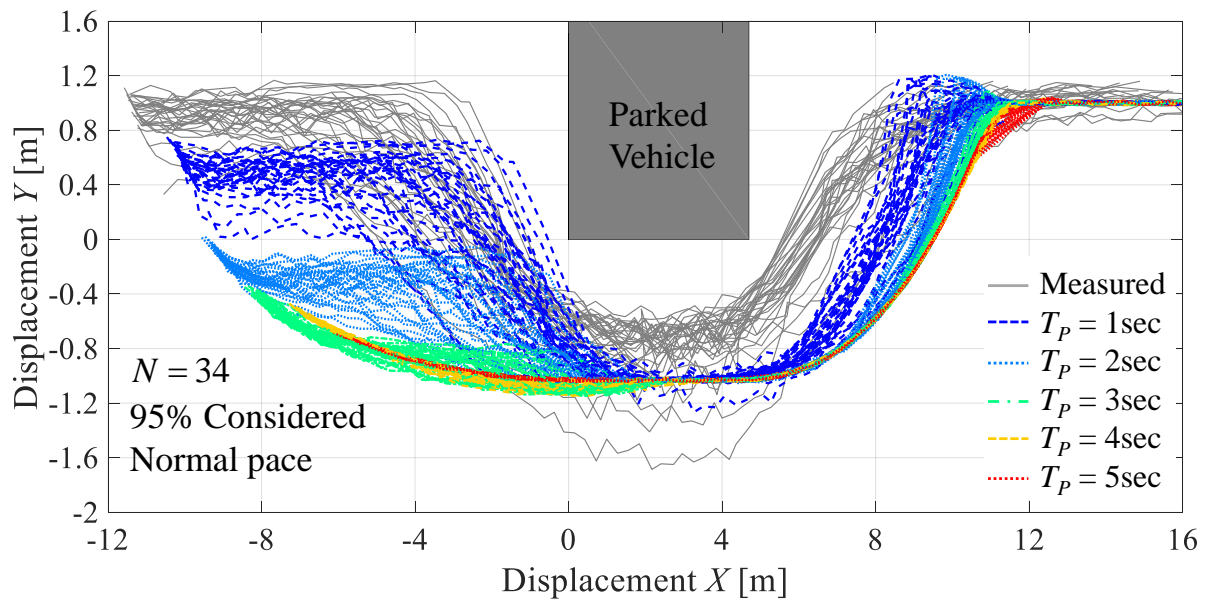


Fig. 5.5.5 Result of motion prediction of avoiding parked vehicle scene in normal pace considering 95% case

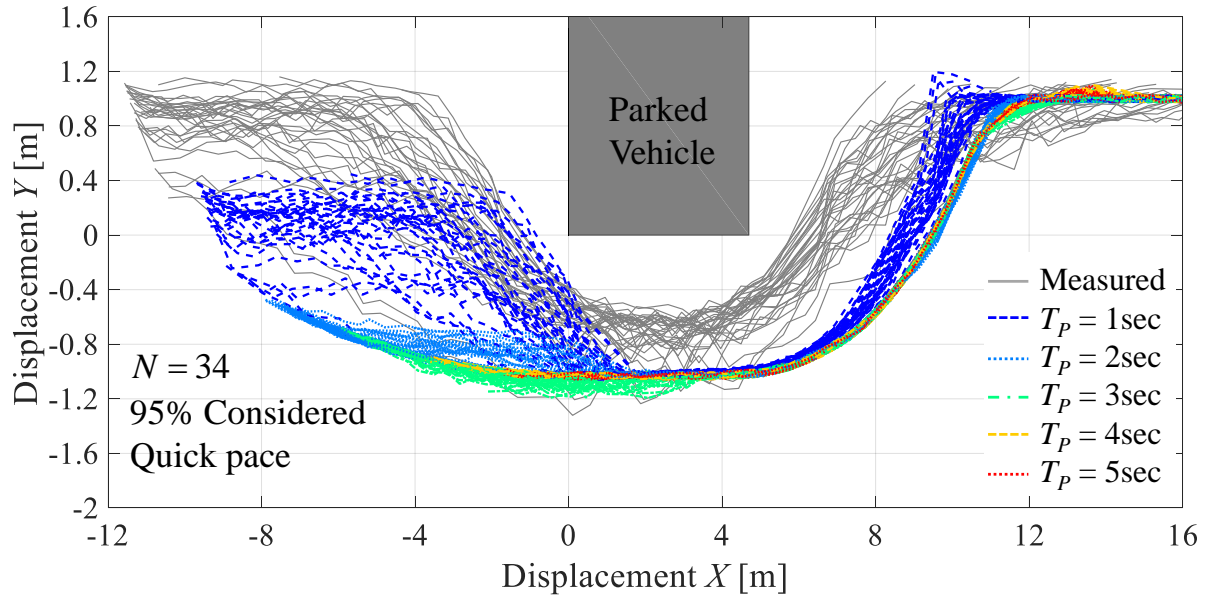


Fig. 5.5.6 Result of motion prediction of avoiding parked vehicle scene in quick pace considering 95% case

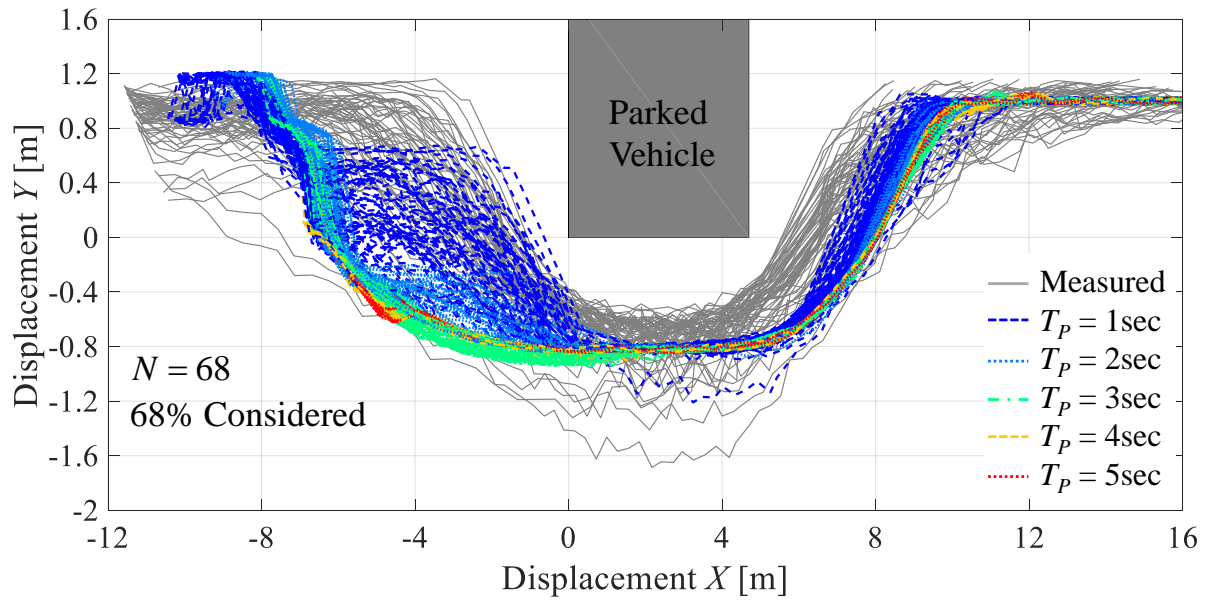


Fig. 5.5.7 All result of motion prediction in avoiding parked vehicle scene considering 68% case

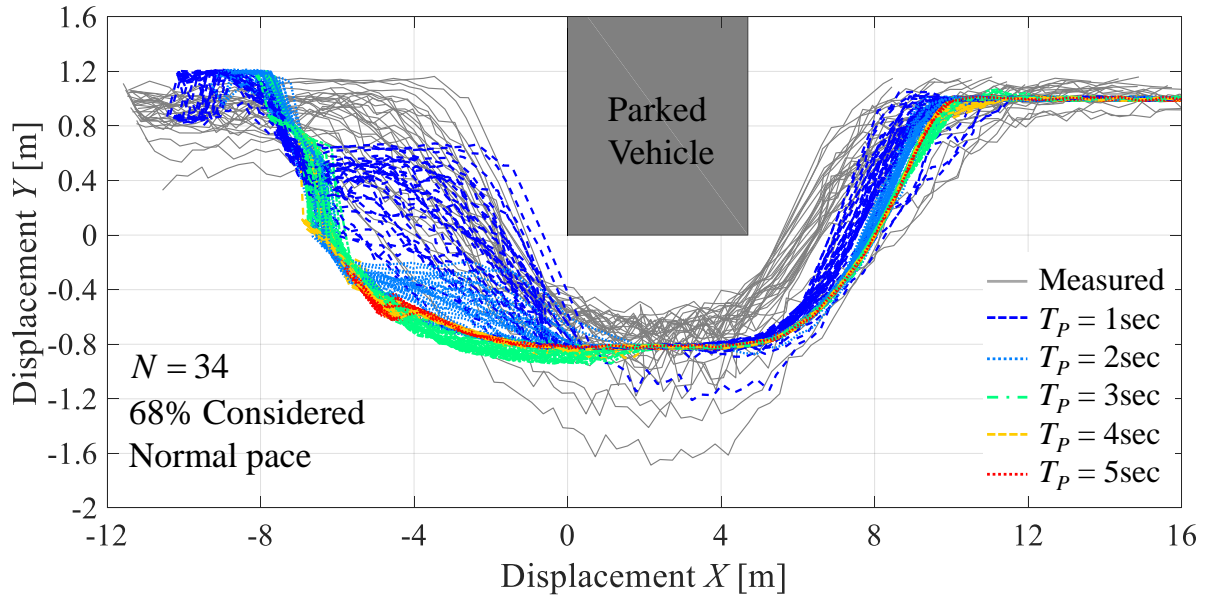


Fig. 5.5.8 Result of motion prediction of avoiding parked vehicle scene
in normal pace considering 68% case

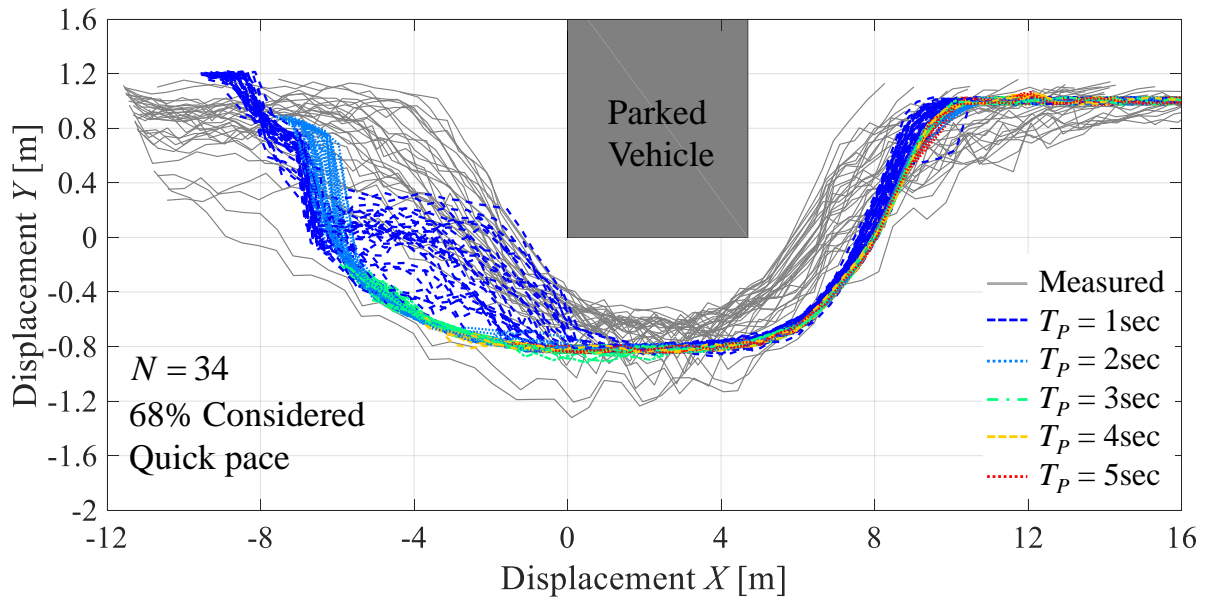


Fig. 5.5.9 Result of motion prediction of avoiding parked vehicle scene
in quick pace considering 68% case

図 5.5.1 から図 5.5.9 について，道路左側の駐車車両の右後端を原点とし，道路の進行方向を横軸，道路横方向を縦軸に取る．移動予測の入力に用いた，4.2.1 項で取得した実際の歩行者の移動軌跡を灰色の実線，1 秒後の予測位置を青の破線，2 秒後の予測位置を水色の点線，

3 秒後の予測位置を緑の一点鎖線，4 秒後の予測位置を橙の破線，5 秒後の予測位置を赤の点線で示す．

4.2.2 項で移動軌跡を分析した際と同様に，移動予測の結果についても駐車車両の後方で回避を開始してから駐車車両の横の領域までに注目する．各予測位置の描く軌跡は，各時刻における歩行者の位置（灰色の実線）が始点となって生成されるので，1 秒後の予測位置が描く軌跡は必然的に実験で取得した移動軌跡と近い位置を通るが，予測時間が長くなると共に駐車車両から離れる方向に予測軌道が生成される．本移動予測手法は，駐車車両を回避して移動する歩行者の後方を走行する車両のために予測結果を求めるものであり，4.1 節でも述べたように，対象の行動分析のうち想定した割合に応じて設定した範囲まで側方間隔を取るような経路を生成する．駐車車両の横を通過する際，駐車車両との側方間隔は第 4.2.3 項で設定した通り，99%の回避事例を考慮した条件では $y_{rel} = 1.3 \text{ m}$ ，95%の条件では $y_{rel} = 1.0 \text{ m}$ ，68%の条件では $y_{rel} = 0.8 \text{ m}$ の値におおよそ収束している様子がわかる．よって，このシミュレーション結果では全ての実験データの外側を通るような経路を予測できており，かつ，それが過大な側方間隔ではないことから，歩行者が駐車車両を追い越す場面において，本研究で提案する移動予測手法が有効であると考えられる．

5.5.2 歩行者の駐車車両回避場面

歩行者の駐車車両回避場面と同様，各時刻における自転車と追い越し対象の位置座標と移動速度をシミュレーションの入力とし，そこから 1 秒刻みで 5 秒後までの予測位置を求め，妥当性を評価する．ポテンシャルフィールドの仮想ばねの自然長やばね定数は 5.4.2 項の表 5.4.3 および表 5.4.4 で示した値としたとき，99%の回避事例を考慮した自転車の歩行者追い越し場面における予測結果を図 5.5.10，99%の回避事例を考慮した自転車の自転車追い越し場面における予測結果を図 5.5.11，95%の回避事例を考慮した自転車の歩行者追い越し場面における予測結果を図 5.5.12，95%の回避事例を考慮した自転車の自転車追い越し場面における予測結果を図 5.5.13，68%の回避事例を考慮した自転車の歩行者追い越し場面における予測結果を図 5.5.14，68%の回避事例を考慮した自転車の自転車追い越し場面における予測結果を図 5.5.15 に示す．

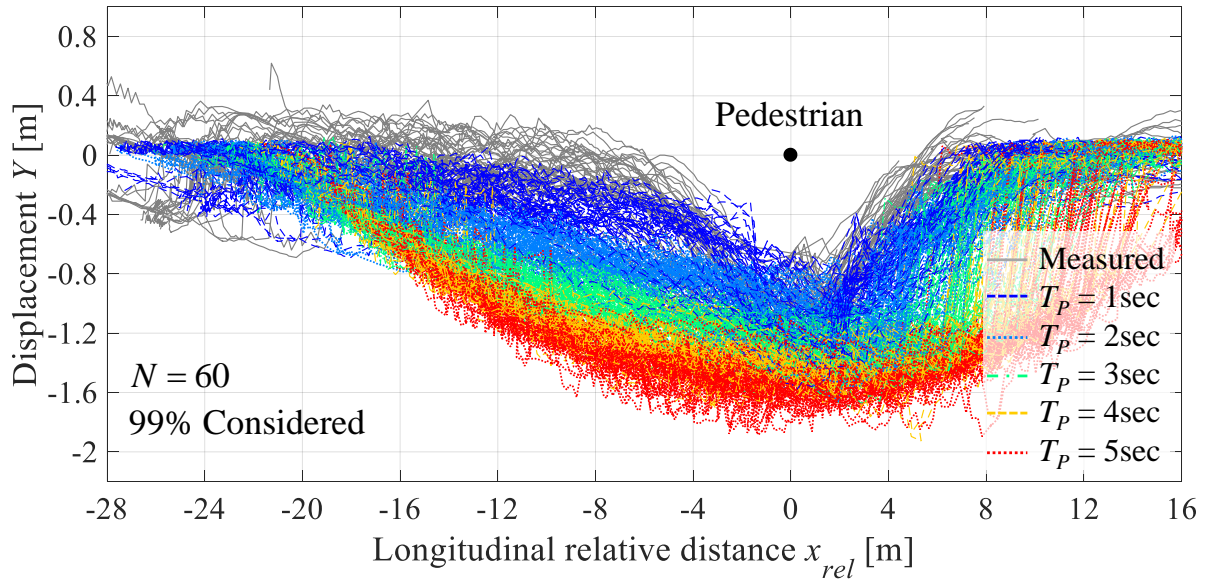


Fig. 5.5.10 Result of motion prediction of overtaking scene against pedestrian considering 99% case

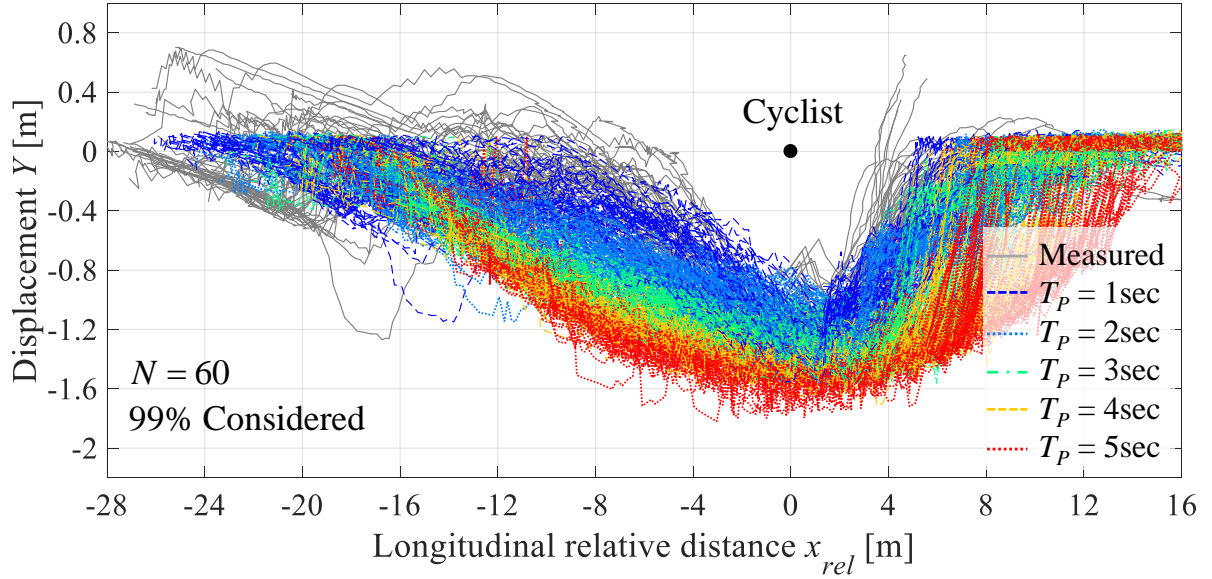


Fig. 5.5.11 Result of motion prediction of overtaking scene against cyclist considering 99% case

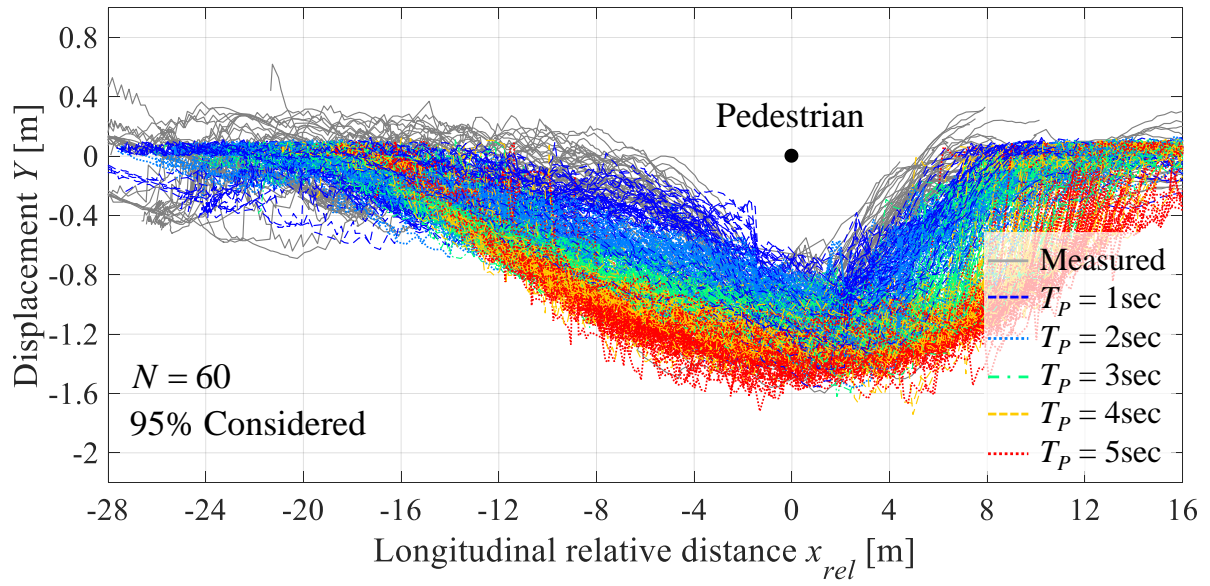


Fig. 5.5.12 Result of motion prediction of overtaking scene against pedestrian considering 95% case

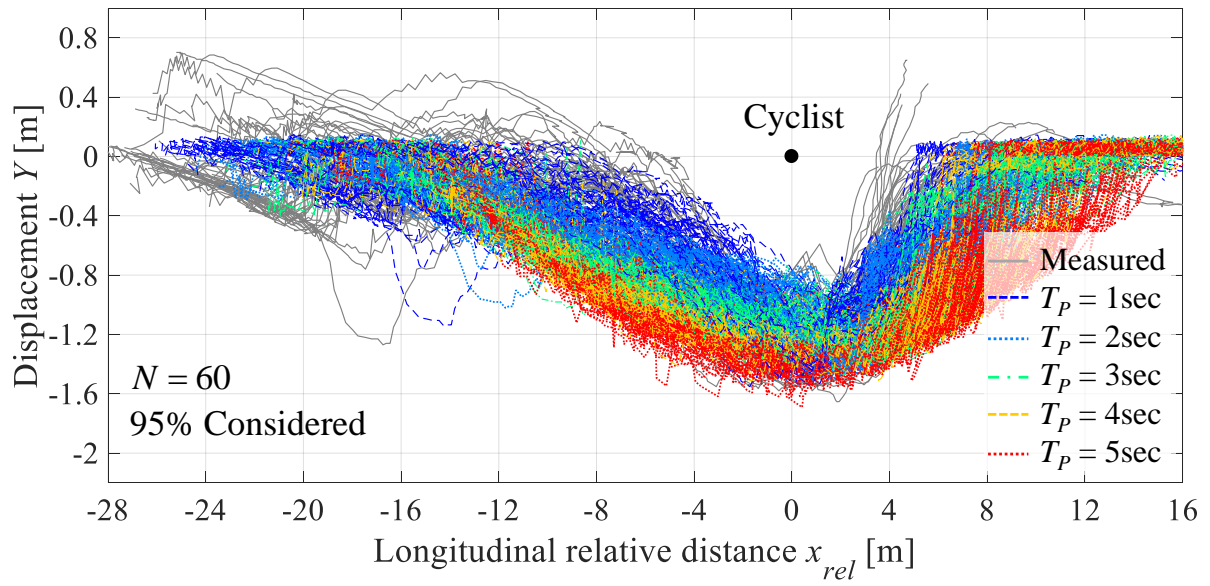


Fig. 5.5.13 Result of motion prediction of overtaking scene against cyclist considering 95% case

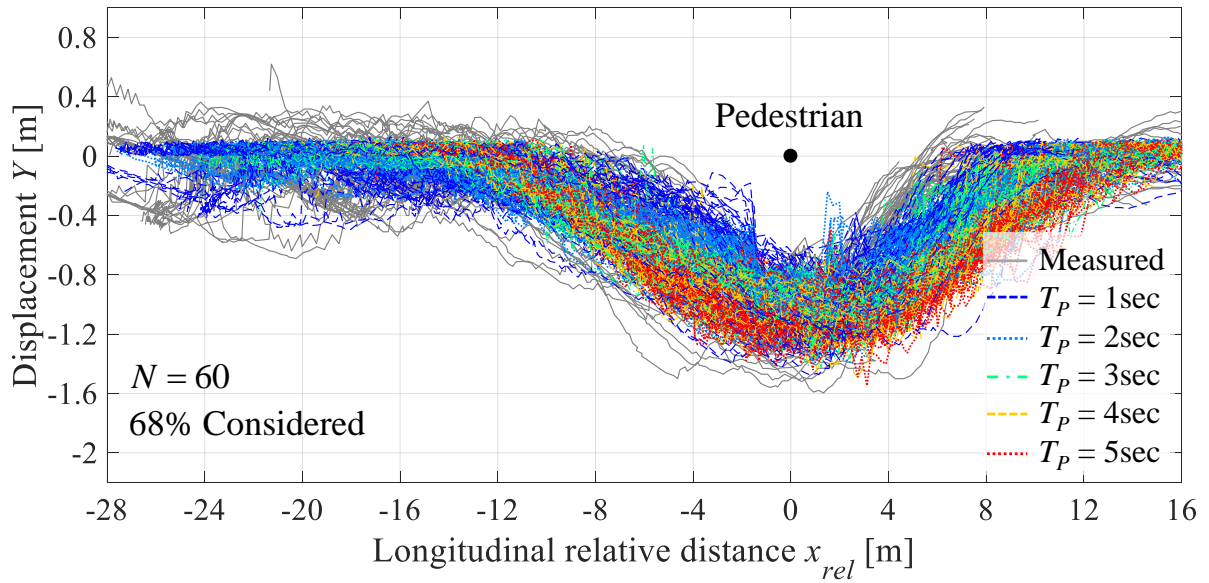


Fig. 5.5.14 Result of motion prediction of overtaking scene against pedestrian considering 68% case

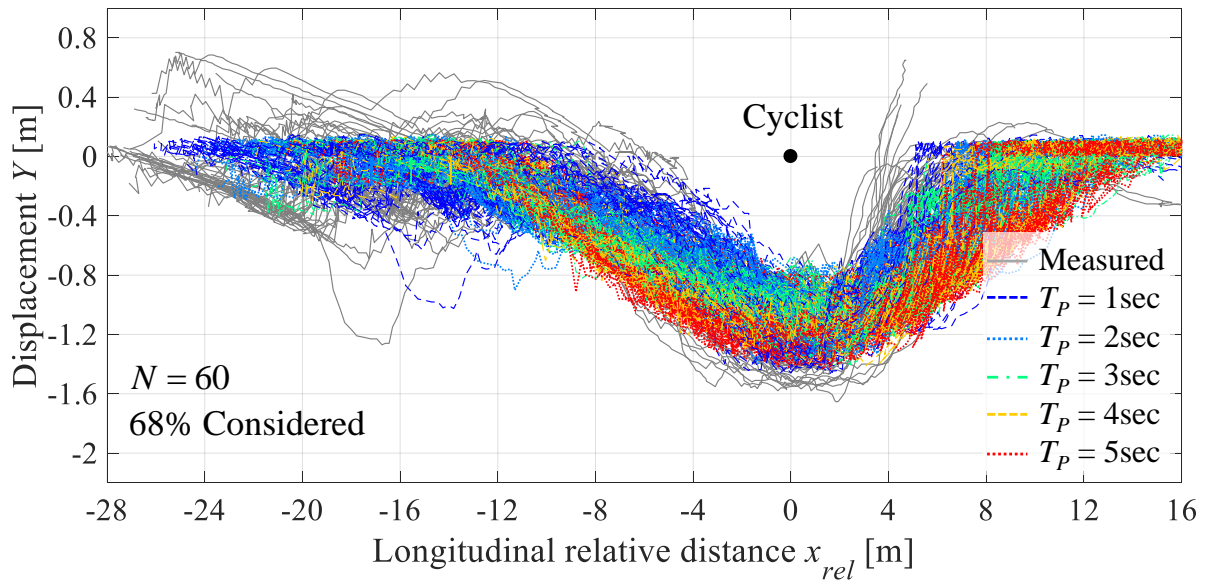


Fig. 5.5.15 Result of motion prediction of overtaking scene against cyclist considering 68% case

図 5.5.10 から図 5.5.15 について、追い越し対象の歩行者および自転車は常に原点上に位置し、追い越し対象の進行方向を正としたとき、追い越し対象から追い越しを行う自転車までの相対距離を横軸、道路横方向を縦軸に取る。移動予測の入力に用いた、4.3.1 項で取得した

追い越しを行う自転車の実際の移動軌跡を灰色の実線，1 秒後の予測位置を青の破線，2 秒後の予測位置を水色の点線，3 秒後の予測位置を緑の一点鎖線，4 秒後の予測位置を橙の破線，5 秒後の予測位置を赤の点線で示す．

4.3.2 項で移動軌跡を分析した際と同様に，移動予測の結果についても追い越しを行う自転車が追い越し対象の後方で，追い越しを開始してから追い越し対象の横に並ぶまでの領域に注目する．歩行者の駐車車両回避場面と同様，本移動予測手法は，他者を追い越して移動する自転車の後方を走行する車両のために予測結果を求めるものであり，対象の行動分析のうち想定した割合に応じて設定した範囲まで側方間隔を取るような経路を生成する．追い越しを行う自転車が追い越し対象の真横を通過する際，追い越し対象との側方間隔は 4.3.3 項で設定した通り，99%の追い越し事例を考慮した条件では対歩行者で $y_{rel} = 1.7\text{ m}$ ，対自転車で $y_{rel} = 1.8\text{ m}$ ，95%の条件では対歩行者で $y_{rel} = 1.5\text{ m}$ ，対自転車で $y_{rel} = 1.6\text{ m}$ ，68%の回避事例を考慮した条件では対歩行者で $y_{rel} = 1.3\text{ m}$ ，対自転車で $y_{rel} = 1.4\text{ m}$ の値におおよそ収束している様子がわかる．よって，このシミュレーション結果では想定した条件に応じた割合で実験データの外側を通るような経路を予測できており，かつ，それが過大な値ではないことから，自転車が他者を追い越す場面においても，本研究で提案する移動予測手法が有効であると考えられる．

5.6 まとめ

第 4 章で示した一般単路における各研究対象場面における移動軌跡の分析結果に基づき，第 5 章ではポテンシャルフィールド法を用いた移動予測手法を構築した．分析結果に基づき移動予測手法を設計し，パラメータを設定することにより，現実には限られた範囲内で段階的に想定し得る最悪のケースを予測可能であることを確認した．

第 6 章

移動予測に基づく自動減速制御システムの 有効性検証

本章では，第 2 章で設定した研究対象場面に対し，第 4 章で構築した移動予測手法を自動減速システムへ応用した場合を想定したシミュレーションにより，提案する移動予測手法の有効性を検証する．まず，移動予測に基づく自動減速の必要性の判定方法と，具体的な減速方法について述べる．また，本研究で提案する手法の比較として，従来型の移動予測手法を示し，提案手法と従来型手法のそれぞれを用いた移動予測に基づく減速シミュレーションを行い，ポテンシャルフィールドを用いた手法の有効性を示す．

6.1 減速の必要性の判断

日本の道路交通法において，自動車が行歩者や自転車を追い越す際，安全な速度で充分な側方間隔を維持することと，それが不可能である場合は徐行する必要があるとされている．しかし，具体的な速度や側方間隔については明記されていない．そこで，自動車教習所における教習内容を参考に，自車両が行歩者・自転車を追い越す際に維持すべき側方間隔の基準を 1.5 m として設定する．減速の必要性を判断するための，歩者の予測位置と自車両の予測位置を図 6.1.1 に示す．

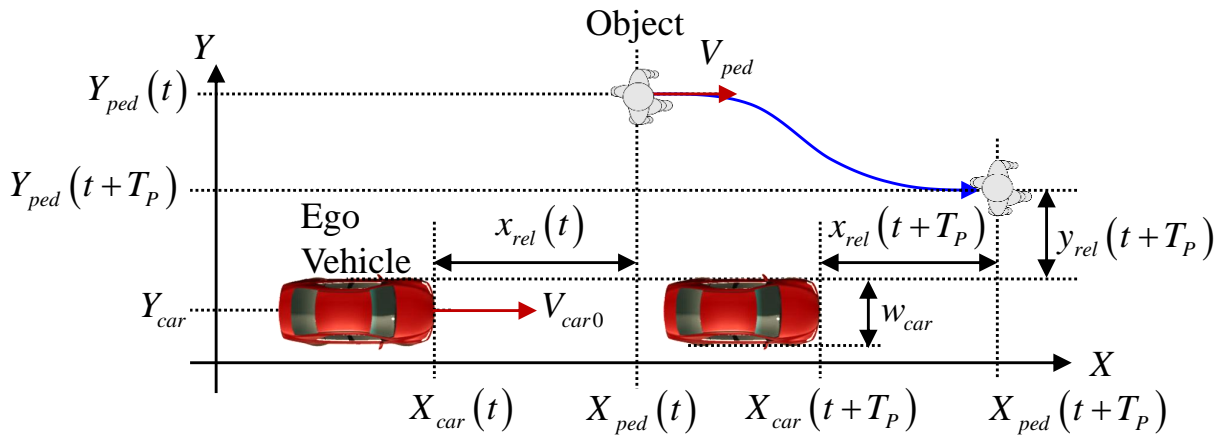


Fig. 6.1.1 Determination criteria for autonomous braking control based on motion prediction

図 6.1.1 のように道路の進行方向を X 軸，横方向を Y 軸としたとき，時刻 t [sec]における自車両の位置座標を $(X_{car}(t), Y_{car}(t))$ ，歩行者の位置座標を $(X_{ped}(t), Y_{ped}(t))$ とする．このとき，自車両の T_P 秒後の予測位置 $X_{car}(t+T_P)$ は式(6.1.1)で表される．

$$X_{car}(t+T_P) = X_{car}(t) + V_0 \cdot T_P \quad (6.1.1)$$

ただし，自車両は初速 V_0 [m/s] で直進し続けるものとする．第 4 章で構築した移動予測手法によって，歩行者の T_P 秒後の予測位置 $(X_{ped}(t+T_P), Y_{ped}(t+T_P))$ を求め，自車両と歩行者の位置関係から減速の必要性を判断する． T_P 秒後の進行方向の相対距離 $x_{rel}(t+T_P)$ [m] と， T_P 秒後の側方間隔 $y_{rel}(t+T_P)$ [m] は，それぞれ式(6.1.2)と式(6.1.3)で表される．

$$x_{rel}(t+T_P) = X_{ped}(t+T_P) - X_{car}(t) + V_0 \cdot T_P \quad (6.1.2)$$

$$y_{rel}(t+T_P) = Y_{ped}(t+T_P) - Y_{car} + \frac{1}{2} w_{car} \quad (6.1.3)$$

また，歩行者と自車両の相対速度 v_{rel} [m/s]（式(6.1.4)）としたとき，進行方向の相対距離のみを考慮した衝突余裕時間 $T_{tc}(t+T_P)$ [sec] は式(6.1.5)で表される．

$$v_{rel} = V_0 - V_{ped} \quad (6.1.4)$$

$$T_{tc}(t+T_P) = \frac{x_{rel}(t+T_P)}{v_{rel}} \quad (6.1.5)$$

T_P 秒後の側方間隔 $y_{rel}(t+T_P)$ が 1.5 m 以下になると予測され，かつ， $T_{tc}(t+T_P)$ が -1～2 秒の範囲だったとき，減速が必要であると判断するものとする．ただし，時刻 t における進行方向の相対距離 $x_{rel}(t)$ [m] が 35 m 以下になってから実際に減速を開始するものとして試験的に設定する．また，予測時間 T_P は 1 秒刻みで 1～5 秒後まで考慮し，予測サンプリングごとに同じ処理を行い，一つでも減速が必要と判断される条件があれば，減速する．

6.2 自動減速制御手法

減速が必要であると判断されたとき、道路の中心側へ移動してくると予測される対象の後方を追従するように自車両を減速させる．減速を開始する直前を初期状態としたとき、自車両から対象までの相対距離を x_{rel0} [m]、自車の速度を V_0 とする．減速が終了した時点では、自車両は対象の α [m] 後方を、対象と同じ速度 V_{end} [m/s] で走行していることを目標とし、これを終端状態とする．自車両と対象の相対速度を式(6.1.4)と同様に v_{rel} とすると、初期状態から終端状態まで、ジャーク J [m/s³] を無視した一定減速度 a_{max} [m/s²] で減速するとき、減速に必要な時間 t_{dec} [sec] は式(6.1.6)、減速に必要な加速度 a_{max} (< 0) は式(6.1.7)のように求められる．

$$\begin{aligned} t_{dec} &= \frac{2(x_{rel0} - \alpha)}{v_{rel}} \\ &= \frac{2(x_{rel0} - \alpha)}{V_0 - V_{end}} \end{aligned} \quad (6.1.6)$$

$$\begin{aligned} a_{max} &= \frac{-v_{rel}^2}{2(x_{rel0} - \alpha)} \\ &= \frac{-(V_0 - V_{end})^2}{2(x_{rel0} - \alpha)} \end{aligned} \quad (6.1.7)$$

加速度 a_{max} で t_{dec} 秒間減速したとき、自車両の減速量 v_{rel} と a_{max} 、 t_{dec} の間には式(5.8)の関係が成り立つ．

$$v_{rel} = -a_{max} \cdot t_{dec} \quad (6.1.8)$$

このとき、加速度プロファイルを図 6.2.1 の青線で示すと、青線で囲まれる長方形の面積は式(6.1.8) と等しい．

しかしながら、一定加速度一定加速度 a_{max} を瞬時に発生させる自動車は現実的ではない．また、運転手や乗員の乗り心地を考慮すると、目標加速度をステップ上に入力することは好ましくない(木村他 2008) (王 2000)ことから、ジャーク J [m/s³] を考慮した加速度プロファイルを求める必要がある．

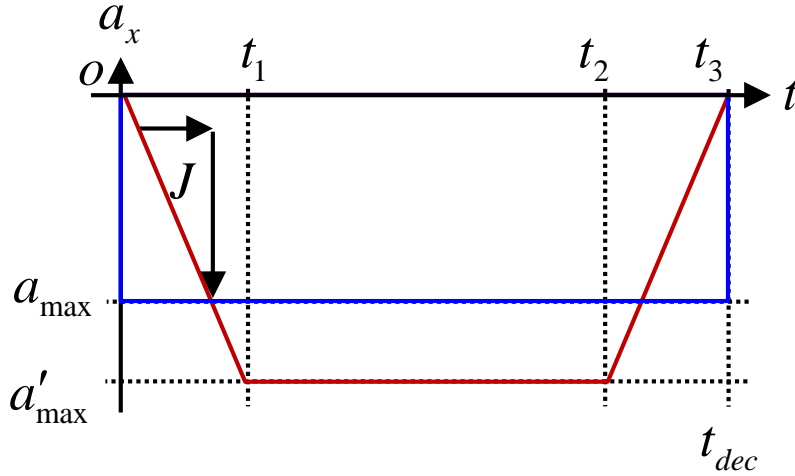


Fig. 6.2.1 Acceleration profile considering jerk

一定ジャーク J で t_1 秒間減速した後、 t_1 秒後から t_2 秒まで最大減速度 a'_{\max} で減速し、さらに t_2 秒後から t_3 秒まで一定ジャークで加速度が 0 へ戻る減速プロファイルを図 6.2.1 の赤い線で示す。このとき、減速開始から減速終了までの加速度を時間で積分した値が速度の変化量になるため、赤い線で囲まれる台形の面積が式(6.1.8) の速度変化量と等しければよい。さらに、ジャークを考慮した加速度プロファイルが左右対称であれば、減速終了時の自車両と対象までの相対距離も、ジャークを考慮しない加速度プロファイルで減速した場合と同じになる。以上より、減速に要する時間は t_{dec} のまま、ジャークを考慮した加速度 a'_{\max} [m/s²]は、式(6.1.9) より求められ、最大減速度 a'_{\max} に達するまでに要する時間 t_1 と、最大減速度 a'_{\max} から加速度が 0 に戻るまでの時間 $t_3 - t_2$ は式(6.1.10) で表される。

$$a'_{\max} = \frac{J}{2} \left(t_{dec} - \sqrt{t_{dec}^2 + 4 \frac{v_{rel}}{J}} \right) \quad (6.1.9)$$

$$t_1 = t_3 - t_2 = \frac{a'_{\max}}{J} \quad (J < 0) \quad (6.1.10)$$

ただし、式(5.9) は式(5.11) の条件を満たす。

$$t_{dec}^2 + 4 \frac{v_{rel}}{J} > 0 \quad (6.1.11)$$

本シミュレーションでは、ジャーク J を 1.0 m/s³ 刻みで -1.0 m/s³ から -12.0 m/s³ まで変化させ(ボッシュ 1999)、式(6.1.11) を満たす範囲で最も小さいジャークを選定し、最大減速度 a'_{\max} で t_{dec} 秒間かけて減速させるものとする。

自動車の初速 $V_0 = 40 \text{ km/h}$ ，歩行者の速度 $V_{ped} = 1.5 \text{ m/s}$ ，初期相対距離 $x_{rel0} = 39.6 \text{ m}$ ，減速終了時に維持する相対距離 $\alpha = 5 \text{ m}$ のとき，シミュレーション開始 1 秒後にジャークを考慮しない減速，ジャークを考慮した減速をそれぞれ開始した際のシミュレーション結果の時系列データを図 6.2.2 の(a) から(b) に示す．ただし，ジャーク J は -2 m/s^3 となっている．

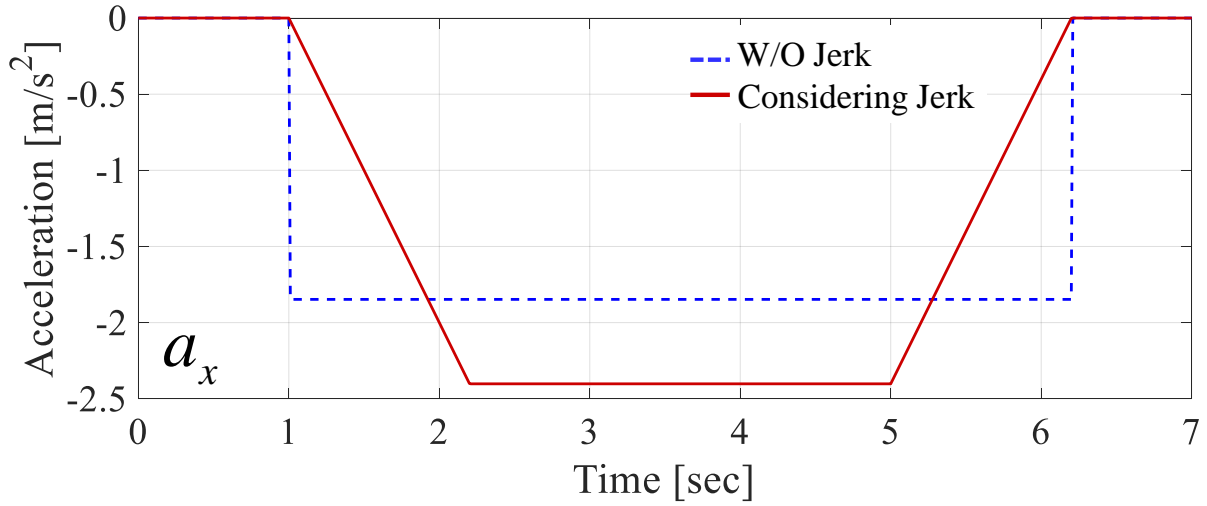


Fig. 6.2.2 (a) Simulation result of acceleration considering jerk

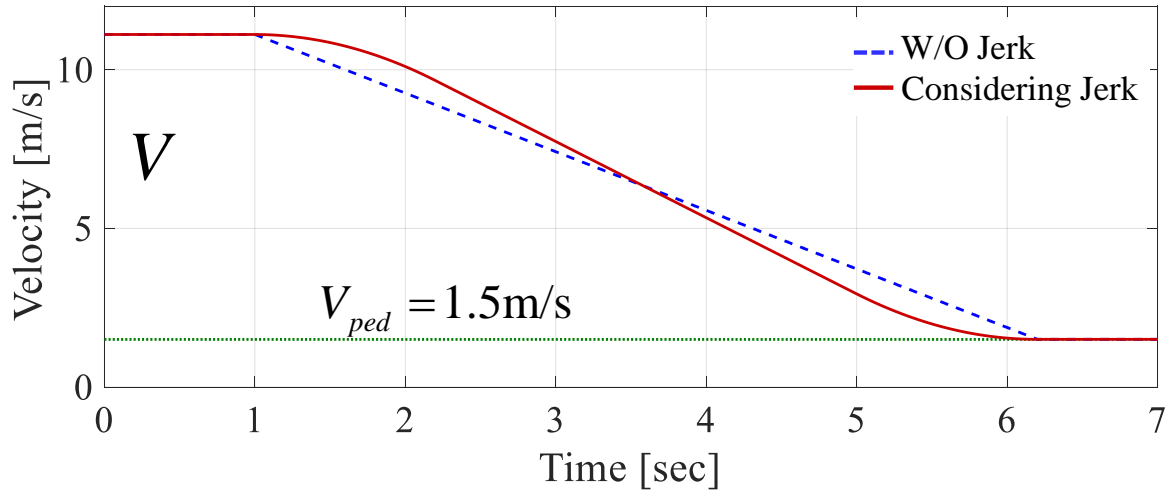


Fig. 6.2.2 (b) Simulation result of velocity considering jerk

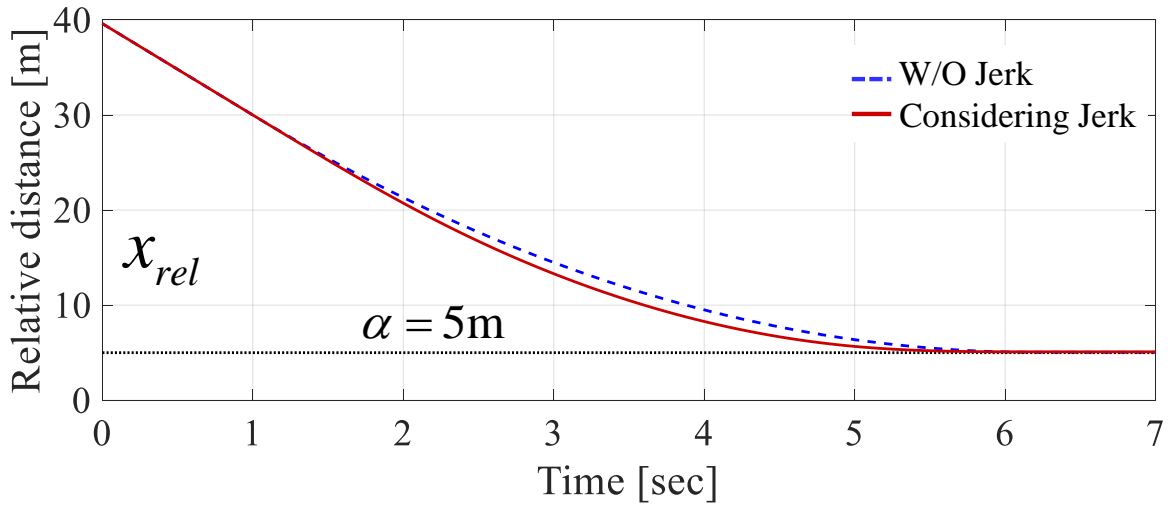


Fig. 6.2.2 (c) Simulation result of relative distance considering jerk

図 6.2.2(a)の赤い実線で示すジャークを考慮した加速度プロファイルにより，図(b)で青い破線で示すジャークを考慮しない加速度プロファイルで減速した場合と同じ速度まで減速で来ていることがわかる．また図(c)より，減速終了時には設定された相対距離 $x_{rel} = 5 \text{ m}$ を保っていることがわかる．

6.3 比較用従来型移動予測手法

自動減速シミュレーションによってポテンシャルフィールドを用いた移動予測手法の有効性を検証するための比較に用いる，従来型の移動予測手法として 1 次予測手法を設定する (Tiemann and Branz, 2010)．1 次予測手法では，歩行者や自転車のある時刻 $t=0$ 秒からサンプリングタイム ΔT 秒ずつ移動履歴を遡り，その時刻における進行方向を求める．求めた進行方向へ等速直線運動するものとして移動を予測する．本シミュレーションでは過去 1 秒間の移動履歴から移動方向を求める．移動方向の求め方を図 6.3.1 に示す．

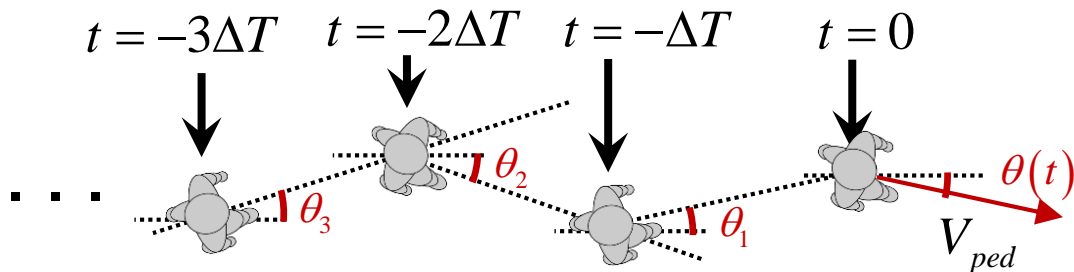


Fig. 6.3.1 1st order prediction

進行方向 $\theta(t)$ の導出方法を式(22)に示す．

$$\theta(t) = \frac{\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \cdots + \theta_N}{N} \quad (6.1.12)$$

シミュレーションでは移動方向を求める際、約 1 秒間の移動履歴を用いる。ただし、1 次予測手法に用いる位置座標には時定数 τ [s] を 0.3 秒としてローパスフィルタを適用し、ノイズによる移動方向への影響を抑える。自転車の他者追い越し場面においてローパスフィルタを使用した自転車(cyc1) と追い越される自転車(cyc2) の移動軌跡の例を図 6.3.2 に示す。ただし、本論文で提案する移動予測手法にはローパスフィルタを使用していない位置情報を利用する。

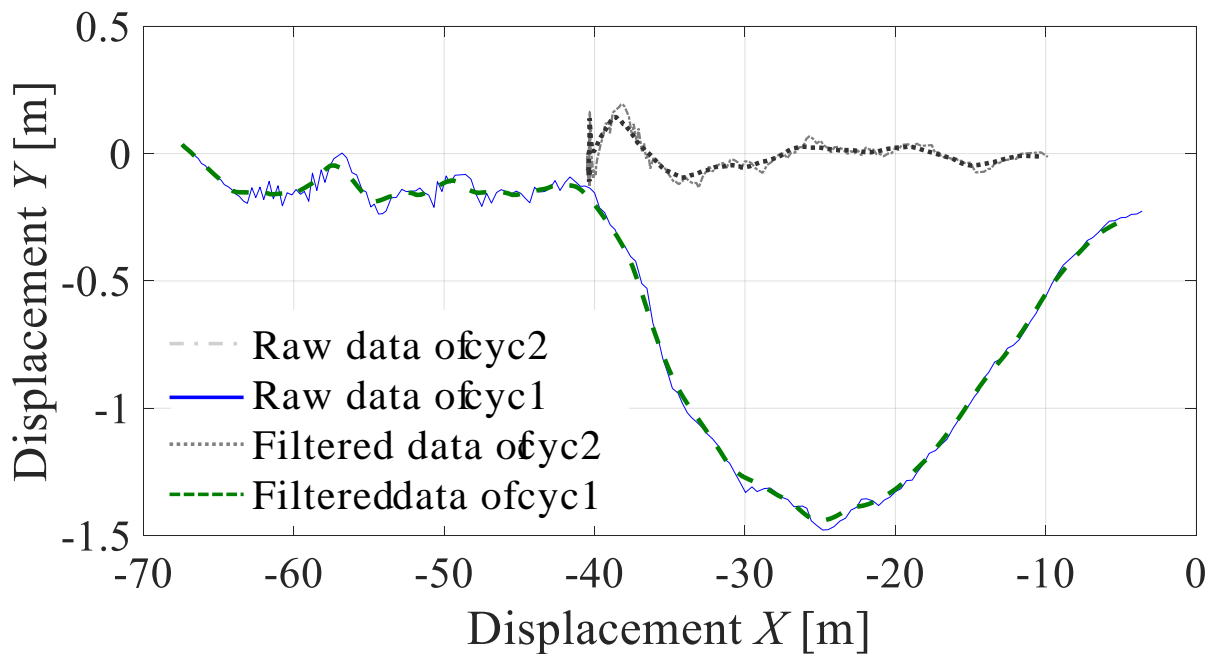


Fig. 6.3.2 Filtered trajectory

6.4 移動予測に基づく自動減速シミュレーション

6.4.1 シミュレーション概要

2 つの研究対象場面について、歩行者・自転車の後方から自車両が接近する状況を想定する。このとき、自車両が移動予測に基づいて自動減速を行う様子を、シミュレーションにより評価する。それぞれの場面における移動予測には、第 3 章で取得した歩行者・自転車の移動軌跡を入力として用いる。また、提案する移動予測手法に基づく減速の様子と、6.3 節で示した 1 次予測に基づく自動減速を行った際の減速行動を

比較し，ポテンシャルフィールドを用いた移動予測手法の有効性を確認する．

ここで，自転車が前方の遅い自転車を追い越す場面を例に，自動減速シミュレーションの様子を示す．図 6.3.2 で示した移動軌跡を用い，自動減速シミュレーションを行う．シミュレーションの場面設定を図 6.4.1 に，減速シミュレーションの各パラメータを表 6.4.1 に示す．また，ポテンシャルフィールドを用いた移動予測手法には 99% の追い越し事例を想定したパラメータを用いる．

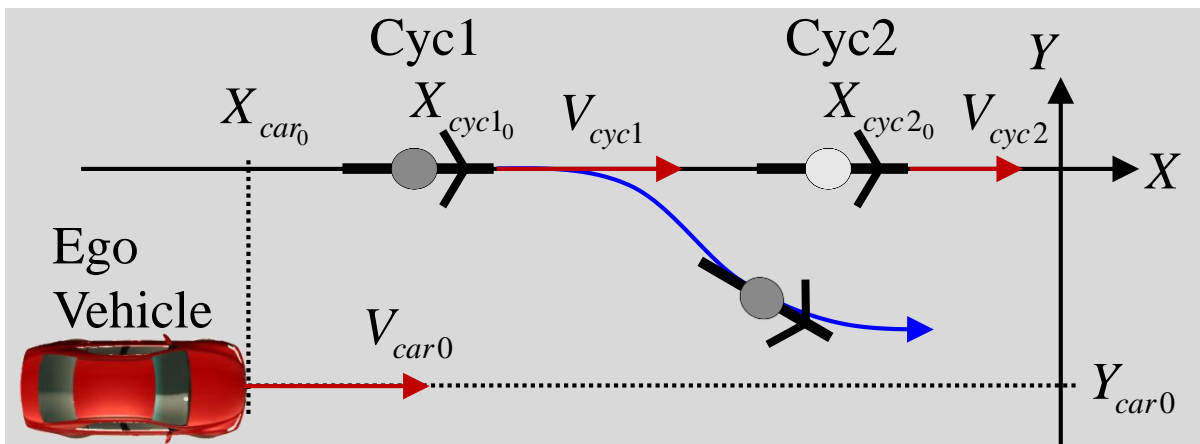


Fig. 6.4.1 Simulation scenario cyclist overtakes another cyclist

Table 6.4.1 Simulation parameters

Definition	Symbol	Value	unit
Initial velocity of ego vehicle	V_{car0}	30	km/h
Velocity of Cyc2	V_{cyc2}	2.2	m/s
Velocity of Cyc1	V_{cyc1}	4.1	m/s
Initial longitudinal position of ego vehicle	X_{car0}	-115	m
Initial lateral position of ego vehicle	Y_{car0}	-3.5	m
Initial position of cyc2	X_{cyc20}	-40.4	m
Initial position of cyc1	X_{cyc10}	-67.5	m

各移動予測手法に基づく自動減速開始前後の様子を図 5.4.2 の(a) から(c) に示す．

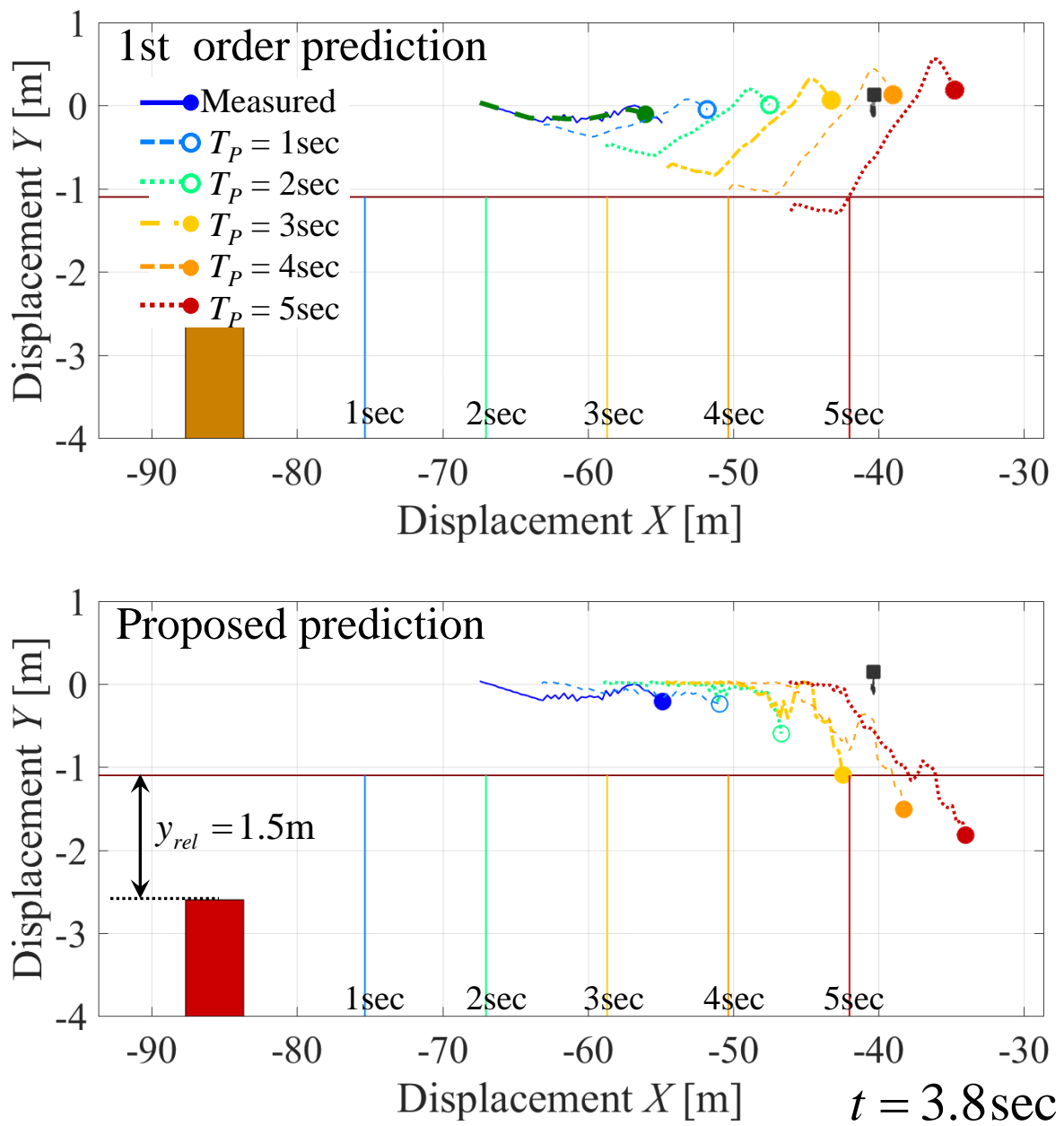


Fig. 6.4.2 (a) Simulation result at $t = 3.8$ sec

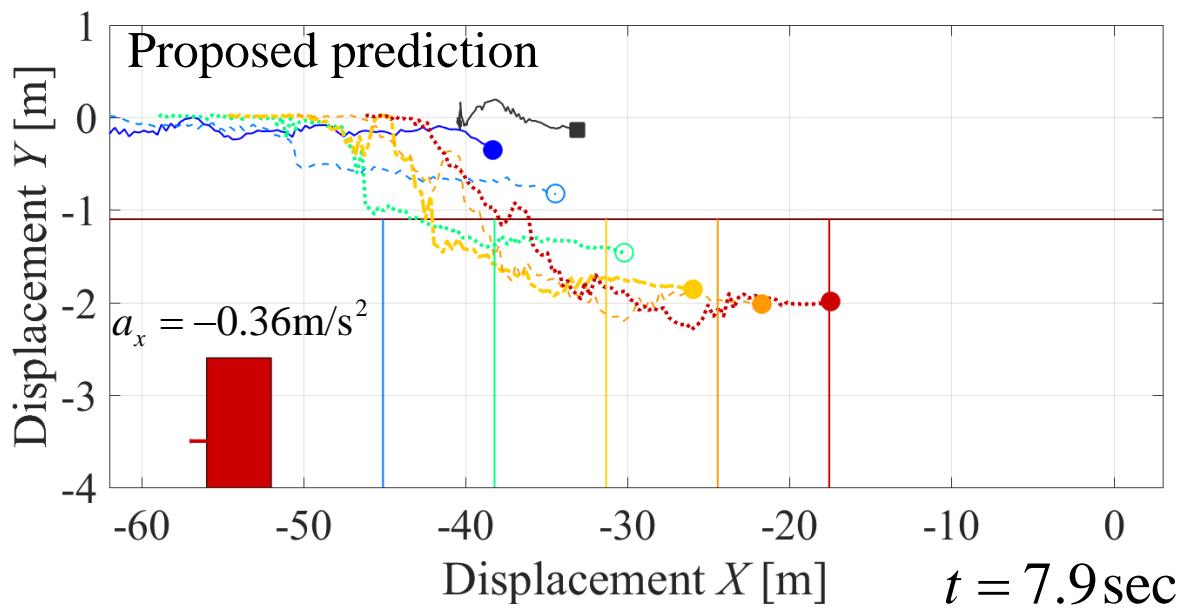
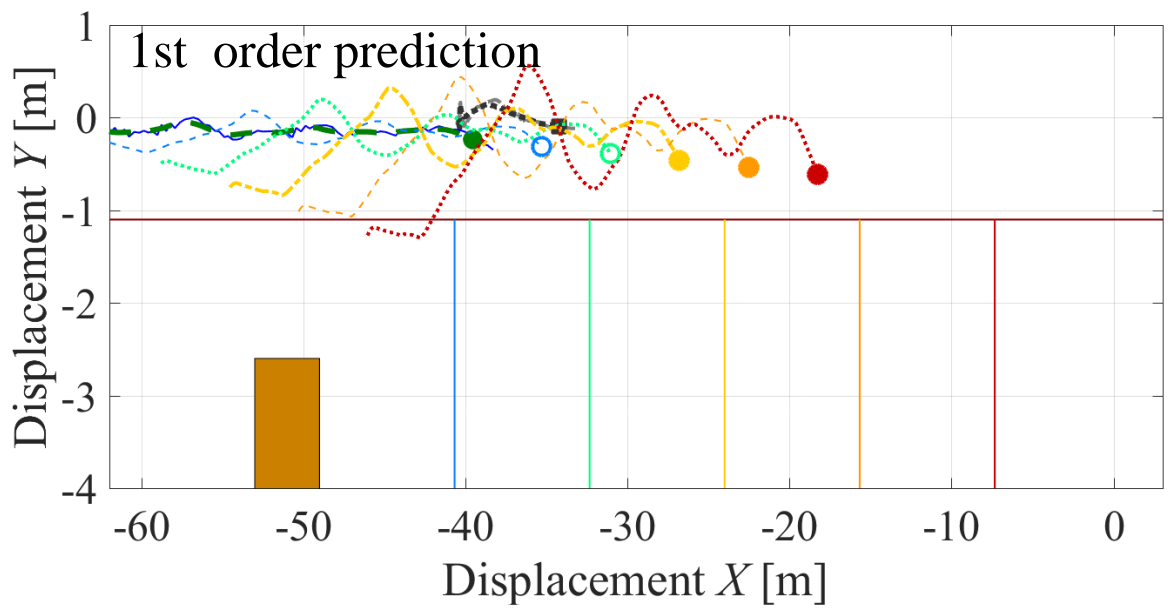


Fig. 6.4.2 (b) Simulation result at $t = 7.9$ sec

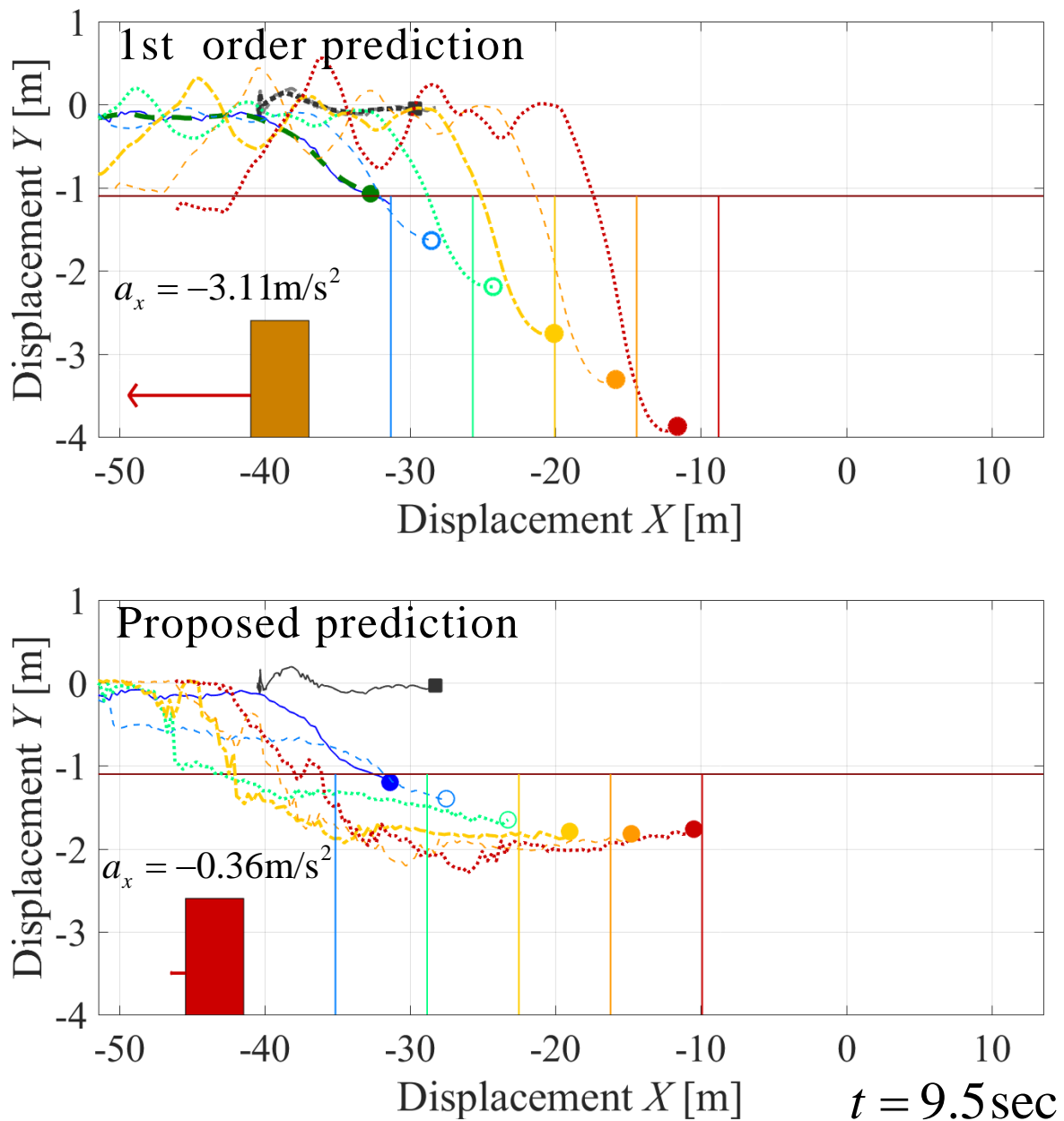


Fig. 6.4.2 (c) Simulation result at $t = 9.5 \text{ sec}$

(a) から(c) について，上段には従来の 1 次予測手法，下段にはポテンシャルフィールドを用いた移動予測手法による予測位置と車両の減速行動を示す．(a) について，1 次予測手法ではふらつきによる移動予測が大きく影響を受けている様子がわかる．一方，提案手法では追い越しのために自車の進路上へ大きく膨らんでくることを予測し，(b) の時点で余裕を持って減速を開始している．(c) について，1 次予測手法では自転車の進行方向が変化して，初めて自車の進路上へ移動してくる可能性が予測可能

となり，急減速が必要となっている．

シミュレーション結果を図 6.4.3 の(a) から(e) に示す．

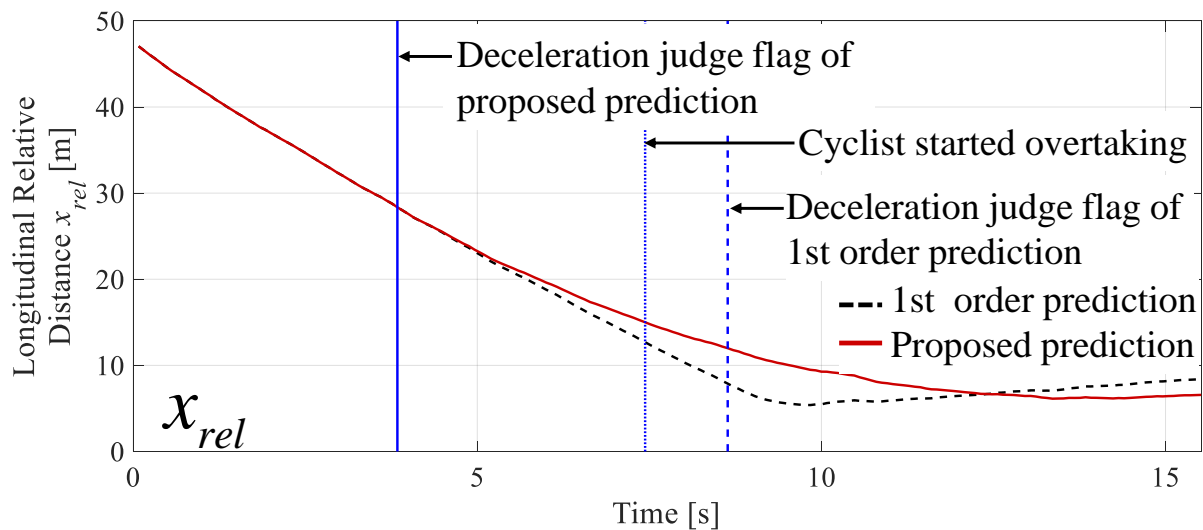


Fig. 6.4.3 (a) Longitudinal relative distance

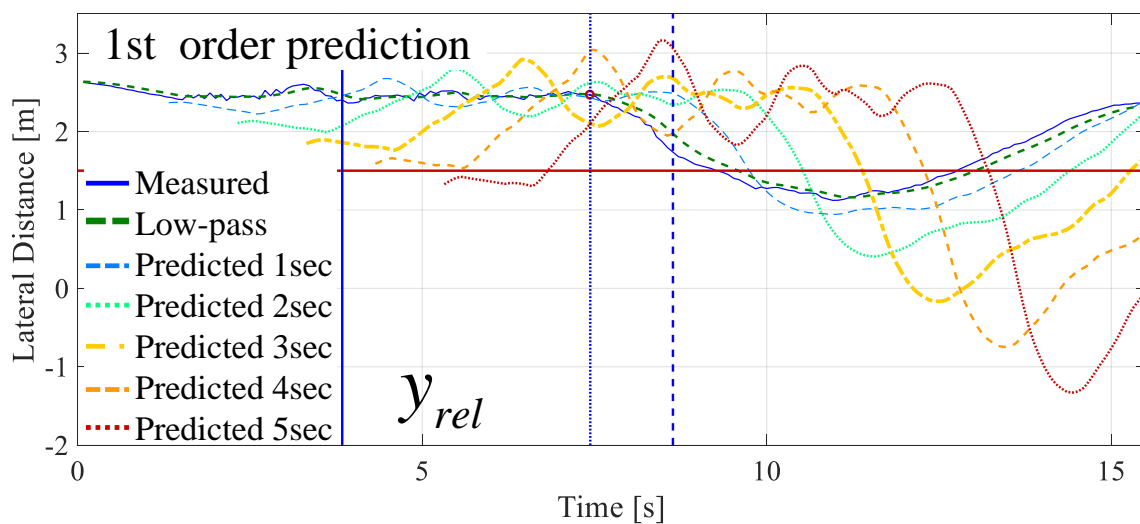


Fig. 6.4.3 (b) Lateral distance of 1st order prediction

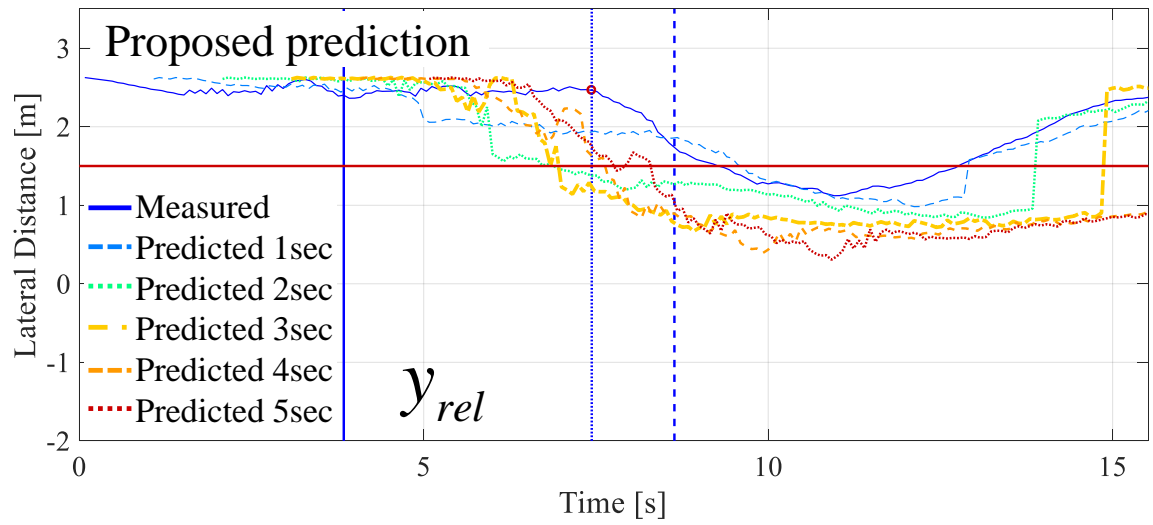


Fig. 6.4.3 (c) Lateral relative distance of proposed prediction

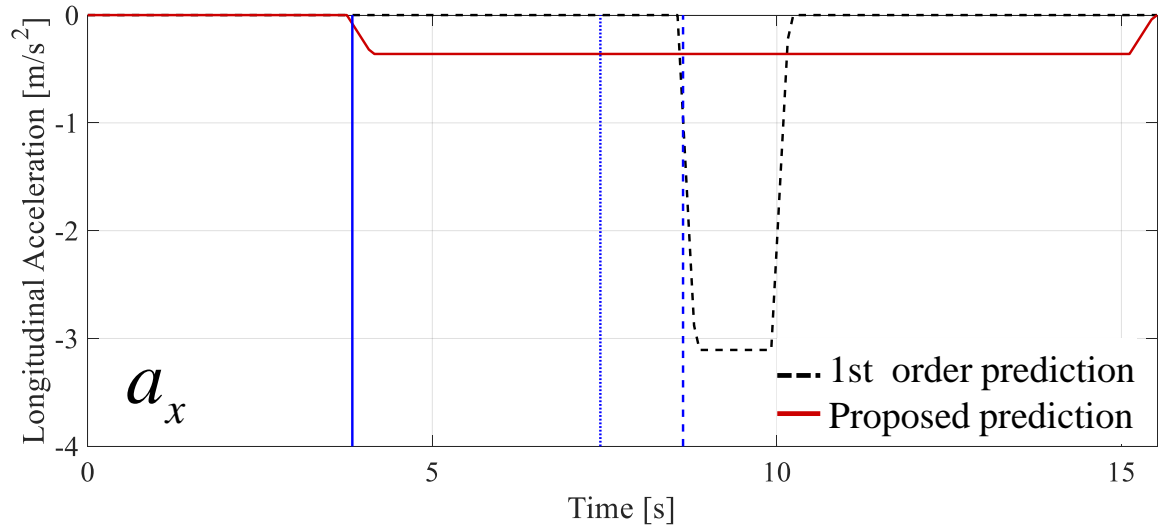


Fig. 6.4.3 (d) Longitudinal acceleration

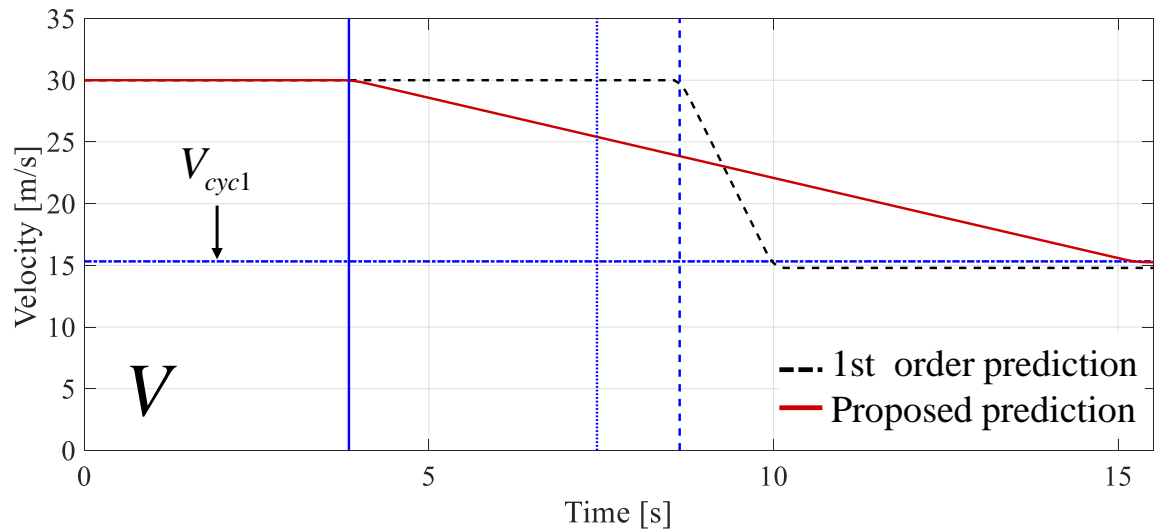


Fig. 6.4.3 (e) Velocity of the ego vehicle

(a) は自車から速度の速い自転車までの進行方向相対距離の時系列データ, (b) は 1

次予測手法による移動予測結果とそれに対する自転車横方向相対距離の時系列データ，(c) は提案手法による移動予測結果とそれに対する自転車横方向相対距離の時系列データ，(d) は進行方向加速度の時系列データ，(e) は車速の時系列データである．(b) と(c) について，予測軌道は予測時間分オフセットしてプロットしてある．(d) について，提案手法は事前に減速を開始しているため 1m/s^3 のジャークと 0.36m/s^2 の小さな減速度で済んでいるが，1次予測手法では追い越す側の自転車の進路変更後に減速を開始したため，ジャークは 12m/s^3 ，減速度 3.6m/s^2 の急減速となっている．また，移動軌跡を分析した際，自転車が追い越しを開始したと判断される時刻を基準とすると，1次予測手法では約 1.2 秒遅れて減速を開始している．一方，提案手法に基づく自動減速では，約 3.6 秒早く減速を開始できており，1次予測手法を用いた自動減速と比較して約 4.8 秒早く減速を開始している．

このように，移動予測手法の違いによって生じる減速の違いを評価することで，ポテンシャルフィールドを用いた移動予測手法の有効性を定量的に評価する．ただし，減速度やジャークといったシミュレーション結果は，自動減速方法の設計指針によって異なると考え，本章では歩行者・自転車が回避・追い越しのために進路が変わった時刻を基準としたとき，移動予測によって減速を開始した時刻との差を評価手法とする．

6.4.2 歩行者の駐車車両回避場面におけるシミュレーション結果

6.4.1 節で示した自動減速シミュレーションと同様にして，歩行者の駐車車両回避場面におけるシミュレーションを実施する．シミュレーション時の自転車，歩行者，駐車車両の位置関係を図 6.4.4 に示す．図 6.4.5 に示した歩行者の移動軌跡から一つずつに対して自転車の初期位置を変化させる．実際に歩行者が進路を変更した時刻を基準としたとき，1次予測手法とポテンシャルフィールドを用いた予測手法それぞれの場合において，減速を開始した時刻の差を求める．自転車の初期位置などのシミュレーションに用いるパラメータを表 6.4.2 に示す．

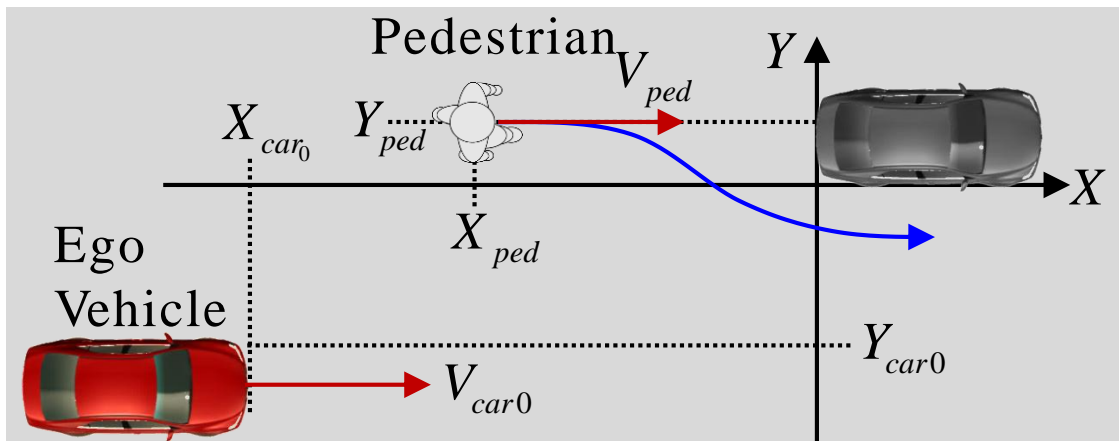


Fig. 6.4.4 Simulation scenario pedestrian avoids parked vehicle

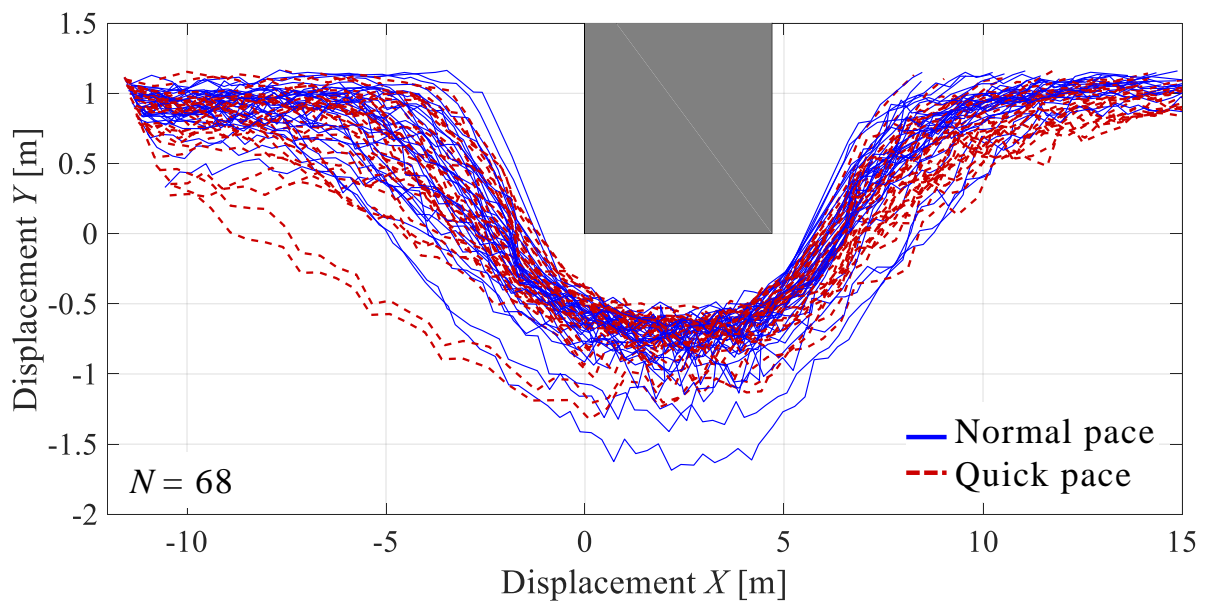


Fig. 6.4.5 All trajectories of pedestrian avoiding parked vehicle

Table 6.4.2

Definition	Symbol	Value	unit
Initial velocity of ego vehicle	V_{car0}	30	km/h
Initial longitudinal position of ego vehicle	X_{car0}	-80 ~ -40	m
Calculation pitch width of X_{car0}	ΔX_{car0}	1.0	m
Initial lateral position of ego vehicle	Y_{car0}	-3.5 ~ -1.0	m
Calculation pitch width of X_{car0}	ΔY_{car0}	0.1	m

1 次予測手法に基づき減速した場合のシミュレーション結果を示す。自車両の各初

期位置において、基準となる時刻に対して減速を開始した時刻の中央値を図 6.4.6、平均値を図 6.4.7 に示す。図 6.4.6 と図 6.4.7 より、広い範囲で負の値を取っていることから、歩行者が駐車車両を回避するために進路変更した後に自車両は減速を開始する場合が多い様子がわかる。

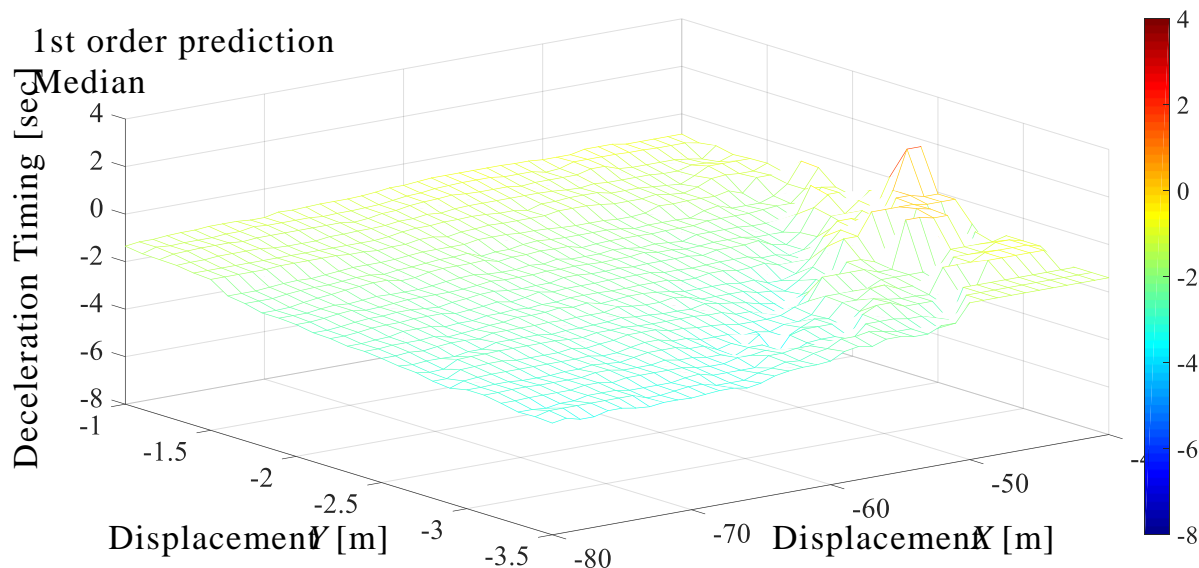


Fig. 6.4.6 Median value of time difference of 1st order prediction

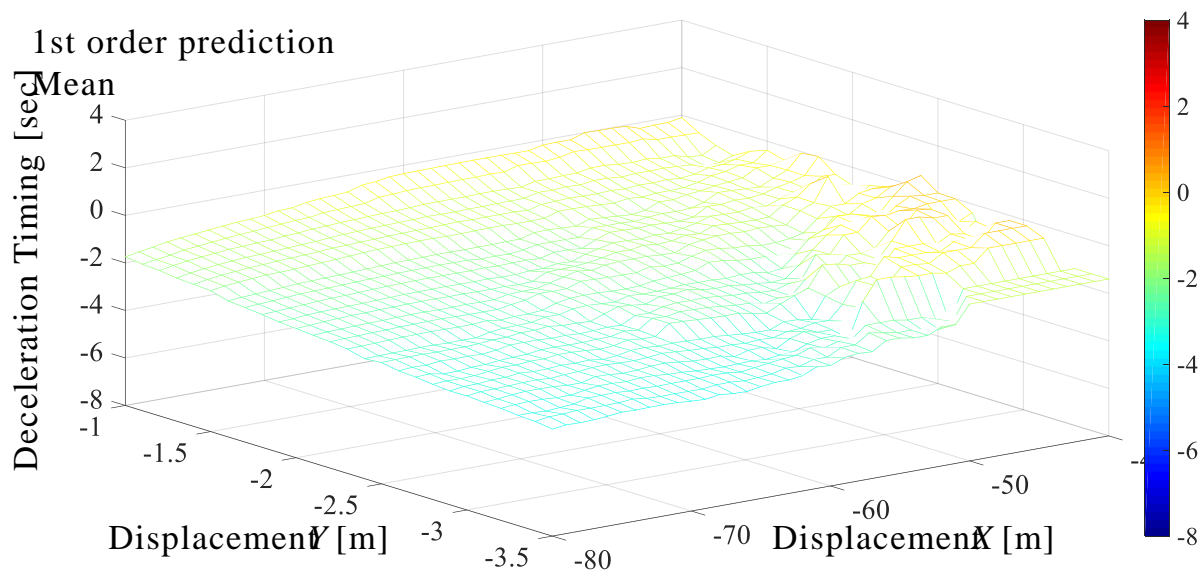


Fig. 6.4.7 Mean value of time difference of 1st order prediction

68%の駐車車両回避事例を考慮したパラメータに設定した際の、提案する移動予測

手法に基づき減速した場合のシミュレーション結果を示す．自車両の各初期位置において，基準となる時刻に対して減速を開始した時刻の中央値を図 6.4.8，平均値を図 6.4.9 に示す．図 6.4.8 と図 6.4.9 について，およそ $X = -75 \sim -40$ m, $Y = -2.4 \sim -1.0$ m の範囲では，基準より早く減速を開始できている． $X = -80 \sim -75$ m の範囲では，自車両が歩行者に追いついた時点で進路変更を終えている形になるため，減速開始が遅れる．

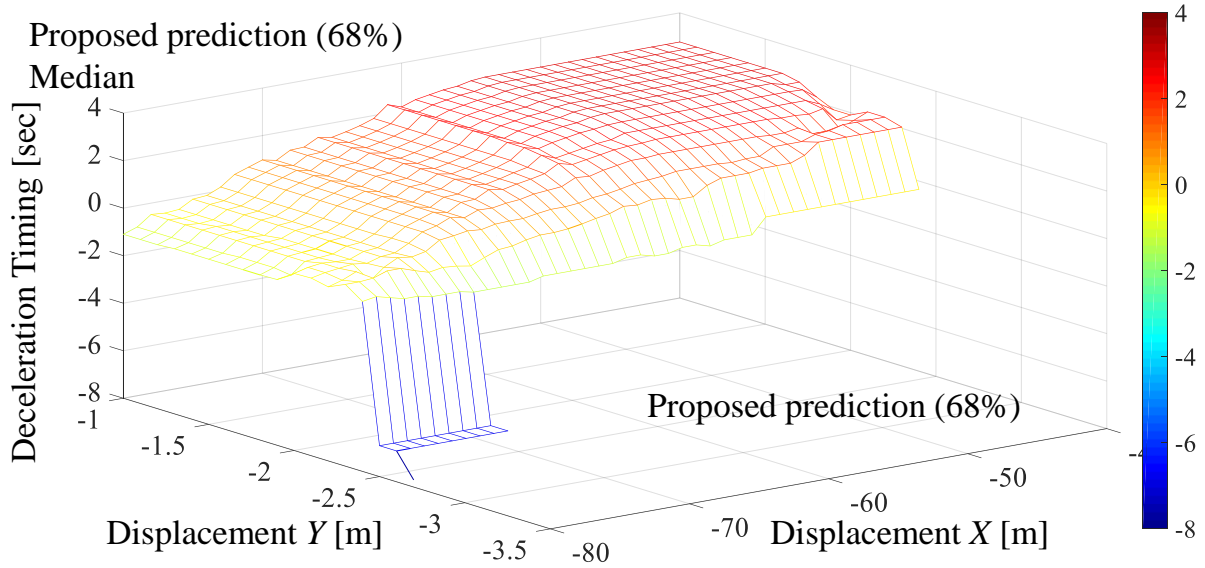


Fig. 6.4.8 Median value of time difference of proposed prediction 68% considered

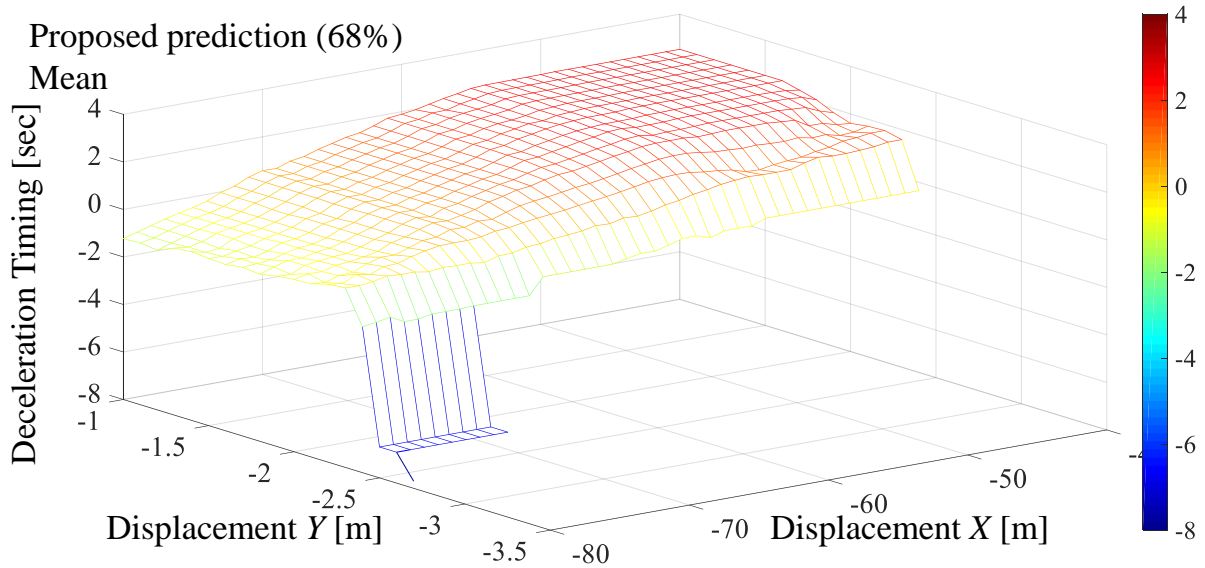


Fig. 6.4.9 Mean value of time difference of proposed prediction 68% considered

95%の駐車車両回避事例を考慮したパラメータに設定した際の、提案する移動予測手法に基づき減速した場合のシミュレーション結果を示す。自車両の各初期位置において、基準となる時刻に対して減速を開始した時刻の中央値を図 6.4.10、平均値を図 6.4.11 に示す。図 6.4.10 と図 6.4.11 について、およそ $X = -75 \sim -40$ m, $Y = -2.6 \sim -1.0$ m の範囲では、基準より早く減速を開始できている。歩行者が駐車車両を避ける際の横方向の移動量を長めに見積もったため、68%の場合より Y 方向の範囲が広がっている。

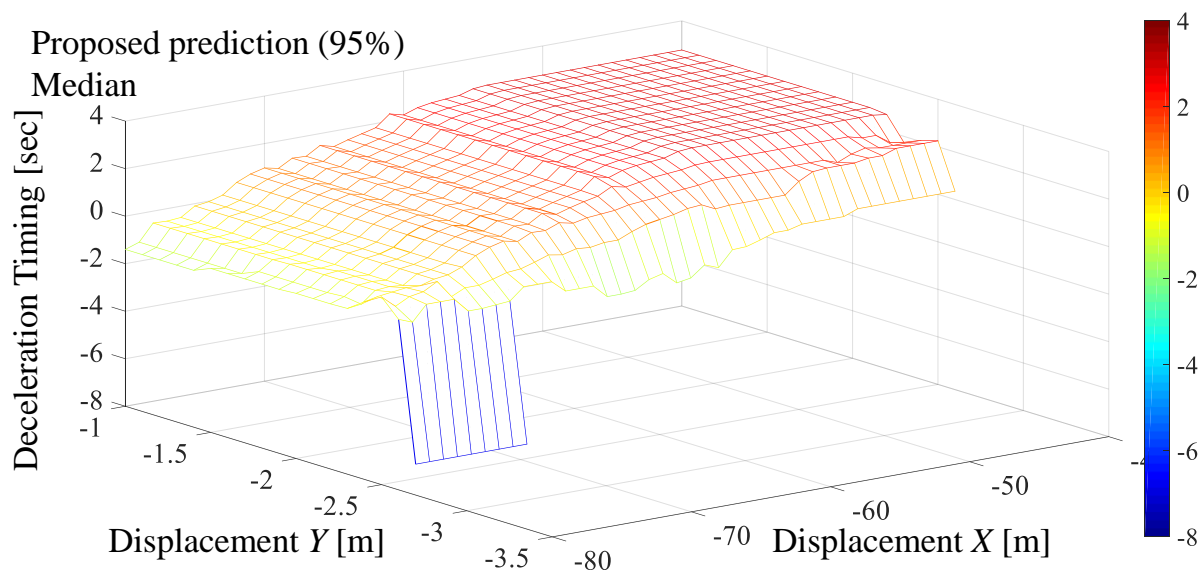


Fig. 6.4.10 Median value of time difference of proposed prediction 95% considered

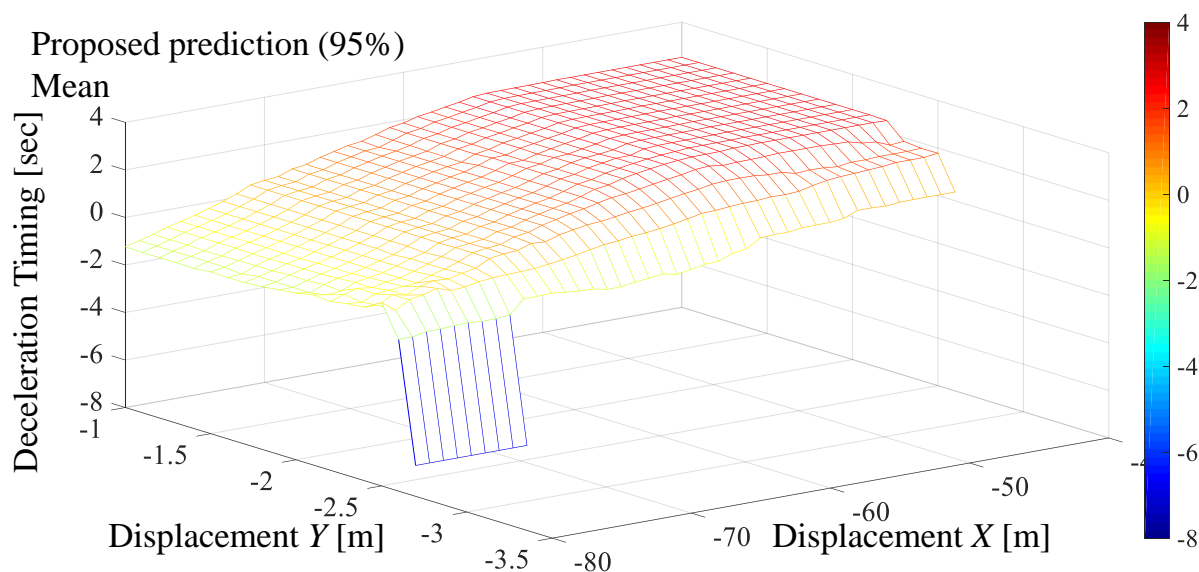


Fig. 6.4.11 Mean value of time difference of proposed prediction 95% considered

99%の駐車車両回避事例を考慮したパラメータに設定した際の、提案する移動予測手法に基づき減速した場合のシミュレーション結果を示す。自車両の各初期位置において、基準となる時刻に対して減速を開始した時刻の中央値を図 6.4.12、平均値を図 6.4.13 に示す。図 6.4.12 と図 6.4.13 について、 $Y = -2.9, 2.8 \sim -1.0$ m の広い範囲で、基準より早く減速を開始できている。

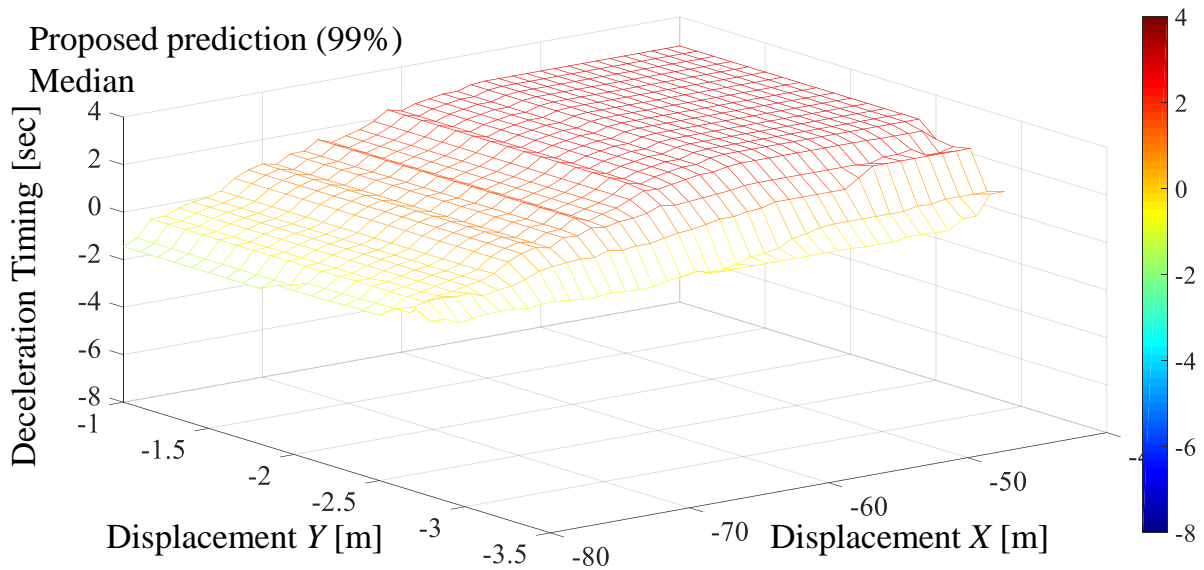


Fig. 6.4.12 Median value of time difference of proposed prediction 95% considered

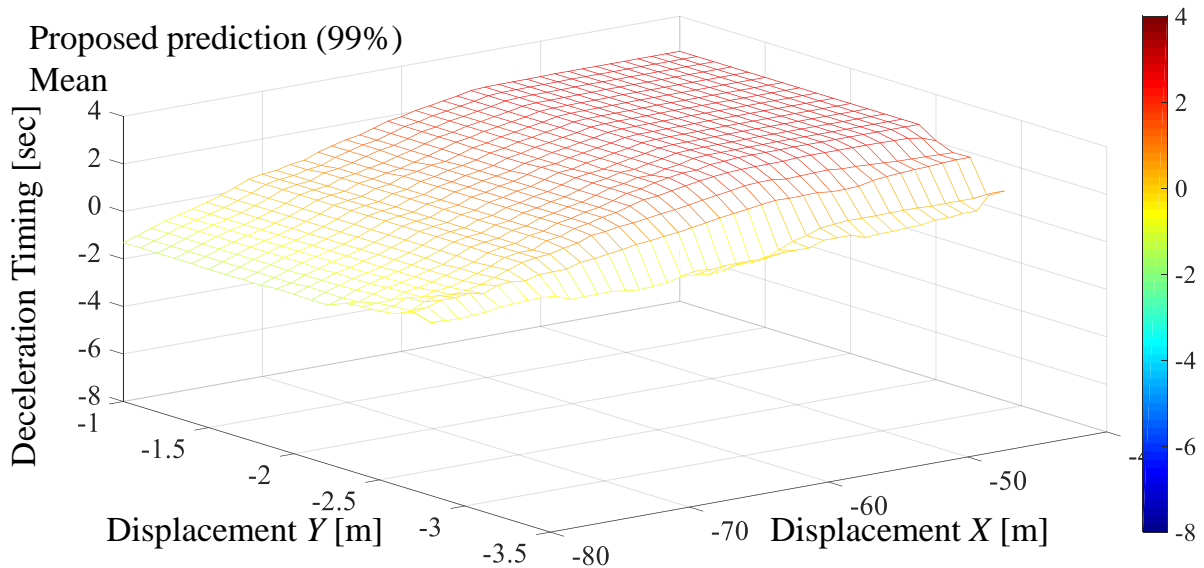


Fig. 6.4.13 Mean value of time difference of proposed prediction 95% considered

歩行者が進路変更した時刻を基準としたとき、全ての歩行者軌跡に対して減速を開始した時刻を Y 軸方向に中央値、平均値を取ったものをそれぞれ図 6.4.14 と図 6.4.15 に示す。ただし、68%の回避事例を考慮した際に減速を行っていなかった範囲を除外し、95%、99%のシミュレーション結果においても $Y = -2.4 \sim -1.0$ m の範囲で求めた。

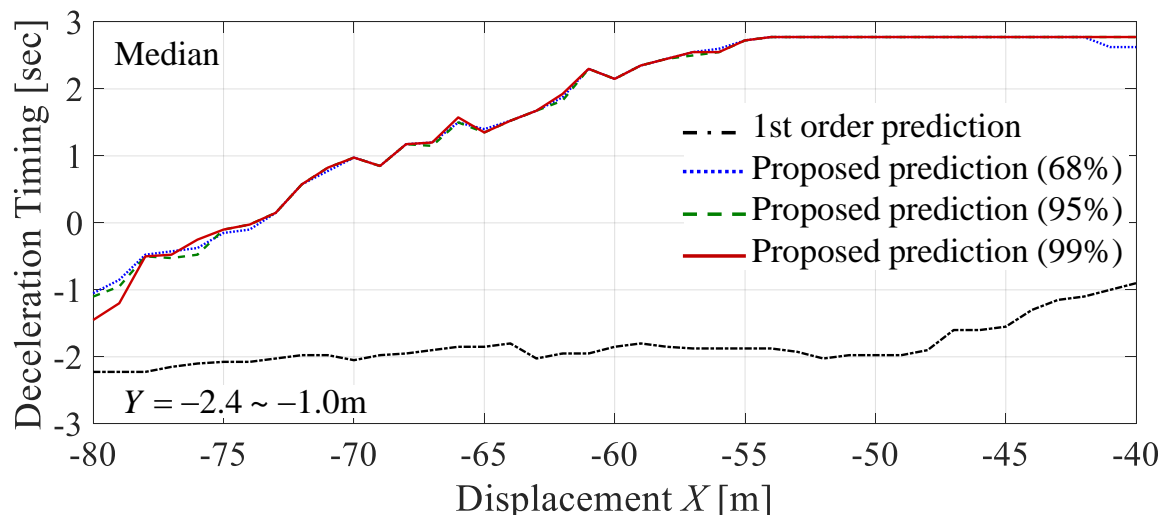


Fig. 6.4.14 Median value of time difference of proposed prediction 95% considered

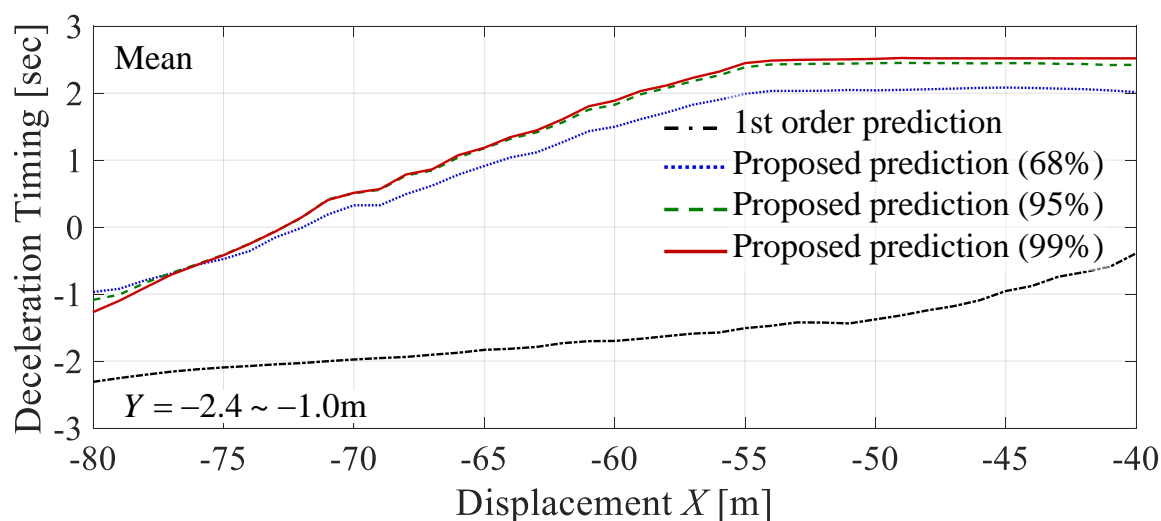


Fig. 6.4.15 Mean value of time difference of proposed prediction 95% considered

図 6.4.15 より、全てのパラメータで基準の時刻より早く減速を回避し始めた $X \geq -71$ m の範囲において、99%の結果と 95%の結果の差の平均値は 0.031 秒となった。このことから、歩行者が駐車車両を回避する場面において、99%の回避事例を考慮して予測した場合と、95%の回避事例を考慮して予測した場合では、減速開始タイミングに対する影響は少ないといえる。また、 $X \geq -71$ m の範囲において、99%の結果と 68%の

結果の差の平均値は 0.30 秒, 99%の結果と 1 次予測に基づくシミュレーション結果の差の平均値は 3.00 秒となり, 提案する移動予測手法を自動減速に用いた場合, どのような位置関係であっても一定の効果が期待できる.

6.4.3 自転車の歩行者追い越し場面におけるシミュレーション結果

6.4.2 節と同様, 6.4.1 節で示した自動減速シミュレーションのように, 自転車の歩行者追い越し場面におけるシミュレーションを実施する. シミュレーション時の自車両, 歩行者, 駐車車両の位置関係を図 6.4.15 に示す. 図 6.4.16 に示した追い越しを行う自転車の移動軌跡から一つずつに対して自車両の初期位置を変化させる. 実際に自転車が進路を変更した時刻を基準としたとき, 1 次予測手法とポテンシャルフィールドを用いた予測手法それぞれの場合において, 減速を開始した時刻の差を求める. 自車両の初期位置などのシミュレーションに用いるパラメータを表 6.4.2 に示す.

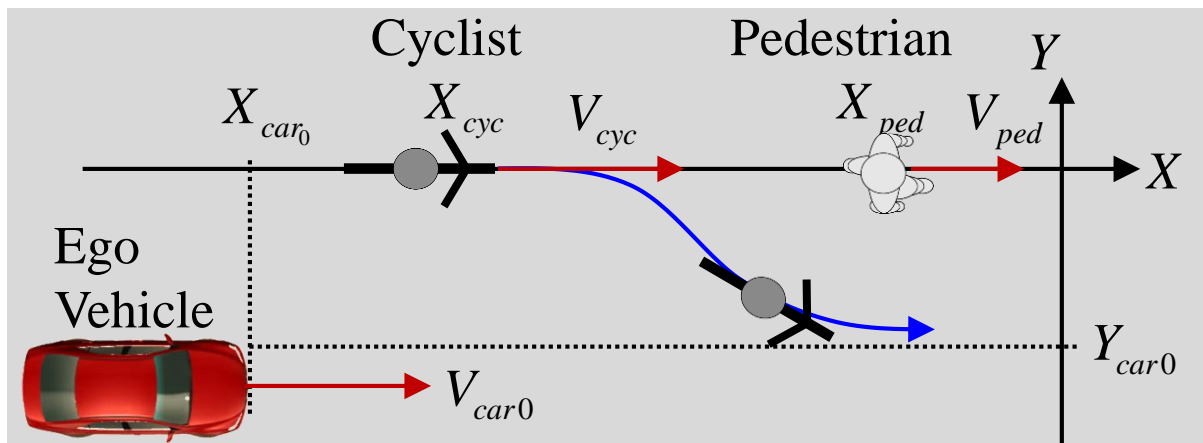
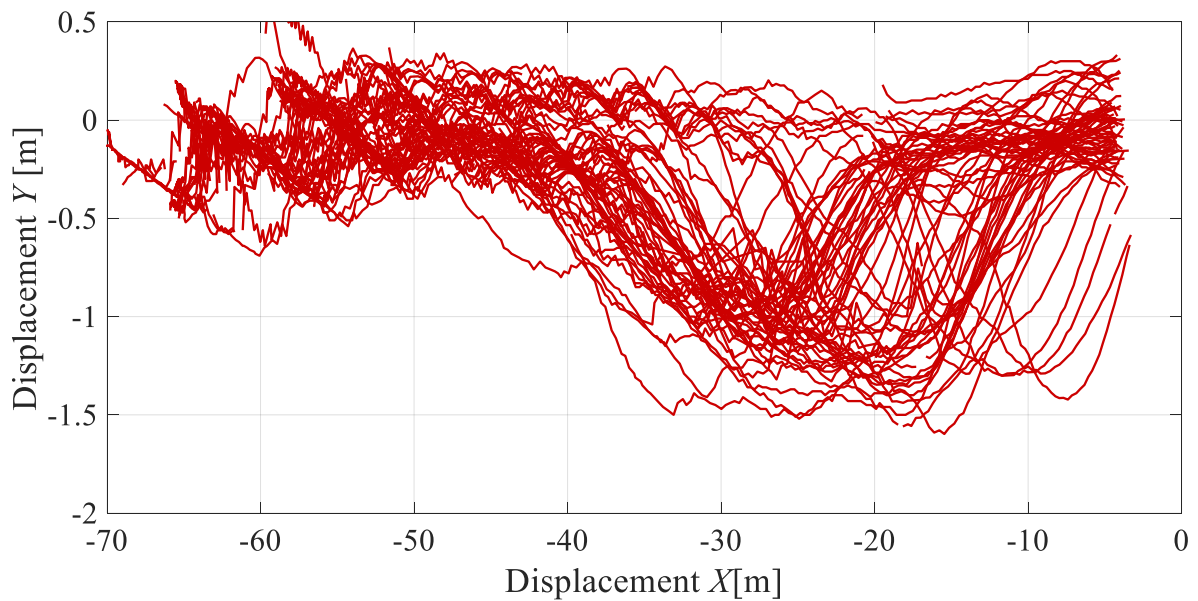


Fig. 6.4.15 Simulation scenario cyclist overtakes pedestrian

Table 6.4.2 Simulation parameters

Definition	Symbol	Value	unit
Initial velocity of ego vehicle	V_{car0}	30	km/h
Initial longitudinal position of ego vehicle	X_{car0}	-140 ~ -90	m
Calculation pitch width of X_{car0}	ΔX_{car0}	1.0	m
Initial lateral position of ego vehicle	Y_{car0}	-3.5 ~ -1.5	m
Calculation pitch width of Y_{car0}	ΔY_{car0}	0.1	m

**Fig. 6.4.16** All trajectories of cyclist overtaking pedestrian

1 次予測手法に基づき減速した場合のシミュレーション結果を示す。自車両の各初期位置において、基準となる時刻に対して減速を開始した時刻の中央値を図 6.4.17、平均値を図 6.4.18 に示す。図 6.4.17 について、中央値では $X = -140 \sim -110$ m の広い範囲で負の値を取っていることから、自転車が行者を追い越すために進路変更した後に自車両が減速を開始するケースが多い様子がわかる。一方、図 6.4.17 中の $X = -110 \sim -90$ m の範囲と、図 6.4.18 の広い範囲で正の値が多くみられるが、これは自転車のふらつきによって側方間隔を 1.5m 以上維持することができないと判断される事例が多かったためである。

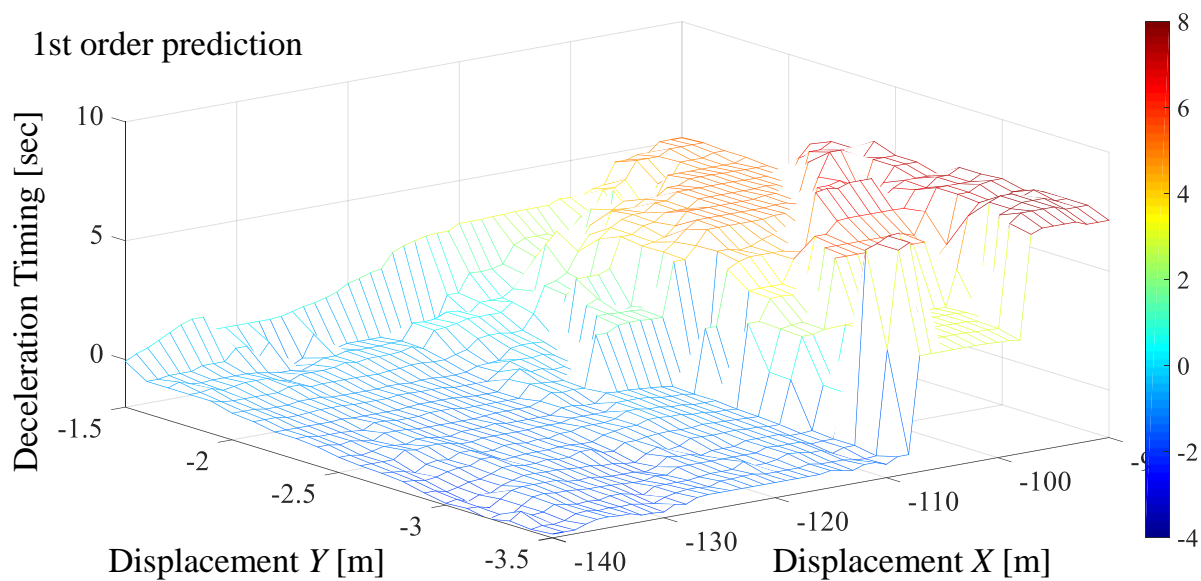


Fig. 6.4.17 Median value of time difference of 1st order prediction

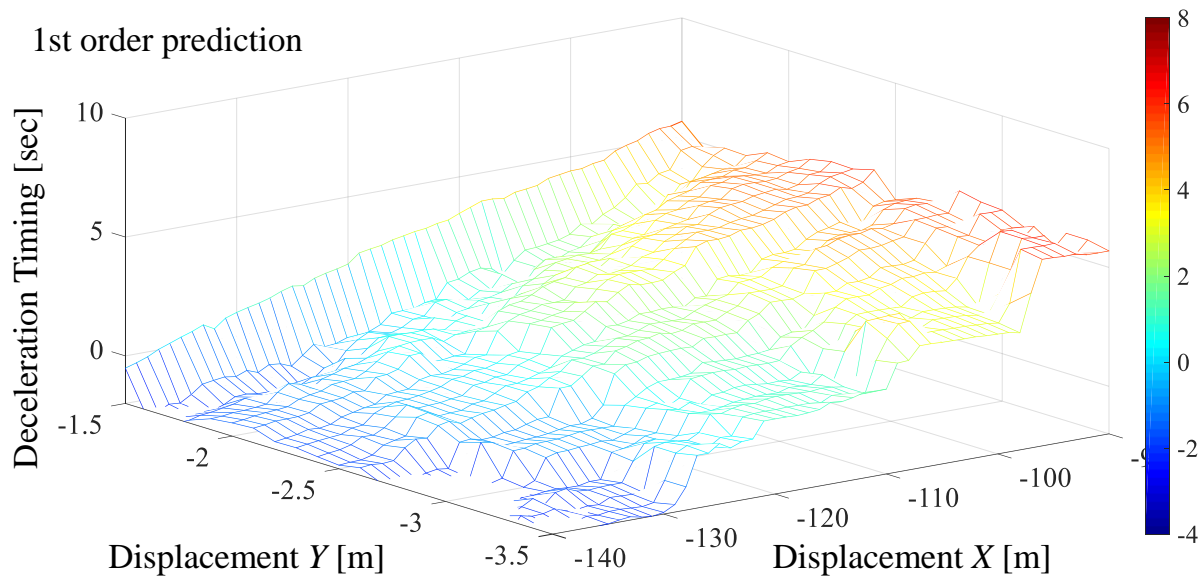


Fig. 6.4.18 Mean value of time difference of 1st order prediction

68%の歩行者追い越し事例を考慮したパラメータに設定した際の、提案する移動予測手法に基づき減速した場合のシミュレーション結果を示す。自車両の各初期位置において、基準となる時刻に対して減速を開始した時刻の中央値を図 6.4.19、平均値を図 6.4.20 に示す。図 6.4.19 と図 6.4.20 について、自転車歩行者が接近してから追い越しを開始し、側方間隔を大きく空けずに追い越すものとして予測しているため、X 軸、Y 軸方向とも自転車から離れるほど減速開始が遅くなる。

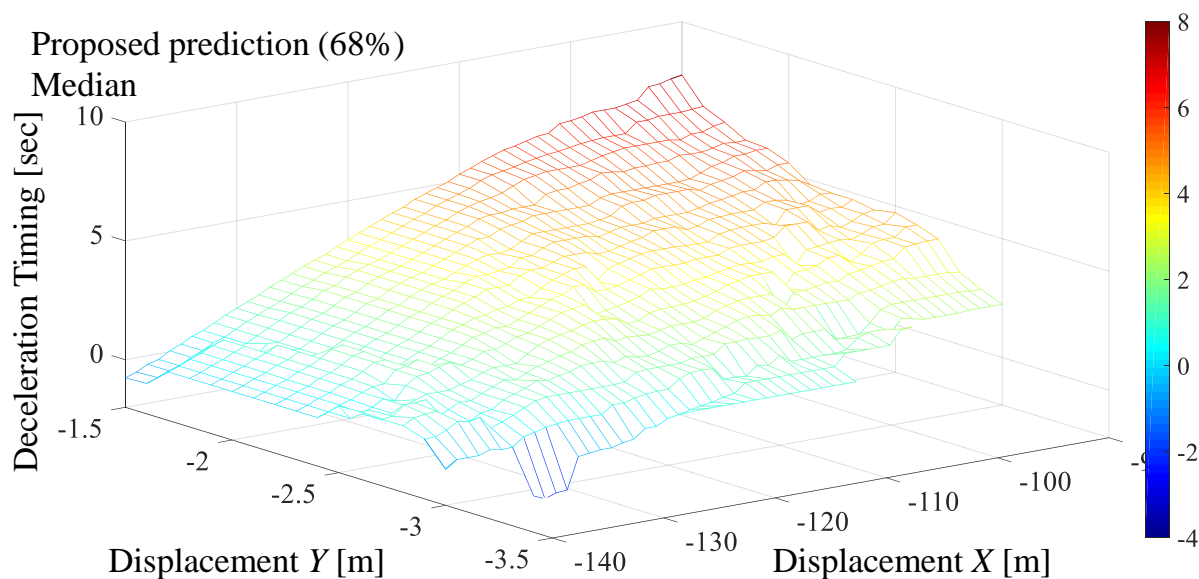


Fig. 6.4.19 Median value of time difference of proposed prediction 68% considered

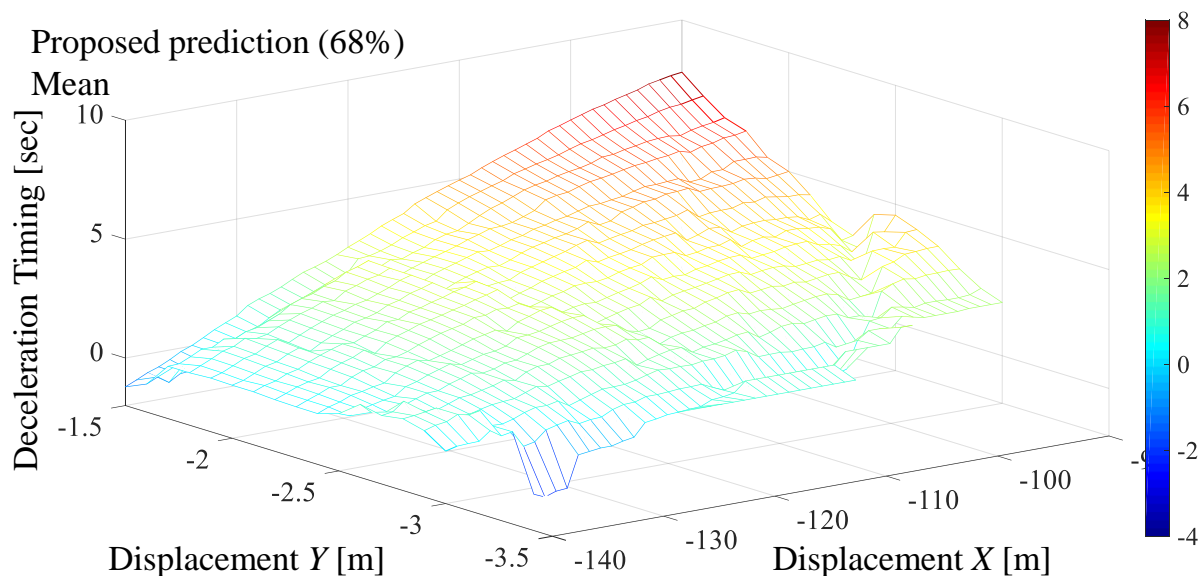


Fig. 6.4.20 Mean value of time difference of proposed prediction 68% considered

95%の歩行者追い越し事例を考慮したパラメータに設定した際の、提案する移動予測手法に基づき減速した場合のシミュレーション結果を示す。自車両の各初期位置において、基準となる時刻に対して減速を開始した時刻の中央値を図 6.4.21、平均値を図 6.4.22 に示す。図 6.4.21 と図 6.4.22 について、68%の結果では減速するのは $Y = -3.0 \sim -1.0$ m の範囲で合ったが、95%では $Y = -3.4 \sim -1.0$ m の範囲に広がったこと以外は同様の傾向を示している。

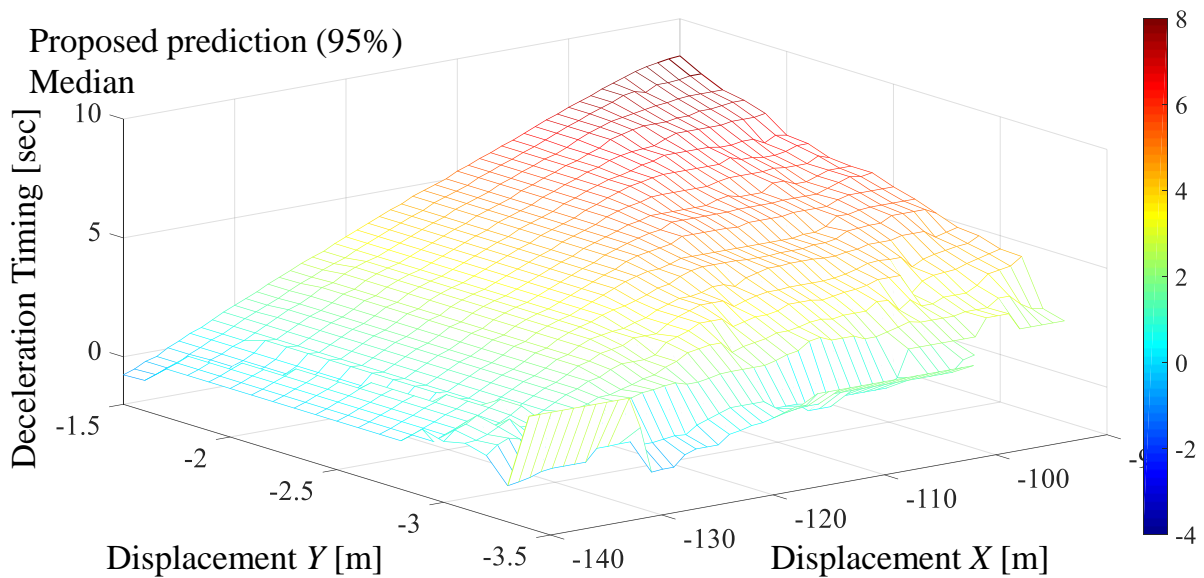


Fig. 6.4.21 Median value of time difference of proposed prediction 95% considered

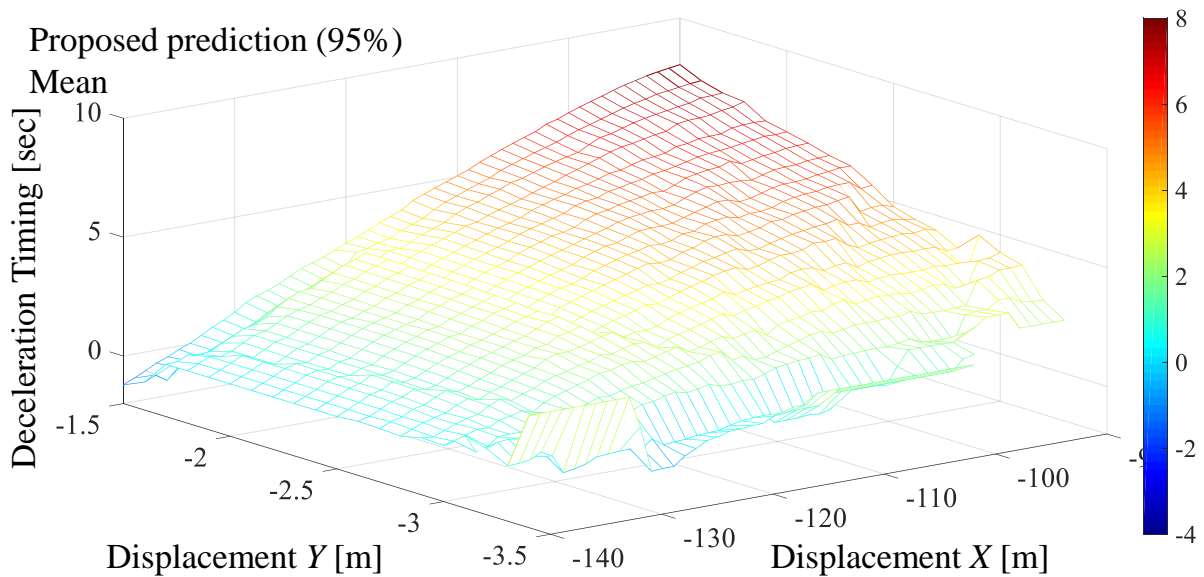


Fig. 6.4.22 Mean value of time difference of proposed prediction 95% considered

99%の歩行者追い越し事例を考慮したパラメータに設定した際の，提案する移動予測手法に基づき減速した場合のシミュレーション結果を示す．自車両の各初期位置において，基準となる時刻に対して減速を開始した時刻の中央値を図 6.4.23，平均値を図 6.4.24 に示す．図 6.4.23 と図 6.4.24 について， $Y = -3.0 \sim -1.5$ m の広い範囲で，基準より早く減速を開始できている．

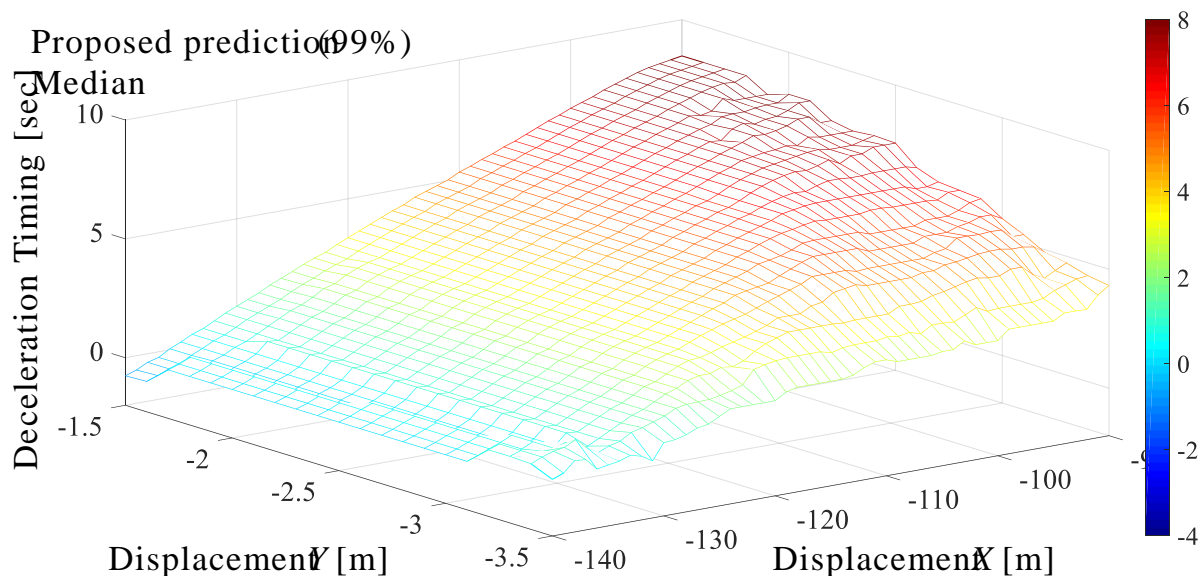


Fig. 6.4.23 Median value of time difference of proposed prediction 99% considered

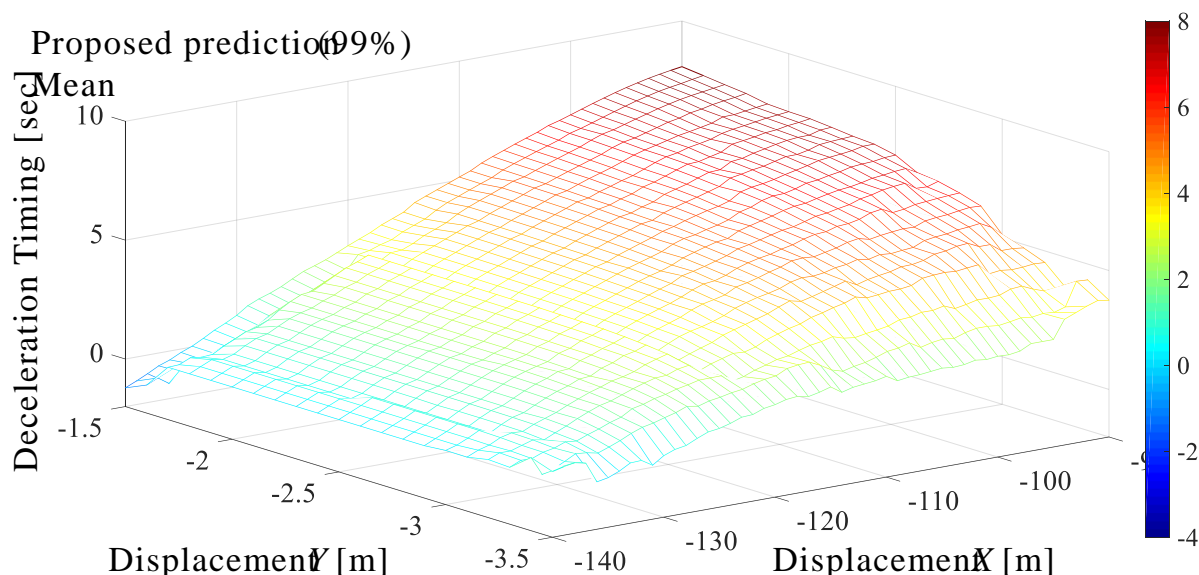


Fig. 6.4.24 Mean value of time difference of proposed prediction 99% considered

自転車が歩行者追い越しのために進路変更した時刻を基準としたとき，全ての自転

車の移動軌跡に対して減速を開始した時刻を Y 軸方向にそれぞれ中央値と平均値を取ったものを図 6.4.25 と図 6.4.26 に示す。ただし、68%の回避事例を考慮した際に減速を行っていなかった範囲を除外し、95%、99%のシミュレーション結果においても $Y = -3.0 \sim -1.5 \text{ m}$ の範囲で求めた。

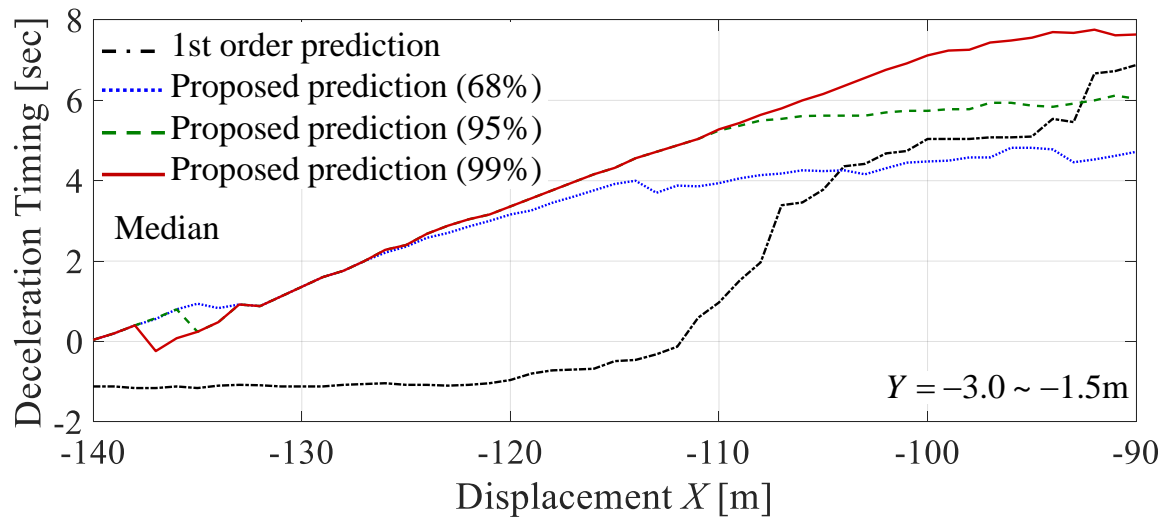


Fig. 6.4.25 Median value of time difference of proposed prediction 95% considered

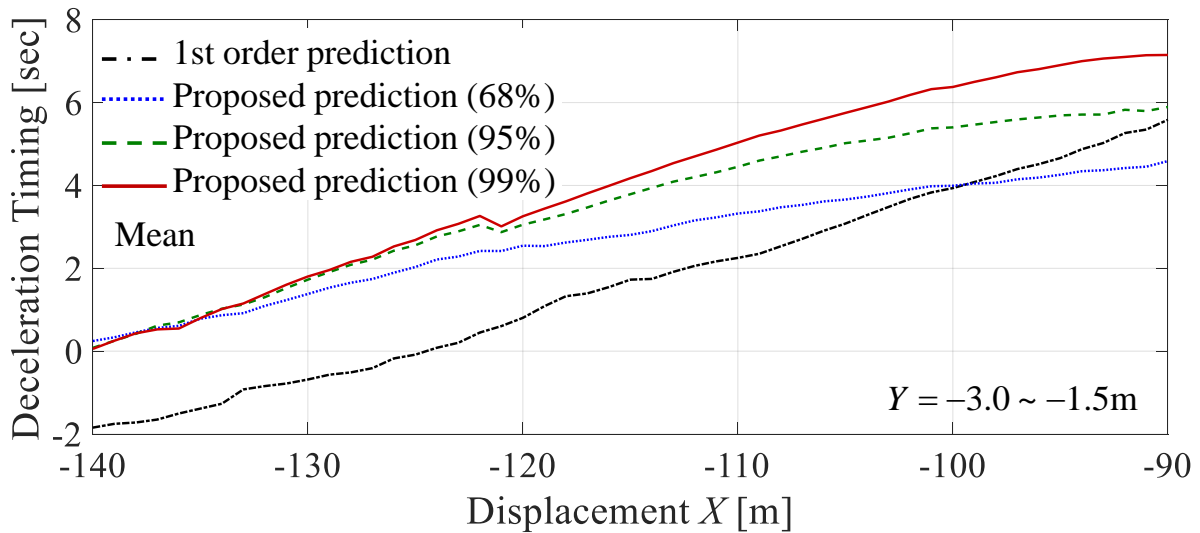


Fig. 6.4.26 Mean value of time difference of proposed prediction 95% considered

図 6.4.26 より、99%の結果と 95%の結果の差の平均値は 0.50 秒、99%の結果と 68%の結果の差の平均値は 1.34 秒、99%の結果と 1 次予測に基づくシミュレーション結果の差の平均値は 2.42 秒となり、提案する移動予測手法を自動減速に用いた場合、歩行

者の駐車車両回避場面と同様，どのような位置関係であっても一定の効果が期待できる．

6.4.4 自転車の自転車追い越し場面におけるシミュレーション結果

6.4.3 節と同様，自転車の自転車追い越し場面におけるシミュレーションを実施する．シミュレーション時の自車両，歩行者，駐車車両の位置関係を図 6.4.27 に示す．図 6.4.28 に示した追い越しを行う自転車の移動軌跡から一つずつに対して自車両の初期位置を変化させる．実際に自転車が進路を変更した時刻を基準としたとき，1 次予測手法とポテンシャルフィールドを用いた予測手法それぞれの場合において，減速を開始した時刻の差を求める．自車両の初期位置などのシミュレーションに用いるパラメータを表 6.4.2 に示す．

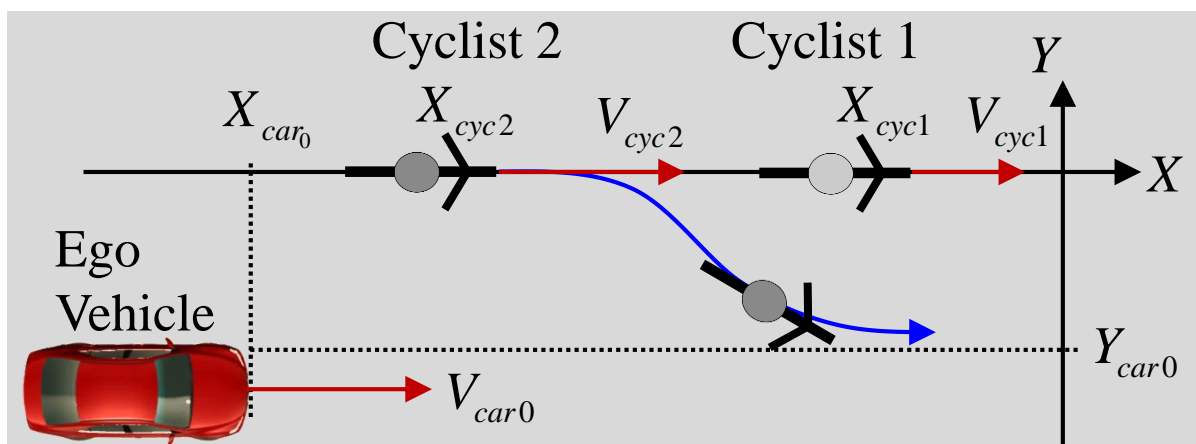


Fig. 6.4.27 Simulation scenario cyclist overtakes pedestrian

Table 6.4.2 Simulation parameters

Definition	Symbol	Value	unit
Initial velocity of ego vehicle	V_{car0}	30	km/h
Initial longitudinal position of ego vehicle	X_{car0}	-130 ~ -80	m
Calculation pitch width of X_{car0}	ΔX_{car0}	1.0	m
Initial lateral position of ego vehicle	Y_{car0}	-3.5 ~ -1.5	m
Calculation pitch width of Y_{car0}	ΔY_{car0}	0.1	m

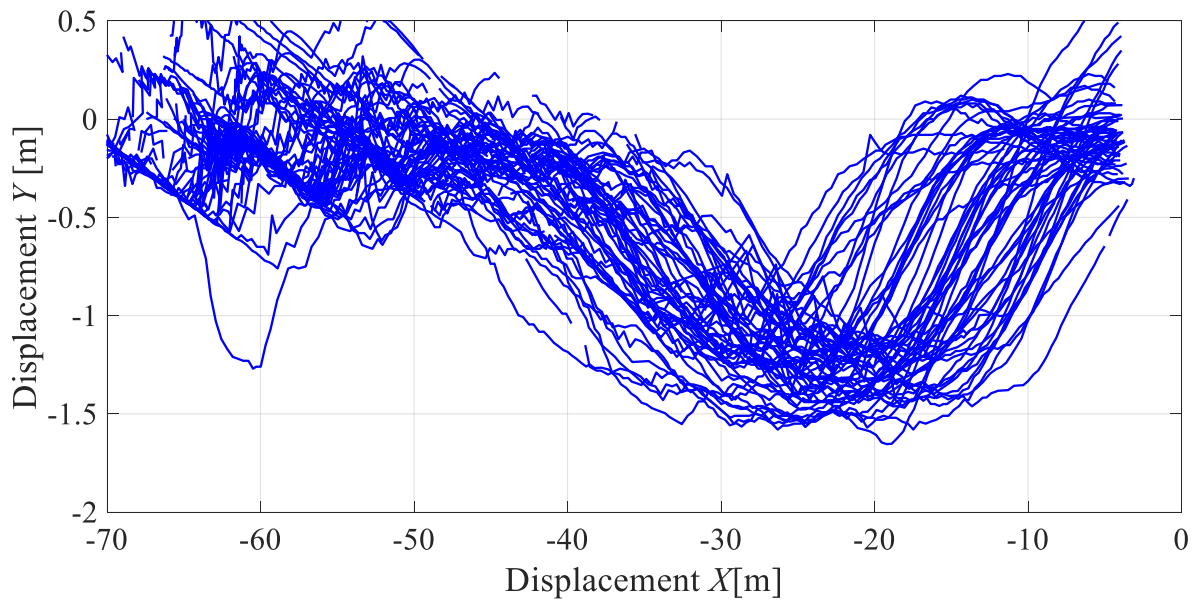


Fig. 6.4.28 All trajectories of cyclist overtaking other cyclist

1次予測手法に基づき減速した場合のシミュレーション結果を示す。自車両の各初期位置において、基準となる時刻に対して減速を開始した時刻の中央値を図 6.4.29、平均値を図 6.4.30 に示す。図 6.4.29 について、中央値では $X = -140 \sim -110$ m の広い範囲で負の値を取っていることから、自転車が歩行者を追い越すために進路変更した後に自車両が減速を開始するケースが多い様子がわかる。一方、図 6.4.29 中の $X = -110 \sim -90$ m の範囲と、図 6.4.30 の広い範囲で正の値が多くみられるが、自転車の歩行者場面と同様、自転車のふらつきによって側方間隔を 1.5m 以上維持することができないと判断される事例が多かったためである。

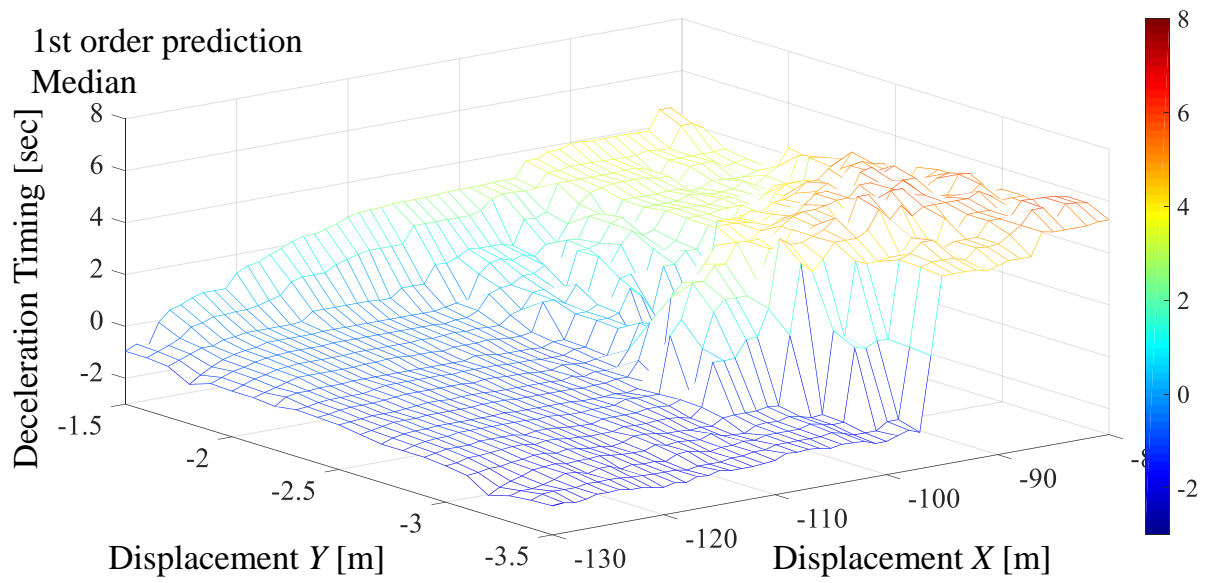


Fig. 6.4.29 Median value of time difference of 1st order prediction

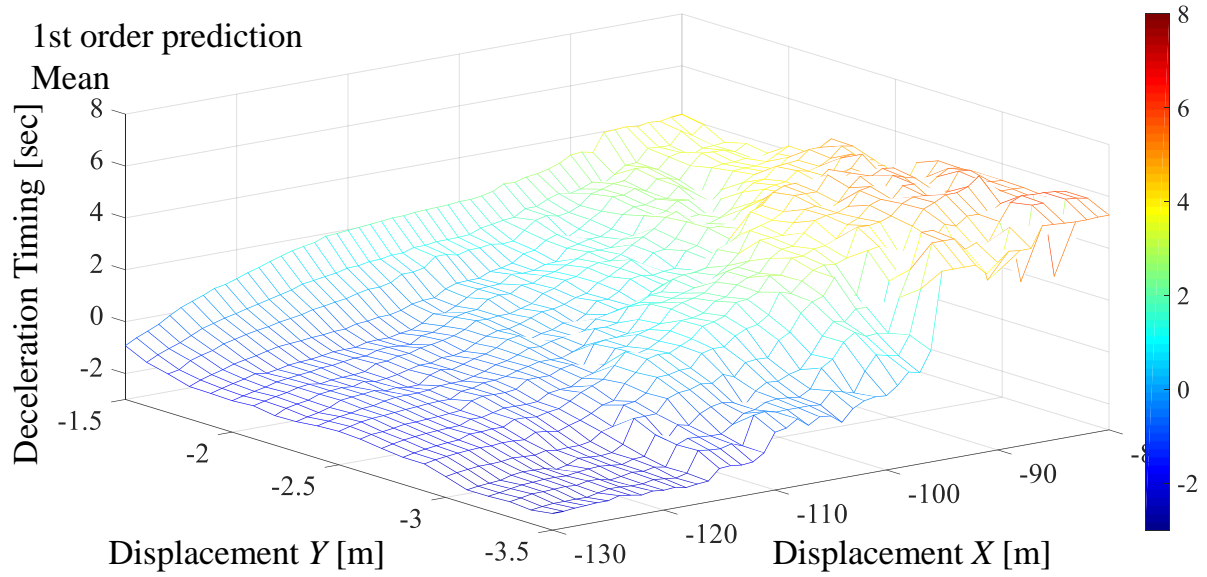


Fig. 6.4.30 Mean value of time difference of 1st order prediction

68%の歩行者追い越し事例を考慮したパラメータに設定した際の、提案する移動予測手法に基づき減速した場合のシミュレーション結果を示す。自車両の各初期位置において、基準となる時刻に対して減速を開始した時刻の中央値を図 6.4.31、平均値を図 6.4.32 に示す。図 6.4.31 と図 6.4.32 について、追い越しを行う自転車が前方の自転車へ接近してから追い越しを開始し、側方間隔を大きく空けずに追い越すものとして予測しているため、X 軸、Y 軸方向とも自転車から離れるほど減速開始が遅くなる。

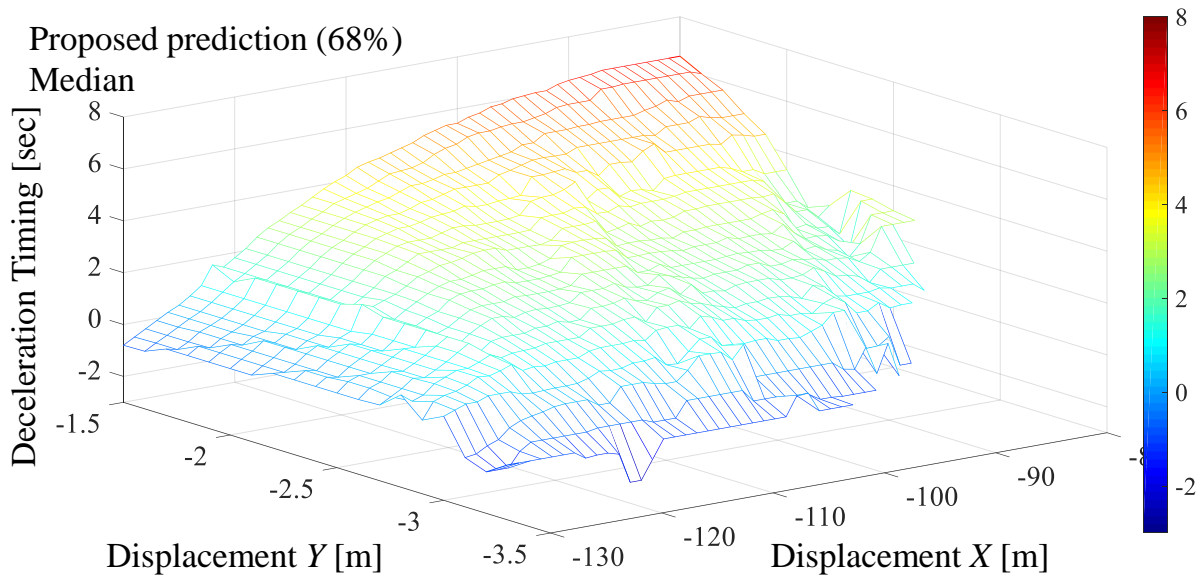


Fig. 6.4.31 Median value of time difference of proposed prediction 68% considered

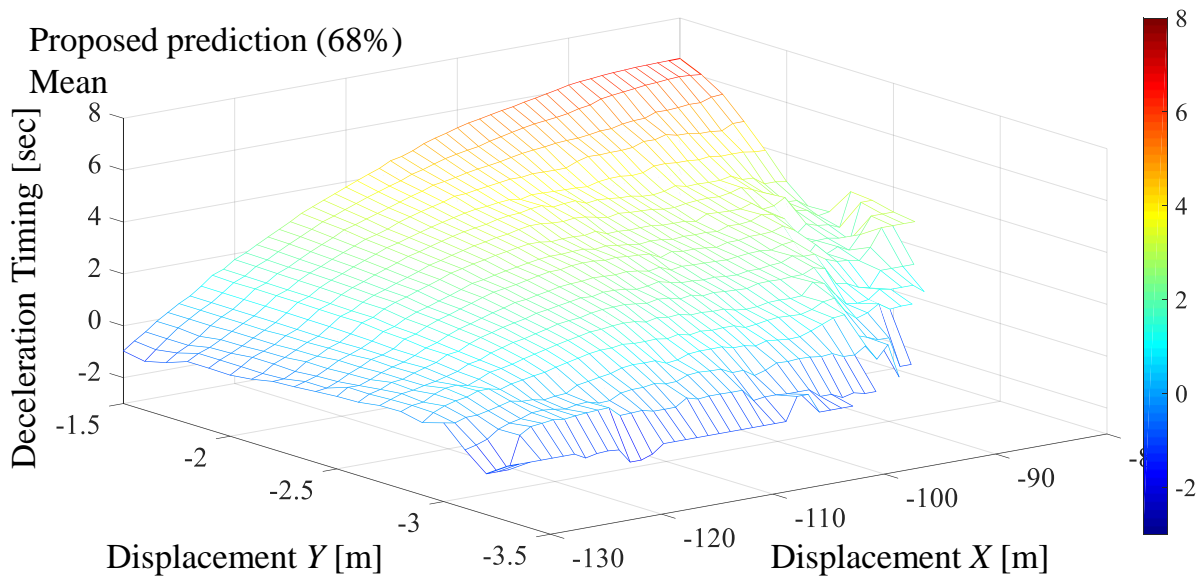


Fig. 6.4.32 Mean value of time difference of proposed prediction 68% considered

95%の歩行者追い越し事例を考慮したパラメータに設定した際の、提案する移動予測手法に基づき減速した場合のシミュレーション結果を示す。自車両の各初期位置において、基準となる時刻に対して減速を開始した時刻の中央値を図 6.4.33、平均値を図 6.4.34 に示す。図 6.4.33 と図 6.4.34 について、68%の結果では減速するのは $Y = -3.2$ m の位置で基準の時刻より遅く減速していたが、95%では一部を除き全域で基準より早く減速を開始している。

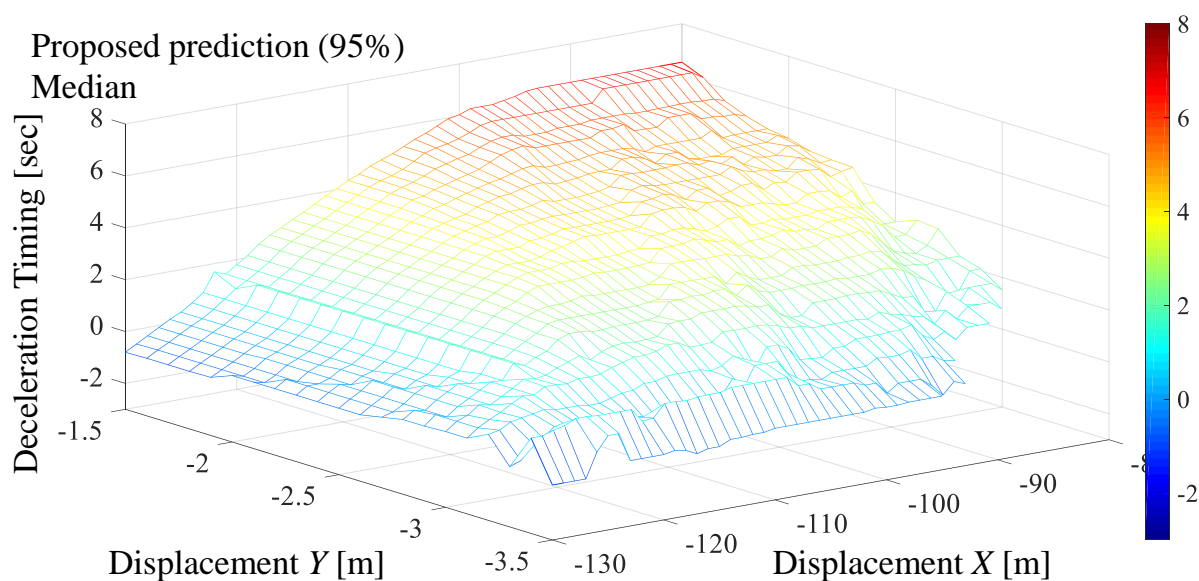


Fig. 6.4.33 Median value of time difference of proposed prediction 95% considered

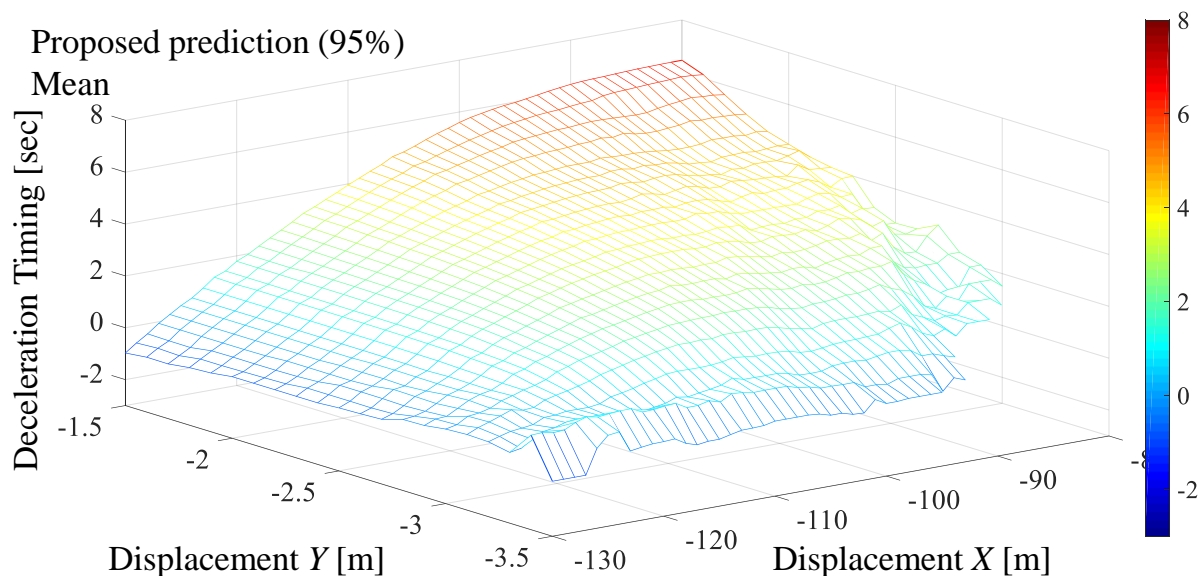


Fig. 6.4.34 Mean value of time difference of proposed prediction 95% considered

99%の歩行者追い越し事例を考慮したパラメータに設定した際の、提案する移動予測手法に基づき減速した場合のシミュレーション結果を示す。自車両の各初期位置において、基準となる時刻に対して減速を開始した時刻の中央値を図 6.4.35、平均値を図 6.4.36 に示す。図 6.4.35 と図 6.4.36 について、 $Y = -3.0 \sim -1.5$ m の広い範囲で、基準より早く減速を開始できている。

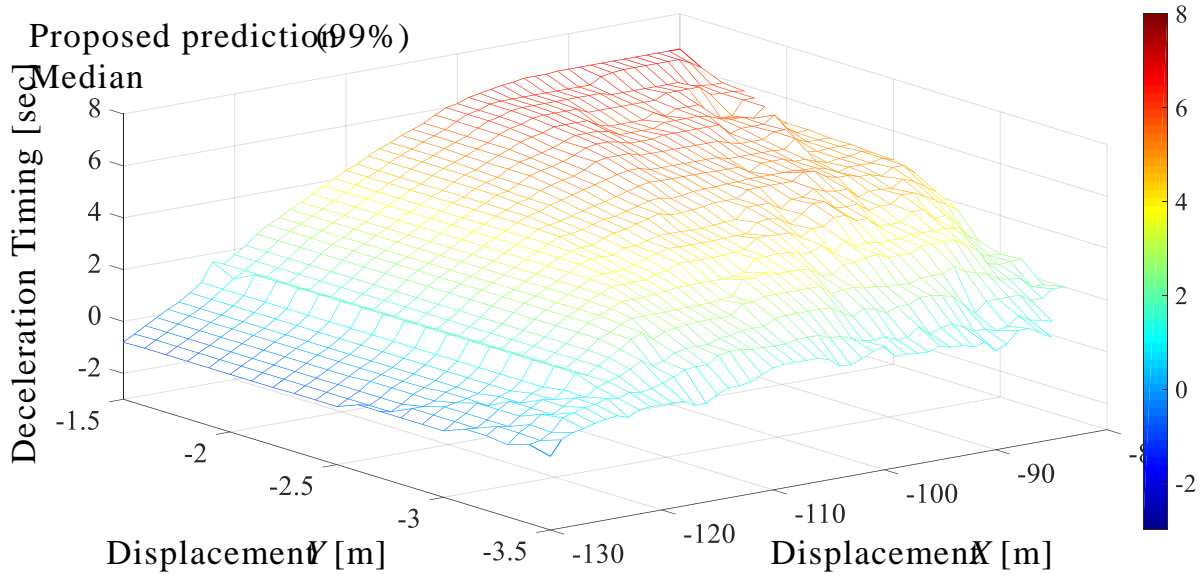


Fig. 6.4.35 Median value of time difference of proposed prediction 95% considered

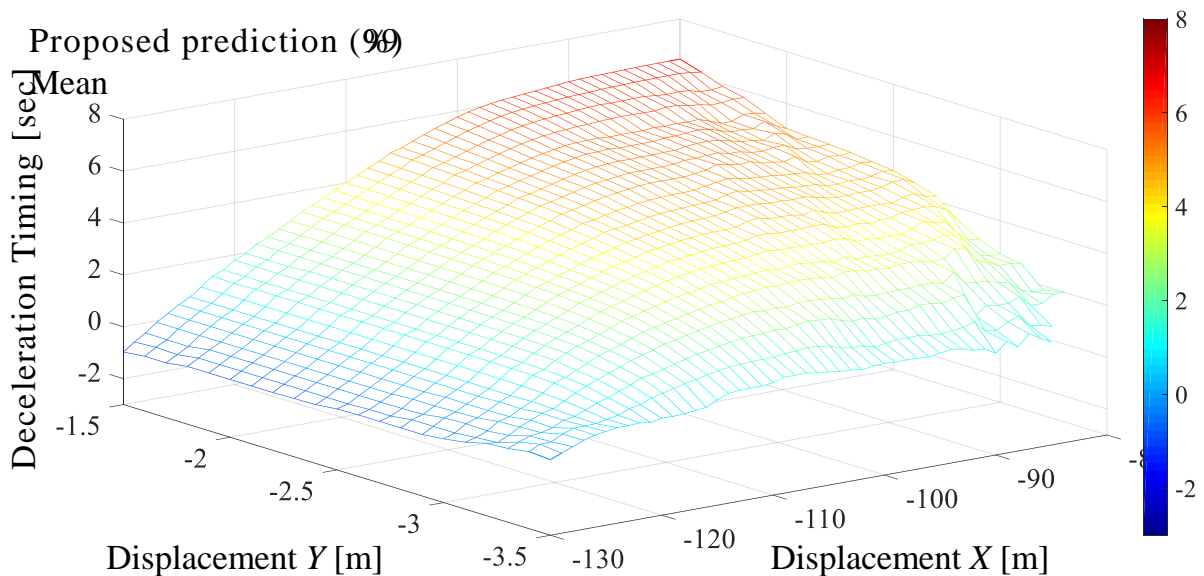


Fig. 6.4.36 Mean value of time difference of proposed prediction 95% considered

自車が遅い自転車を追い越すために進路変更した時刻を基準としたとき、追い越

しを行う全ての自転車の移動軌跡に対して減速を開始した時刻を Y 軸方向にそれぞれ中央値と平均値を取ったものを図 6.4.37 と図 6.4.38 に示す。ただし、68%の回避事例を考慮した際に減速を行っていなかった範囲を除外し、95%、99%のシミュレーション結果においても $Y = -2.6 \sim -1.5$ m の範囲で求めた。

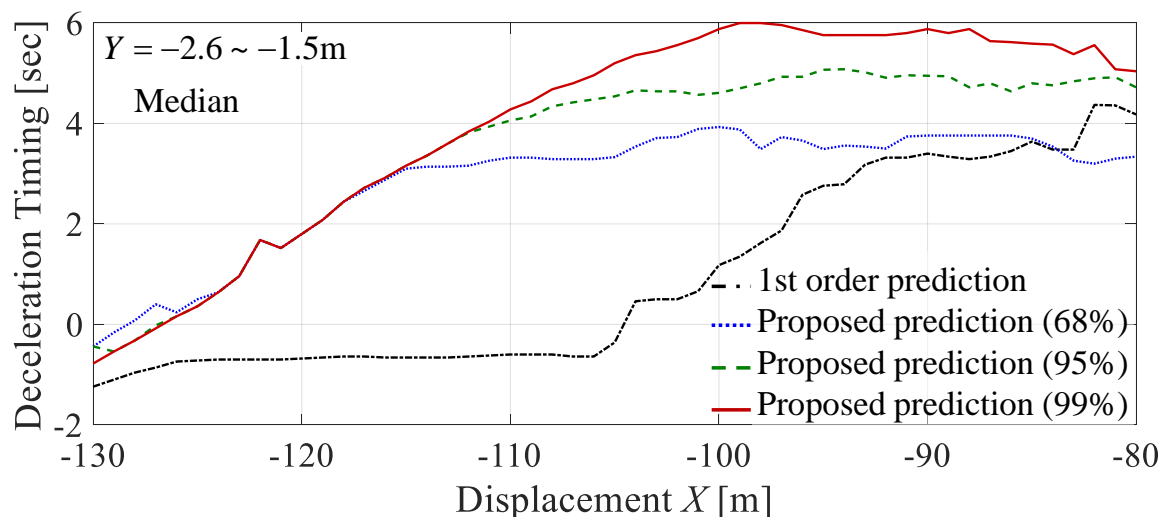


Fig. 6.4.26 Median value of time difference of proposed prediction 95% considered

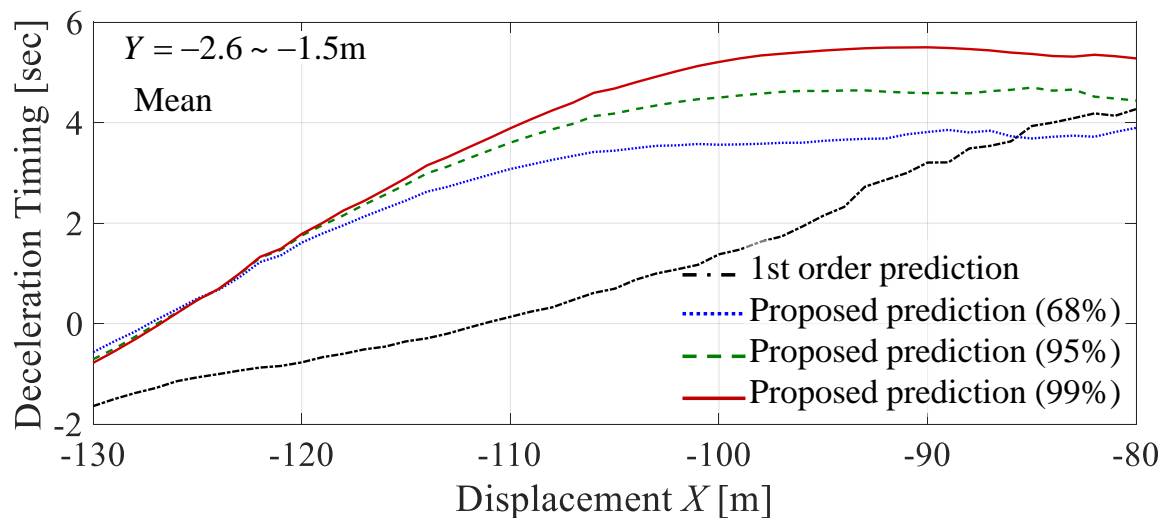


Fig. 6.4.27 Mean value of time difference of proposed prediction 95% considered

図 6.4.27 より、99%の結果と 95%の結果の差の平均値は 0.44 秒、99%の結果と 68%の結果の差の平均値は 1.00 秒となった。1 次予測を用いた場合のシミュレーション結果は、自転車のふらつきの影響を大きく受けているため、単純に比較することはできないものの、99%の結果と 1 次予測に基づくシミュレーション結果の差の平均値は

2.67 秒となり，提案する移動予測手法を自動減速に用いた場合，歩行者の駐車車両回避場面と同様，どのような位置関係であっても一定の効果が期待できる．

6.5 まとめ

第 6 章では，歩行者移動予測に基づく追い越し可否判断，および自動減速手法を構築し，従来型の 1 次予測手法とのシミュレーションを実施した．結果として，提案する移動予測手法を自動減速制御へ応用した場合の有効性を確認した．以下に得られた知見を示す．

- 実験データに基づき構築した移動予測手法は，1 次予測手法と比較して自転車のふらつきなどのノイズに対してロバストであることを確認した
- 移動予測に基づく追い越し可否判断と自動減速手法により，歩行者や自転車が進路変更する前に減速を開始し，最低限のジャークと加速度により安全に走行できることを確認した
- 歩行者の駐車車両回避，自転車の他者追い越し場面について，考慮する事例の範囲を小さくすることで，減速の開始は遅くなり，十分な側方間隔を維持していれば減速することなく走行する結果となることを確認した

以上より，本研究で提案した移動予測に基づく自動減速システムにより，駐車車両を避けて移動する歩行者を車両が追い越す場面における対歩行者事故，および他者を追い越して移動する自転車を車両が追い越す場面における対自転車事故を低減できる可能性があることを示した．今後は道路環境や状況に応じ，移動予測の際に想定の範囲内とするパラメータを変更することで，ドライバが違和感を覚えない運転支援システムや自動運転システムへの応用が期待できる．

第7章

結言

本論文では、対歩行者、対自転車衝突事故防止を目的とし、無信号交差点における歩行者飛び出し場面、一般単路における歩行者の駐車車両回避場面と、自転車の他者追い越し場面を想定し、それぞれの場面における移動予測手法を構築した。

運転指導員の運転行動分析に基づき、リスクポテンシャルを用いた自動減速モデルを構築した。

単路における歩行者・自転車に対する移動予測手法を構築する際、現実には則した予測結果を得られるよう、レーザレーダを用いた被験者実験を行い、場面ごとに歩行者や自転車の移動軌跡データを収集した。

収集したデータを基に、歩行者の駐車車両回避場面における特徴、および自転車の他者追い越し場面における特徴を分析した。

分析結果に基づき、ポテンシャルフィールドを用いた移動予測手法を構築し、シミュレーションにより設計通りの予測結果を得られることを確認した。

移動予測手法を用いた自動減速手法を考案し、従来型の移動予測手法との比較シミュレーションを行い、提案する移動予測手法の有効性を確認した。

以下に、本論文で得られた知見を示す。

- ・ リスクポテンシャルを用いた自動減速モデルにより、運転指導員の減速行動を再現可能であることを確認し、無信号交差点における歩行者飛び出しに対する有効性を確認した。
- ・ 実験により収集した歩行者の駐車車両回避場面、自転車の他者追い越し場面について移動軌跡を分析し、特徴量の分布を明らかにした
- 歩行者・自転車ともに、進路上にある静止物や移動している他者を避ける際、衝突余裕時間ではなく進行方向の相対距離を基準にして進路を変更している様子が確認できた

- ・ 構築した歩行者移動予測手法により，進路上の駐車車両を避けて移動する歩行者の移動経路と，その位置を予測可能であることを確認できた
- ・ 移動予測手法を自転車の他者追い越し場面にも応用し，追い越しを行う自転車の移動経路と，その位置を予測可能であることを確認できた
- ・ 構築した移動予測手法に対して，移動軌跡の分析結果に基づくパラメータを設定することで，想定内とする回避事例・追い越し事例の割合に応じて予測結果を得られることを確認できた
- ・ 移動予測に基づく自動減速制御シミュレーションにより，従来の 1 次予測手法と比較し，提案する移動予測手法によって歩行者・自転車の進路が変化する前に減速を開始することができ，有効であることが確認できた

以上のことより，歩行者・自転車の移動予測に基づく自動減速制御システムを構築できたといえる．

以下に，移動予測運転モデルに関する今後の課題を示す．

1. 高密度道路環境下における歩行者・自転車の移動予測 モデルの多様性

本研究では，歩行者の駐車車両回避場面，および自転車の他者追い越し場面に対する移動予測手法の構築と，これら 2 つの場面における自動減速制御システムへの応用を検討し，評価を行った．しかし，1 対複数人の追い越しやすれ違い場面，対向車の有無など，対応できていない場面は多い．今後様々な場面で危険予測を行い，安全な運転行動を実現するためには，より複雑な高密度道路環境下において他者の移動を予測可能にする必要がある．

2. 自動減速支援システム 再加速モデルの構築，操舵による安全確保，システムと人との協調性

本論文第 5 章において，構築した移動予測手法に基づく自動減速制御システムの有効性の検証を行い，提案手法により，対歩行者・対自転車に対して緩やかな減速行動で安全を確

保できる可能性があることを示した。今後、歩行者が駐車車両を回避し終わったり、自転車が他者の追い越しをやめたりする等、安全確認ができた後の再加速モデルの構築により、不要な減速を抑えることで、ドライバの快適性を損なわないシステムの構築が重要である。また、本研究では自動減速制御により歩行者・自転車に対する安全性を確保したが、操舵によって側方間隔を維持することで、大きく減速せずに走行することも可能であると考えられる。一般ドライバに使ってもらうためには、システムが不快感を与えないことが鍵になるため、ドライバと運転支援システムの協調性の問題の検討を行っていく必要がある。

参考文献

- (1) 警察庁：平成 28 年における交通事故の発生状況
- (2) 村井章展，今後の車両の安全対策のあり方について，公益社団法人自動車技術会 自動車技術，Vol.71，No.4，2017，pp.13-20.
- (3) 公益財団交通事故総合分析センター，交通事故の国際比較(2015 年)，2017，pp.5.
- (4) 上西朗弘，米村繁，吉田博司，衝突安全設計のための材料・構造最適化技術，公益社団法人自動車技術会 自動車技術，Vol.71，No.4，2017，pp.65-70.
- (5) 大垣和信，軽自動車の衝突安全技術開発，公益社団法人自動車技術会 自動車技術，Vol.71，No.4，2017，pp.77-83.
- (6) 永富薫，クルマの歩行者保護技術，公益社団法人自動車技術会 Motor Ring，No.36，2013，pp.1-3.
- (7) 藤田賢治，曾我部洋，西原剛史，藤井照雅，歩行者保護における高効率衝撃吸収ボンネットトレインフォースメント構造とアクティブボンネットの開発，自動車技術，Vol.71，No.4，2017，pp.90-94
- (8) 中央交通安全対策会議，交通安全基本計画 交通事故のない社会を目指して，2016，pp.6.
- (9) 森澤三郎，今井玲男，小竹元基，森川紘司，石田浩，ドライブレコーダーを活用した高齢運転者の安全運転診断，公益財団法人自動車技術会 2016 年秋季大会学術講演会講演予稿集，2016，pp.1451-1456.

- (10) Misato NIHEI, Kazuya TAMIDA, Motoki SHINO and Minoru KAMATA, Research on Intention and Consciousness of Unsafe Driving Behavior Based on Multimodal Analysis of Elderly Driver, Second International Symposium on Future Active Safety Technology toward zero-traffic-accident(FAST-zero), 2013,OS2-2-1
- (11) 碓孝浩, 衝突安全に関する基準と自動車アセスメント, 公益社団法人自動車技術会 自動車技術, Vol.71, No.4, 2017, pp.21-25.
- (12) 小竹元基, 宇積勇太朗, 鎌田実, 無信号交差点通過時の運転行動に基づく高齢者の衝突リスク知覚評価指標, 公益財団法人自動車技術会 2015 年秋季大会学術講演会講演予稿集, 2015, pp.256-259.
- (13) 露木元, 林隆三, 永井正夫, 狭路における歩行者追い越し時の危険予測運転支援システムの開発, 公益財団法人自動車技術会 2013 年秋季大会学術講演会予稿集, No.125-13, 2013, pp.5-8.
- (14) Julius ZIEGLER, Henning LATEGAHN, Markus SCHREIBER, Christoph G.KELLER, Carsten KNÖPPEL, Jochen HIPPE, Martin HAUEIS and Christoph STILLER, Video Based Localization for BERTHA, 2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2014, pp.1231-1238
- (15) 菅沼直樹, 林悠太郎, 永田大記, 高橋謙太, 高齢過疎地域における自動運転自動車の市街地公道実証実験概要, 公益社団法人自動車技術会 2015 年春季大会学術講演会講演予稿集, 2015, pp.390-394.
- (16) 田川傑, 佐藤健治, 小竹元基, 単路直進時における視認可能な歩行者との衝突リスクに関する研究, 公益社団法人自動車技術会 2015 年秋季大会学術講演会講演予稿集, 2015, pp.799-804.

- (17) 赤井直紀, 竹内栄二郎, 山口拓真, Luis Yoichi MORALES, 吉原佑器, INS とマルチレイヤーLiDAR を用いた高精度自己位置推定に基づく一般公道での自動運転, 公益社団法人自動車技術会 2017 年春季大会学術講演会講演予稿集, 2017, pp.178-183.
- (18) 棚橋祥夫, 北野和俊, 林幸雄, 高橋宏治, 松村英治, 自動運転を実現する LiDAR 技術, 公益社団法人自動車技術会 2017 年春季大会学術講演会講演予稿集, 2017, pp.166-171.
- (19) 三浦大輝, 齊藤充行, 吉村大二郎, 脇田航, 小林康秀, ドライバの運転動作を考慮した自動運転のための車両モデルの交差点と狭路区間への適用, 公益社団法人自動車技術会 2017 年春季大会学術講演会講演予稿集, 2017, pp.2593-2598.
- (20) 宇治橋貞幸, 北岡哲子, 予防安全性能の評価と自動車アセスメント事業への導入, 公益社団法人自動車技術会 自動車技術, Vol.68, No.12, 2014, pp.12-18.
- (21) 独立行政法人自動車事故対策機構, 自動車アセスメント 衝突安全性能評価 事故時に人を守る技術 詳細版, 2017, pp.23.
- (22) 独立行政法人自動車事故対策機構(2), 予防安全志納アセスメント(Online), Available from < http://www.nasva.go.jp/mamoru/active_safety_search/ >, (参照日 2017 年 12 月 13 日)
- (23) 永井正夫, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 林隆三, 石崎由也, ヒヤリハットデータベースを基にした対歩行者・自転車事故回避システムの評価手法の検討, 第 54 回自動制御連合講演会講演論文集, pp.222-226
- (24) 加藤良文, 鈴木知二, デンソーの先進安全技術動向, デンソーテクニカルレビュー, Vol.18, 2013, pp.12-22.

- (25) 長谷川隆裕, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 永井正夫, 潜在リスク予測ドライバモデルを用いた自立運転知能システムの運動制御～駐車車両回避時の経路生成～, 公益社団法人自動車技術会 2014 年春季大会学術講演会講演予稿集, No.5-14, 2014, pp.9-12.
- (26) 前田健太, 児島隆生, 横山篤, 市街地での自動運転に向けた速度制御手法の開発, 公益社団法人自動車技術会 2015 年秋季大会学術講演会講演予稿集, 2015, pp.1274-1278.
- (27) Shino MOTOKI, Minoru KAMATA, Youhei MICHITSUJI, Enhancement of Driver Risk Perception Ability using Virtual Coaching System for Elderly Drivers, Second International Symposium on Future Active Safety Technology toward zero-traffic-accident (FAST-zero), 2013, OS2-2-4
- (28) 小島和浩, 亀田能成, 大田友一: NaviView 見通しの悪い交差点での仮想ミラー提示による運転者への視覚支援, 電子情報通信学会 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, パターン認識・メディア理解, Vol.103, No.737, pp.19-24, 2004
- (29) 鈴木秀格, 村田英一, 荒木純道: 出会い頭衝突事故防止のための位置情報を利用した車車間通信方式に関する検討, 電子情報通信学会 電子情報通信学会技術研究報告.ITS IEICE technical report, Vol.105, No.464, pp.7-12, 2005
- (30) 山中英生, 河津孝典, 三谷哲雄: 無信号交差点における一時停止支援 ITS の警報アルゴリズムの研究, 土木計画学研究 講演集,31 巻,p225,2005
- (31) 田中芳貴, 鹿嶋雅之, 佐藤公則, 渡邊睦, 屋外画像解析による状況認識に関する研究,画像認識・理解シンポジウム, pp.908-914, 2009
- (32) 尾崎宏樹, 井上奏佑, 安田知加, 森直史, 長尾確: 個人用知的移動物体による移動障害物回避, 情報処理学会第 71 回全国大会, 2009

- (33) 竹内栄二郎, 坪内考司: 移動ロボットによる環境地図生成のための3次元化NDTを用いた高速3次元スキャンマッチング, 第11回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.252-257, 2006
- (34) 中島佑輔, 高野渉, 中村仁彦, 松下晃洋: レーザレンジファインダを用いた極座標表現による移動ロボットの経路生成, 第27回日本ロボット学会学術講演会, 2009, 1E2-01
- (35) Alberto Broggi, Petro Cerri, Stefano Ghidoni, Paolo Grisleri, Ho Gi Jung: A New Approach to Urban Pedestrian Detection for Automatic Braking, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.10, No.4, 2009, pp.594-605.
- (36) 劉建宏, 大枝良直, 角知憲, パーソナルスペースを用いた障害物を回避する歩行者の群衆流動, 土木学会論文集 Vol.64, No.4, 2008, pp.513-524.
- (37) Tsukasa SHIMIZU, Yoshihiro OHAMA, Shin-ichi NAGATA and Jun SAKUGAWA, A computational framework for estimating collision risk against pedestrians, R&D Review of Toyota CRDL, Vol.43 No.1, 2012, pp. 33-42.
- (38) 大前学, 岡田成弘, 原孝介, サービスエリア内等の歩車混在環境での自動運転における歩行者の移動予測情報を用いた路車協調型速度制御に関する研究, 公益社団法人自動車技術会論文集, Vol.46, No.2, 2015, pp.551-557.
- (39) 日本工業規格, JIS C 6802 レーザ製品の安全基準(Online), Available from <<http://kikakurui.com/c6/C6802-2011-01.html>>, 参照日 2017 年 12 月 13 日, pp.5.
- (40) ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 長谷川 大悟, 江澤 和浩, 道辻 洋平, 無信号交差点における歩行者事故防止のための危険予測運転メカニズムに関する研究 - 運転指導員の行動データによるモデルの構築と運転支援の設計, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.3-12 (2012), pp.7-12

- (41) ピヤボン・ウォンワイウィット, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 道辻 洋平 :
ヒヤリハットデータベースに基づく無信号交差点における歩行者・自転車の行動分析, 日
本機械学会第 20 回交通・物流部門大会講演論文集, No.11-59, pp.19-22
- (42) 酒井裕一, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 清水郁子, 永井正夫, ダーク・ウル
ブリヒト, ロルフ・アドマツト, オプティカルフローを用いた車両運動推定に基づく歩行
者衝突警報システムの開発, 第 54 回自動制御連合講演会講演論文集, pp.597-602.
- (43) 木村賢治, 池田幸洋, 一時停止交差点における情報提供検討, 公益社団法人自動車技術会
論文集, Vol.39, No.4, 2008, pp.137-140.
- (44) 王鋒, 佐川貢一, 猪岡光, 自動車の加減速と乗り心地の関係に関する研究, 人間工学,
Vol.36, No.4, 2000, pp.191-200.
- (45) ロバート・ボッシュ, ボッシュ自動車ハンドブック 日本語版 第 1 版, pp.334-338, p.679,
山海堂
- (46) 道路交通法第 18 条の 2

謝辞

本研究を行うにあたり、ご指導・ご助言と最良な研究環境を賜りました、東京農工大学

ポンサトーン ラクシンチャラーンサク 准教授

に心より深く感謝申し上げます。研究室に配属されてから合計7年間、先生の適切なご指導、ご助言がなければここまで仕上げられなかったと思います。国際学会での発表の機会や3ヶ月間のドイツ滞在など、またとない貴重な経験の場を与えていただいたことも大変感謝しています。また、お酒の席では頭脳だけでなく味覚の鋭さが光っていたことも印象に残っています。振り返ってみると、充実した研究室生活を送ることができたと思います。

また、研究グループとして、ご指導・ご助言いただき、素晴らしい生活環境を賜りました、

永井 正夫 名誉教授

毛利 宏 教授

に心より感謝申し上げます。先生方が築いてきた環境あってこそその研究生活でした。ご迷惑をおかけすることもありましたが、真摯に応じていただき大変お世話になりました。

また、共同研究として日立製作所の前田さん、横山さん、児島さん、稲葉さん、石川さんには、お忙しい中お時間を割いていただき、研究方針や手法の詳細など、たくさんのご助言をいただきました。至らぬ点多々あったかと思いますが、大変お世話になりました。

研究生活を通して、ポンサトーン研、永井研、毛利研の皆様には大変お世話になりました。先輩はもちろん、同期、後輩も多く見送ってきましたが、どの代も特色があり、毎日楽しく過ごすことができたと思います。先輩、後輩にも代ごとに一言書きたいところではありますが、あまりにも長く研究室に在籍したためにその数も多くなるため省略させていただきます。しかしながら、幾度となく腐りかけながらも、後輩たちがいたからこそここまでやってくることができたと実感しています。松實さんのような鋭い視点での意見や的確なアドバイスをすることはできなかったと思いますが、少しでも何かためになることができていたら幸いです。

学生が卒業していく中、山崎さんには長らくお世話になりました。雑談で気分を紛らわすことができたことは数知れません。赤木さんには研究でも非常にお世話になり、感謝しております。趣味のことも加味すると、この4年間は赤木さんのおかげでより

充実したものになったと思います。齊藤さんにもお世話になりました。特に国際学会で一緒にいた際やお酒の席で、普段と違う一面を垣間見ることができ楽しかったです。有田さんも短い期間ではありましたが、お世話になりました。今後の研究室での活躍を祈念しております。

また、両親を始め家族には大変お世話になりました。家族の支えがなければ万全の状態で研究活動を続けることも困難でした。特に夜遅く帰ることが多くなった後半、サポートがなければ体調を崩していたと思います。何かと迷惑をかけてきてしまいましたが、とても感謝しています。

最後に、長い間ポンサトーン研究室に在籍して参りましたが、改めてポンサトーン先生の下で毎日を過ごすことができて良かったと思います。ポンサトーン先生、研究室や研究に関わったすべての皆様、家族に、心から感謝いたします。

平成 30 年 3 月 30 日

江澤 和浩