

第4回GREMOシンポジウム
「産学連携で加速する名大モビリティGX・DX」

歩車混在移動空間における
グローバルな調和をめざして
(Human Centric × DX = ?)

2024年11月29日

名古屋大学
鈴木達也

近未来における移動空間

多様な移動手段が許容される移動空間

特徴 1 : 移動主体のダイバーシティ

- 自動車（完全自動、運転支援、手動）
- 歩行者（高齢者、小児、身体特性）
- 自転車（広い速度域、ルールあいまい）
- 小型パーソナルモビリティ（未知数）

特徴 2 : 移動体知能化技術の進化

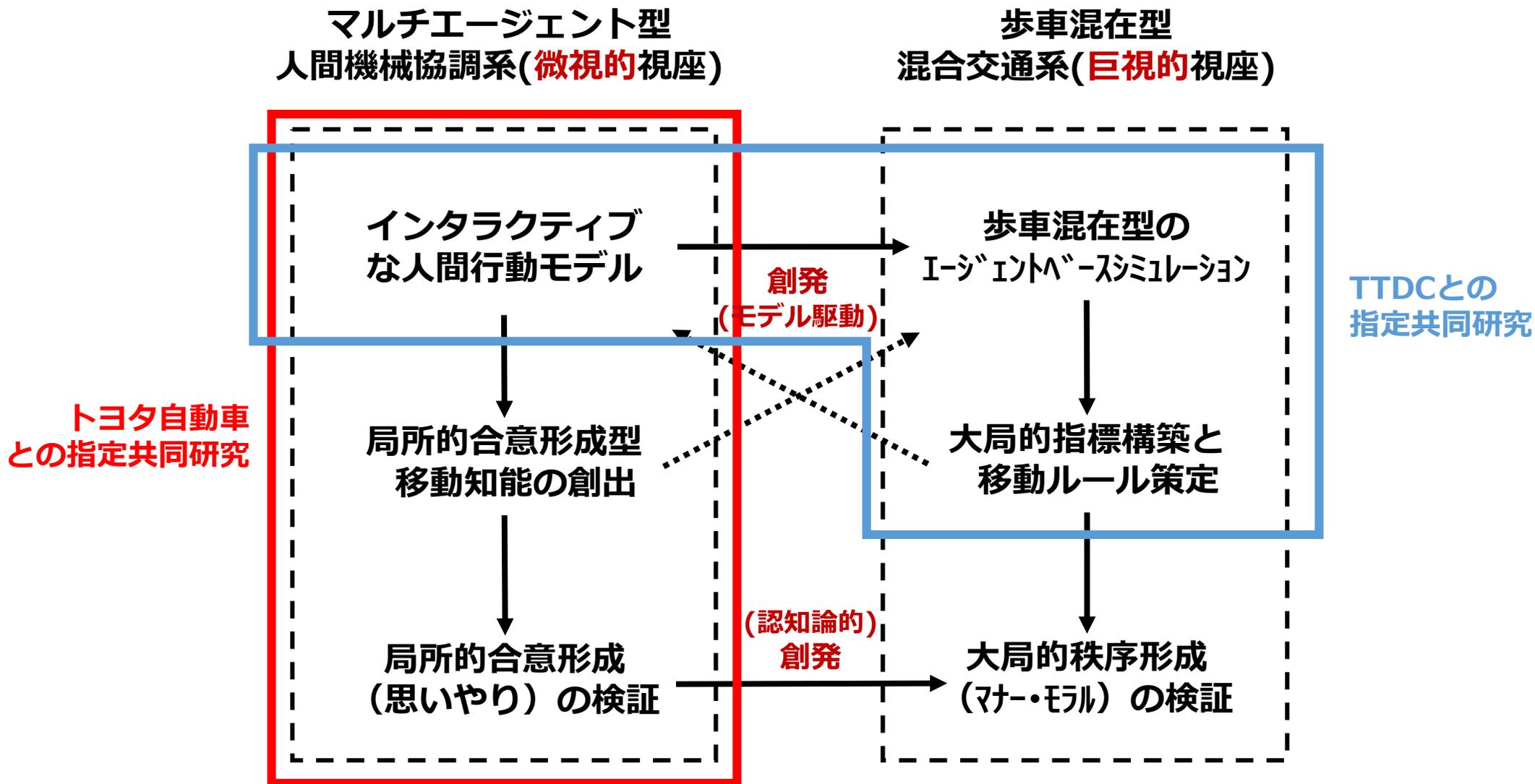
- 自動車等の移動体の知能化は今後加速する
- 様々な移動知能が混在する空間となる

移動空間のシミュレーションの必要性と難しさ

移動体の知能化技術や移動空間のレイアウト、移動ルール等の設計において、**実世界での実証のみでは設計プロセスの効率が著しく低下するため、シミュレーションでの検証が不可欠。重要な点は、判断を伴うエージェント間のインタラクションが再現できること。**

何が必要か（設計への活用の観点から）

1. 多様なエージェント間の（特に判断を伴う）**インタラクションのデータ計測**
2. データを活用した**モデル化**と規模の拡大に対するその**スケーラビリティ**
3. 人の多様な属性を扱えること（**モデルパラメータと属性の紐づけ**）
4. **マクロな視点**からも評価できること



参加・体験型歩車混在空間の構築

車両視点

30 kph

Driving Simulator

歩行者視点

Virtual Reality + Walking device

Pedestrian Simulator

自転車視点

Cyclist Simulator

交通シミュレータ

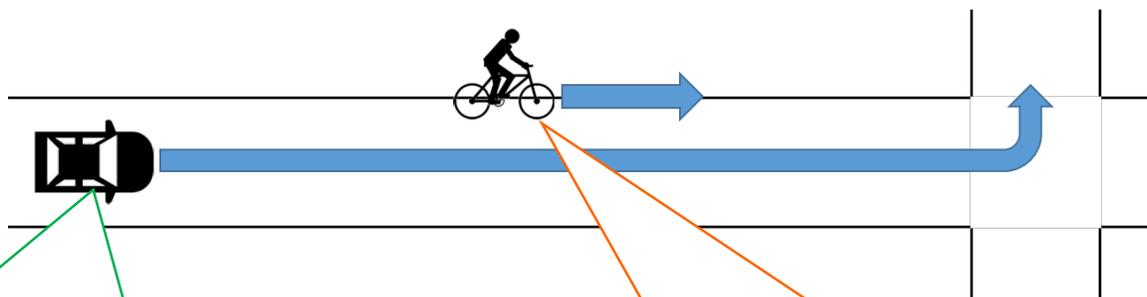
① 複数人同時に仮想移動空間を共有

② 多拠点接続 (実施中)

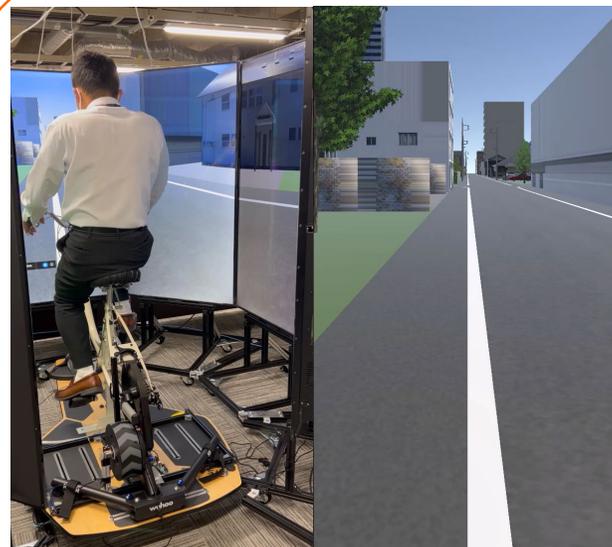
- 自動車、自転車、歩行者、PMを想定し、様々な仮想環境（移動空間）を再現
- VRUを含めた危険な状況を再現可能

- 物理データの取得が容易（センサ不要）
- 制御可能なモデルエージェントを多数混在させることで多様な状況を再現可能

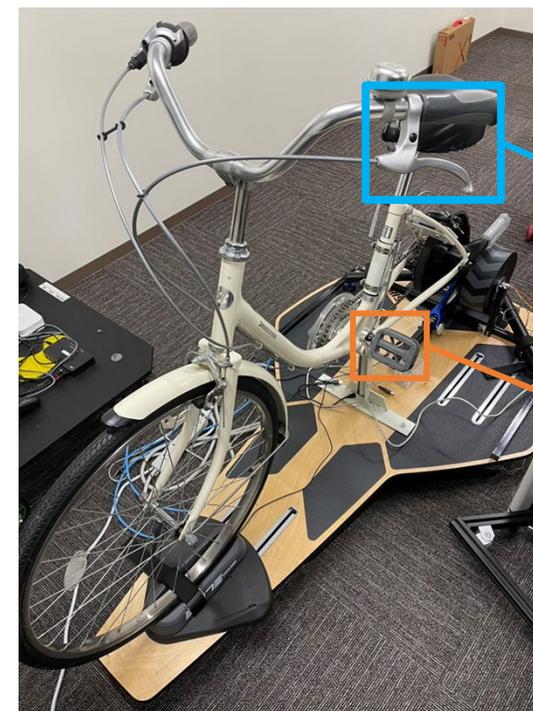
- 車対自転車の危険なインタラクションシーンを体験（データ取得）可能
DSとCSのマルチプレイヤー型シミュレーション環境を利用してデータを計測して、分析・モデル化
- 例として無信号交差点における左折巻き込みシーンを対象にサイクリストの判断・行動をモデル化



Driving simulator (DS)



Cycling simulator (CS)

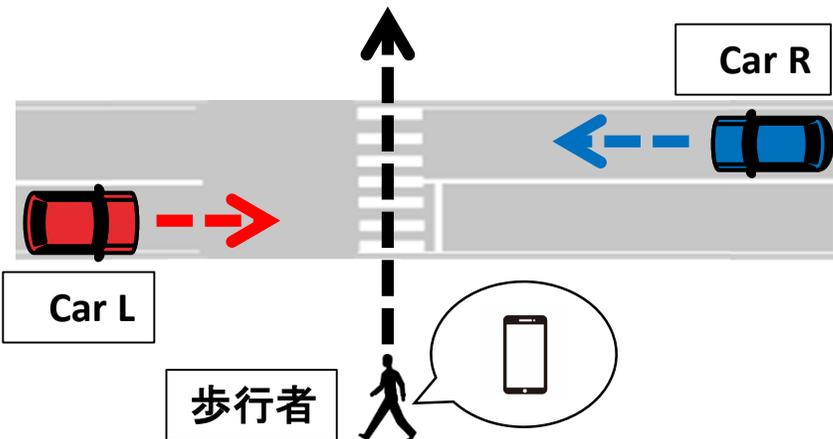


ブレーキ

ペダリング

サイクリストの行動意図を表す情報として
加減速情報ではなく、**ペダリングとブレーキ操作**
に着目してモデル化

スマホ操作タスクの影響下での歩行者挙動観測

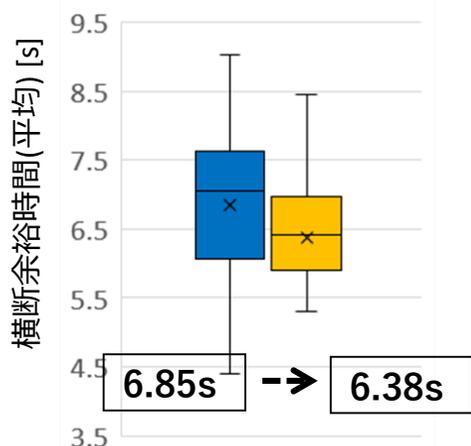


認知リソースが不足する
スマホ歩き
VR環境を用いてスマホ歩き
する歩行者の歩行の特徴を
観測, モデル化する.

SICE Annual Conference2023

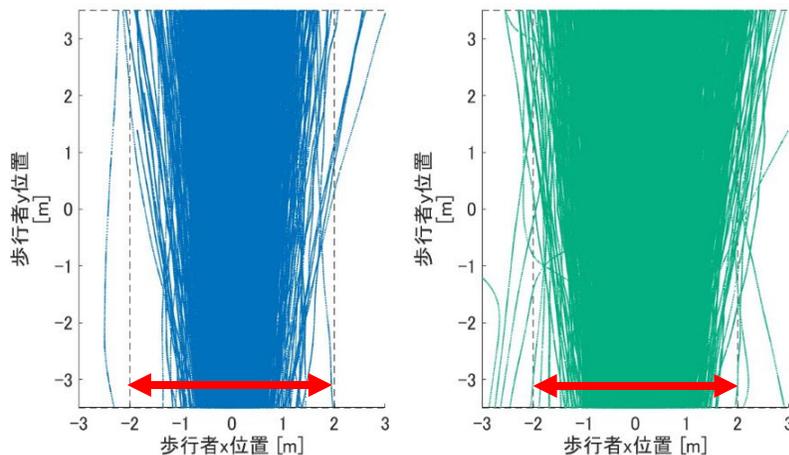


9割近い人の横断余裕時間が減少



※横断余裕時間: 歩行者が横断歩道を通してから車両が横断歩道を通り始めるまでの時間

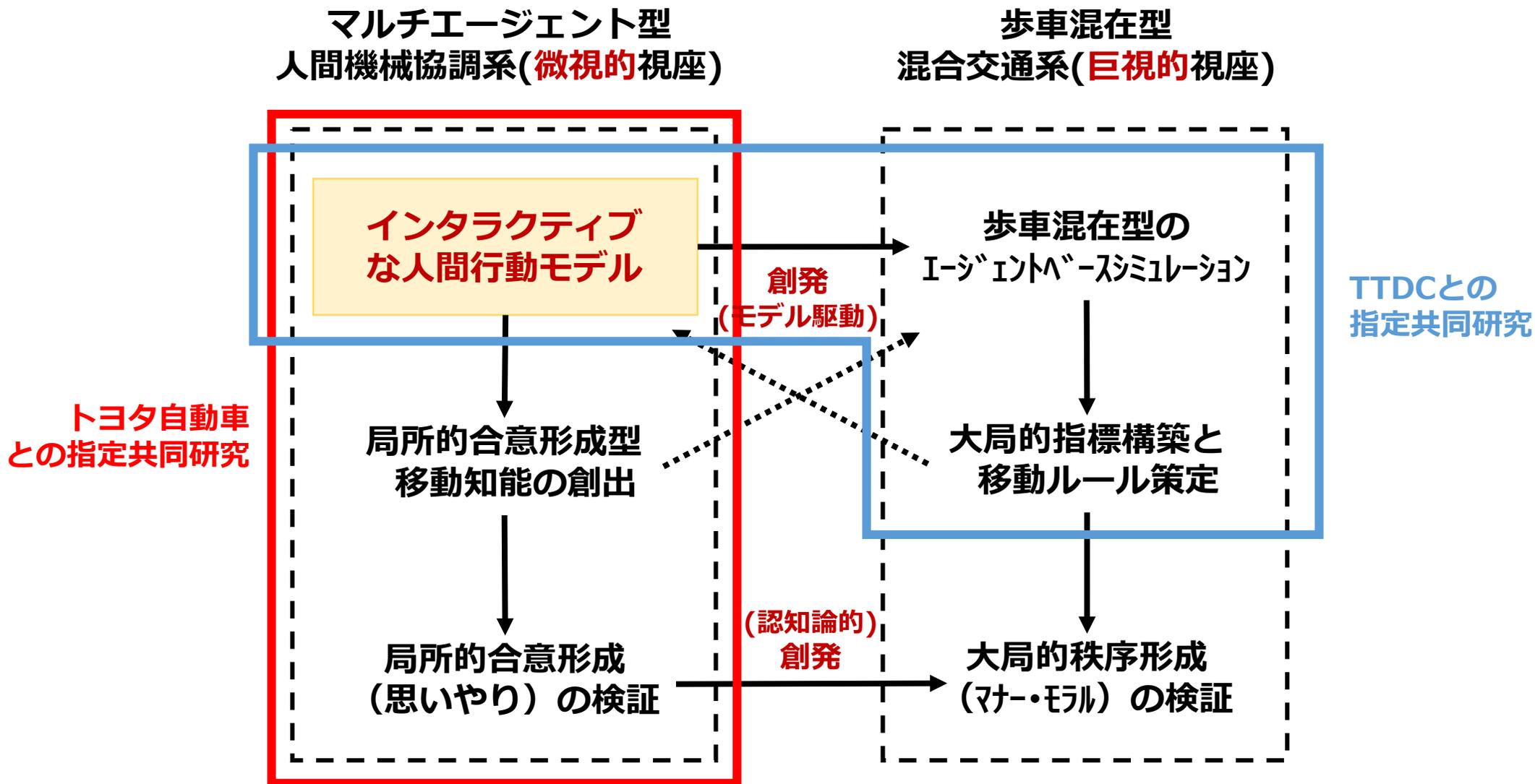
横断時の横方向のばらつきが増加

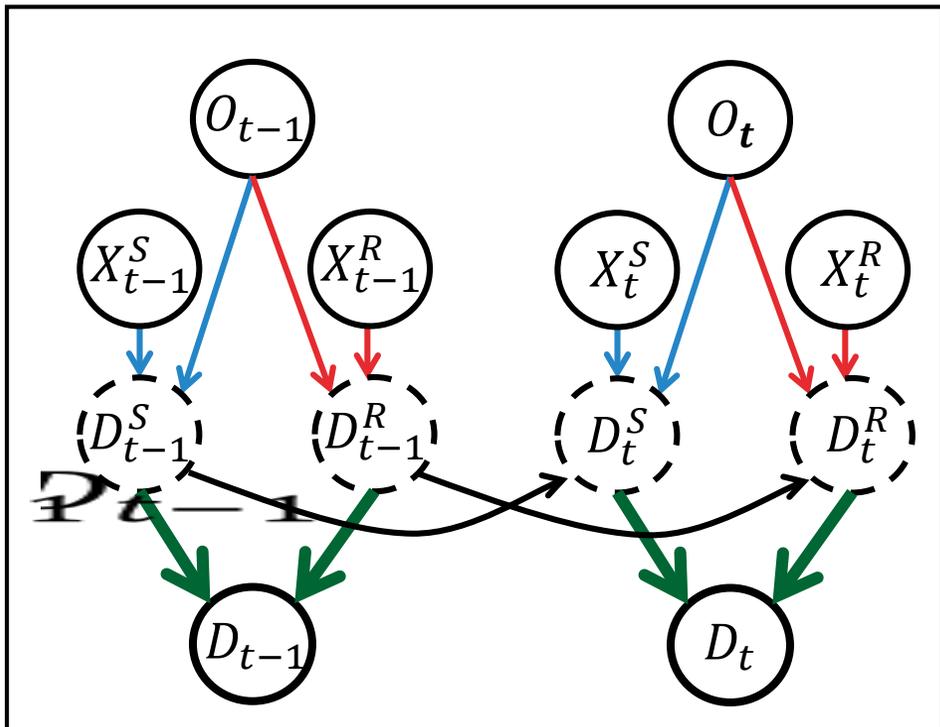


	スマホ無	スマホ有
歩・右車	0.642	< 0.671
歩・左車	0.660	< 0.712
歩・左右車	0.632	< 0.655

モデルで判断の曖昧さを測っても
判断が曖昧になっていることが確かめられた

説明変数操作 ⇒シミュレーション上で見落としによる事故を発生





時刻 \$t-1\$ (左) と時刻 \$t\$ (右) における判断を表すベイジアンネットワーク。直進車両 (S) に対する判断と右折車両 (R) に対する判断を統合して横断判断を行っている。**※拡張性の確保が可能**

歩行者/車両の各判断モデルから、判断の積極性(Aggressiveness)も計量可能に(観測データとも整合)



確率変数の定義

- ・2台の車両: \$S, R\$
- ・車両のラベル: \$i \in \{S, R\}\$
- ・注目車両: \$O_t \in \{0, S, R\}\$
- ・車両 \$i\$ との相対状態量: \$X_t^i\$
- ・車両 \$i\$ への個別の判断: \$D_t^i \in \{U, G, W\}\$
- ・最終判断: \$D_t \in \{U, G, W\}\$

観測データから推定される全体の各意図(G/W/U)の確率

$$P(D_t | X_{1:t}^S, X_{1:t}^R, O_{1:t}) = \sum_{D_t^S, D_t^R} P(D_t | D_t^S, D_t^R) P(D_t^S | X_{1:t}^S, O_{1:t}) P(D_t^R | X_{1:t}^R, O_{1:t})$$

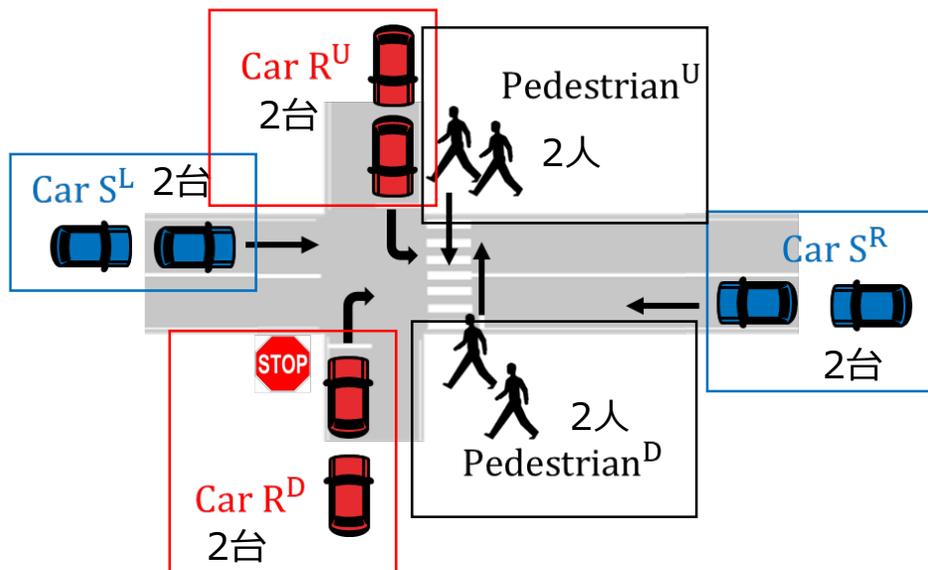
- 2台の車両に対する判断
- ① 個別判断の統合
 - ② 直進車に対する判断
 - ③ 右折車に対する判断



被験者	A	B	C	D	E	F	G	H
観測	Agg.	Agg.	Con.	Agg.	Con.	Con.	Agg.	Con.
モデル	Agg.	Agg.	Con.	Agg.	Con.	Agg.	Con.	Con.

※IEEE / SICE Int'l Symp. On System Integration Best paper award Finalistに選ばれる

スクーラブルな判断モデル

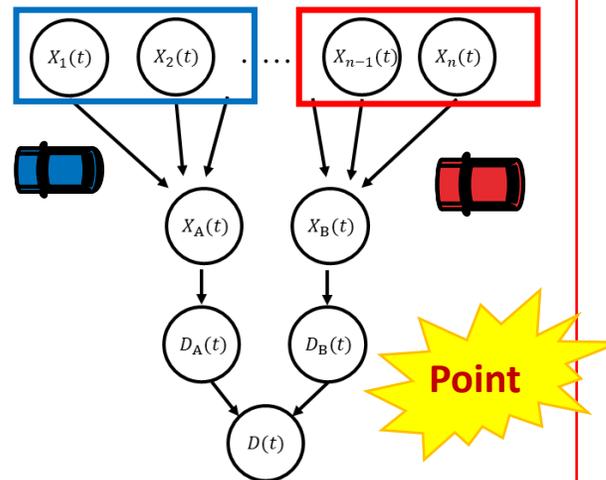


歩行者、右左車、直進車のグループを増やし、12者シミュレーションを実施

-  反対方向からの車両を新たに追加
-  反対方向からの歩行者を新たに追加
-  右折車と左折車は経路が交差するため、右折車より左折車に高い優先度を設定

判断対象の選択

TTCP (Time to Cross Point) により2者を選択



運動の決定

判断モデルに基づき交通参加者の運動を決定

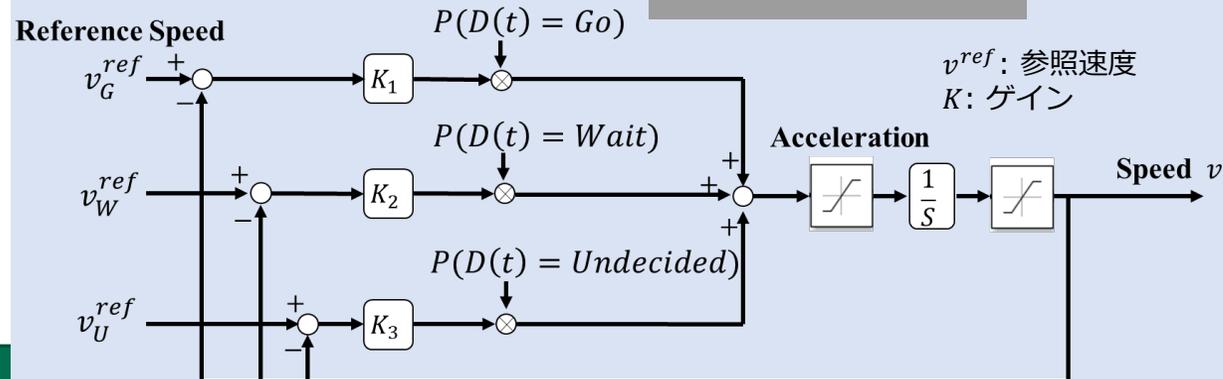
歩行者の運動モデル

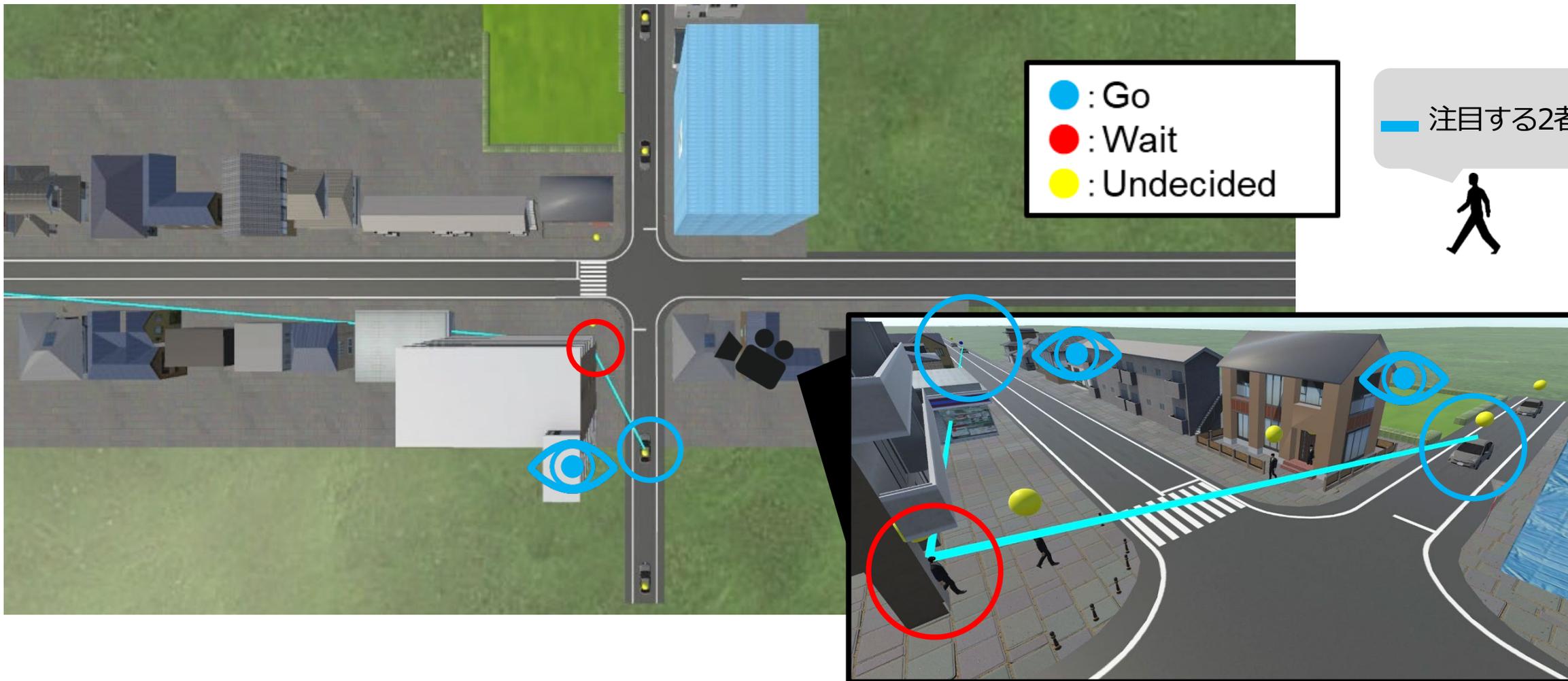
$$v^P(t) = \sum_{d \in \{G, W, U\}} P(D^P(t) | \phi(t), \eta_d^P) v_d^P$$

- v_G^P : Goと判断したときの歩行速度
- v_W^P : Waitと判断したときの歩行速度
- v_U^P : Undecidedと判断したときの歩行速度

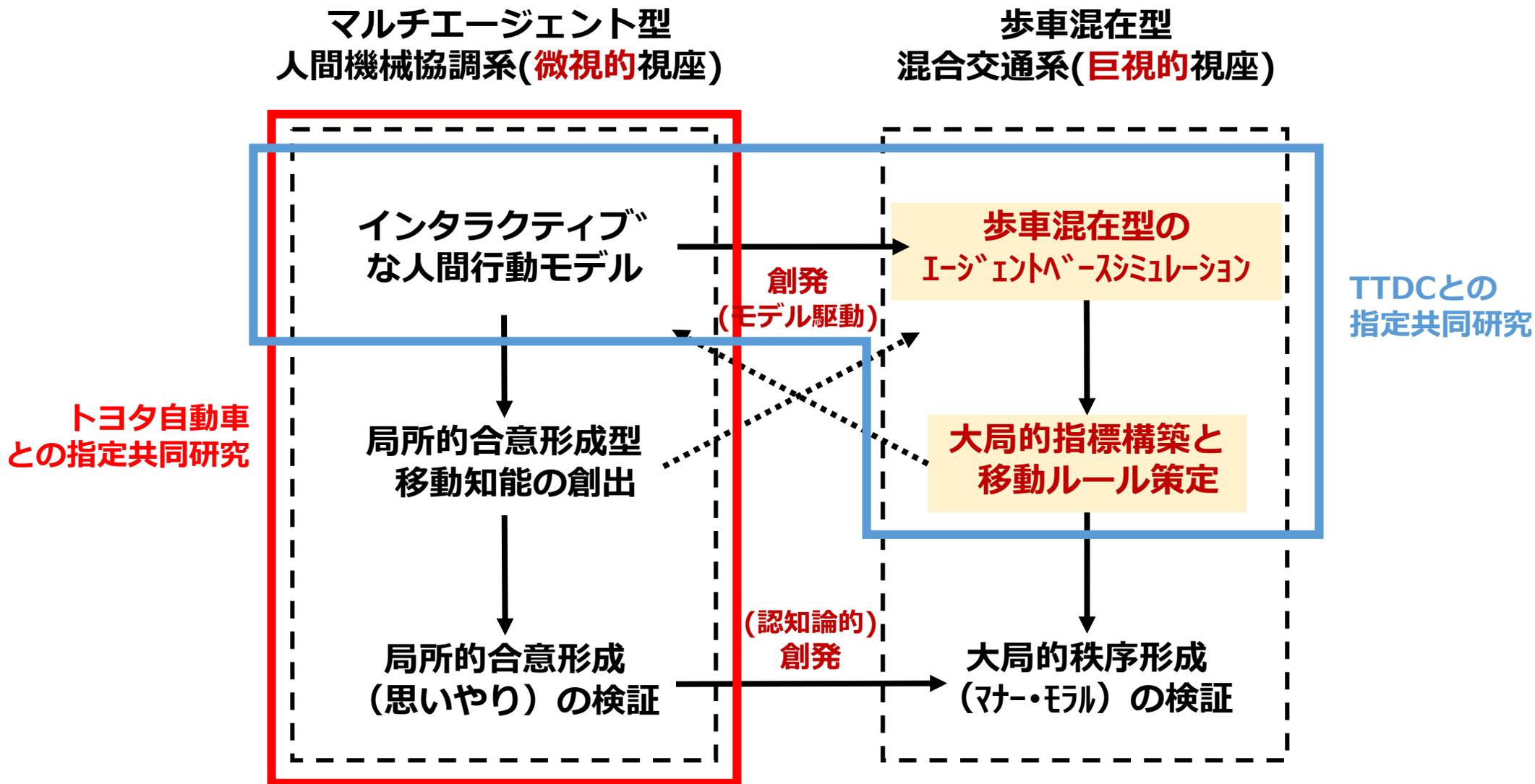
判断ごとの歩行速度の重み付き和として記述

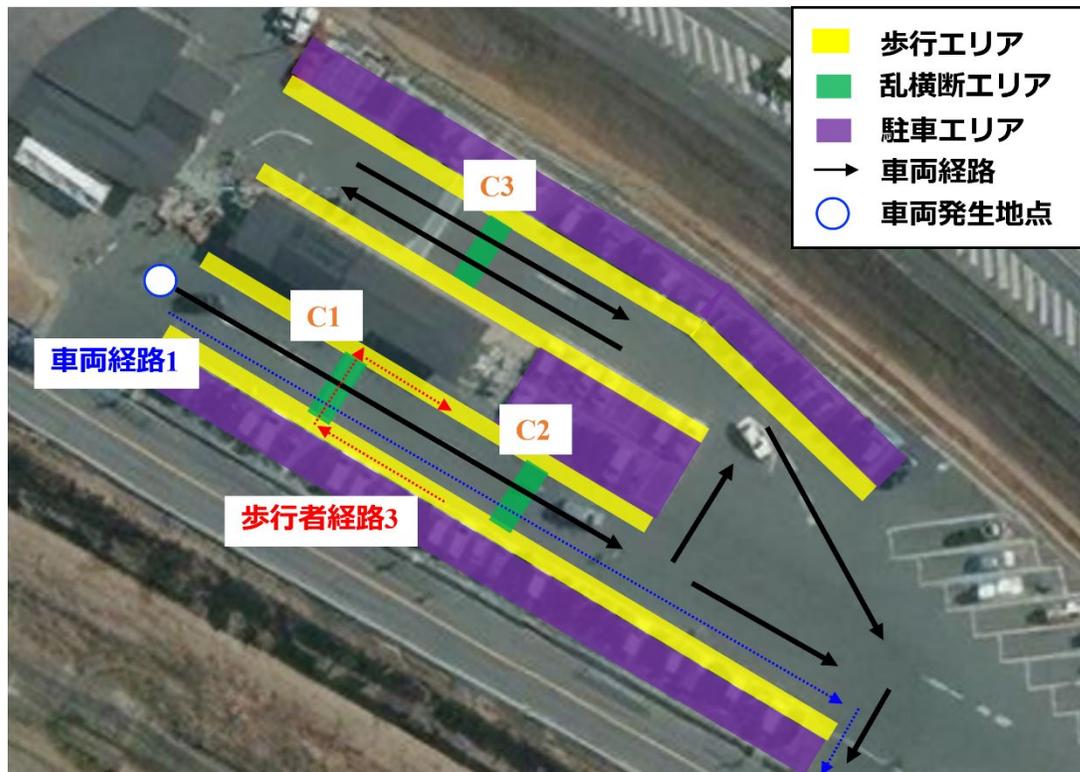
車両の運動モデル





判断対象の選択を行っても、ある程度リアルなシミュレーションの実施が可能





被験者	定数項	$x^P(t)$	$x^P(t)^2$	$v^P(t)$	$y^S(t)$	$y^S(t)^2$	$v^S(t)$	
直進車A (積極的)	η_G	-20.1	10.2	38.7	-1.1	27.5	-30.4	4.6
	η_W	-48.3	-12.7	46.9	-0.1	-11.1	1.6	1.9
直進車G (保守的)	η_G	-18.1	17.5	1.0	-3.1	40.0	7.5	-4.0
	η_W	7.8	47.6	-80.9	-1.8	-5.9	-41.7	-6.4
歩行者E (積極的)	η_G	-47.1	74.7	24.7	34.3	17.1	9.6	-3.9
	η_W	-14.0	-13.7	-52.0	19.3	11.9	-86.6	0.8
歩行者F (保守的)	η_G	-85.5	214.4	150.4	24.1	25.3	7.6	-5.2
	η_W	-26.8	80.7	52.1	12.0	6.6	-1.9	-2.0

具体的なシミュレーション条件

(シミュレーション毎に変更するパラメータ: 流量、個人特性割合)

□ 経路

- 歩行者: 各乱横断エリア(C1,C2,C3)で上下から横断する3経路を用意
- 車両: 5つの経路を用意し、内2つは地図上部の道路に侵入

□ 流量

- 歩行者: 各経路の始点から平均一人/15.0sで発生
- 車両: 道の駅侵入地点から一台/[3.0, 5.0, 7.5]sで発生

□ モデルについて

- 基本的に歩行者 / ドライバの判断モデルは乱横断エリア付近で使用
- 車両: 走行エリアに対して先頭車両で無ければACCで追従
(衝突が起これないよう緊急停止のロジックは実装)
- 歩行者: 経由地点を定め、SFMベースで動作

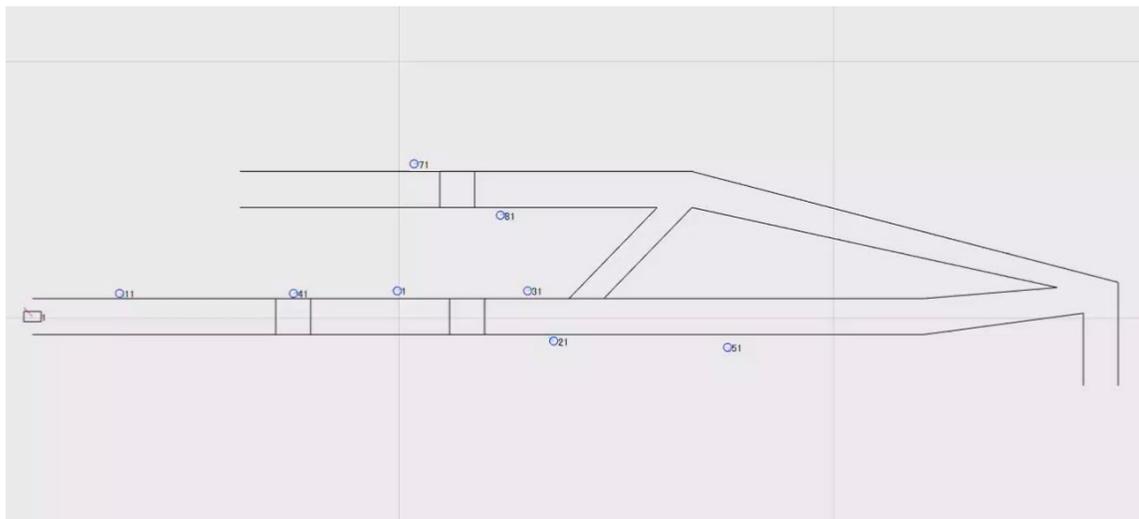
□ 個人特性

- 使用するロジスティック回帰係数は以下で固定
 - 歩行者: 積極的(E), 保守的(F)
 - 車両: 積極的(A), 保守的(G)
- Agg割合を[100%, 75%, 50%, 25%, 0%]で変更し、5×5=25通り

□ シミュレーション実行時間: 15min

シミュレーション条件①（車両がAggressive）

- ・流量：歩行者→平均15.0s/
人 車両→3.0s/台
- ・個人特性割合：歩行者→ Con100%, Agg0%
車両→ Con0%, Agg100%

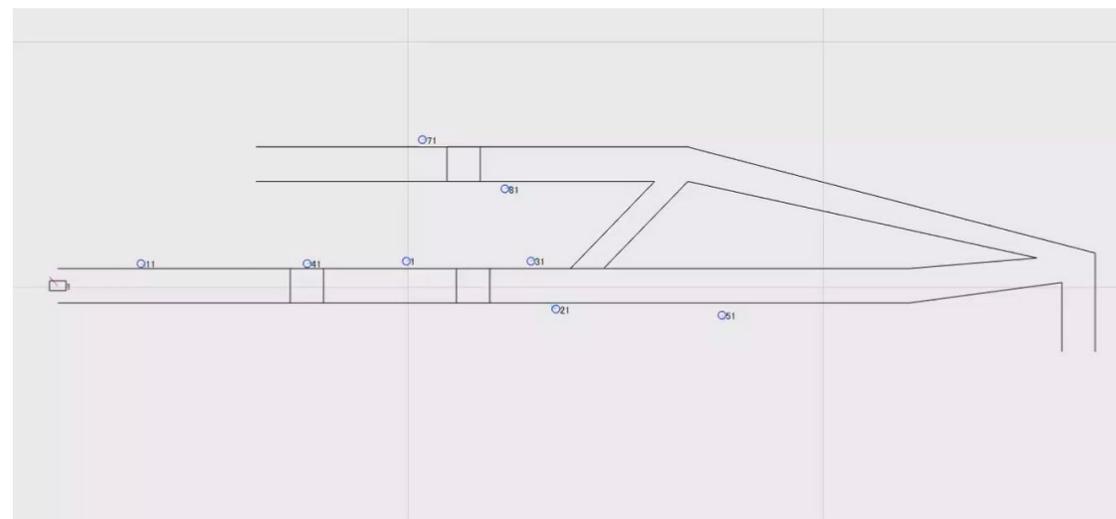


Aggな車両が連続的に通過することで、乱横断エリア1付近で**歩行者の滞留**が発生

（ただし、車両流量が5.0sの際には隙間で渡れるため滞留は発生しなかった。かなりの混雑した状況でないと歩行者側に影響が無い）

シミュレーション条件②（車両がConservative）

- ・流量：歩行者→平均15.0s/
人 車両→3.0s/台
- ・個人特性割合：歩行者→ Con100%, Agg0%
車両→ Con100%, Agg0%



Conな車両が歩行者を常に待つため、乱横断エリア付近で**車両の滞留**が発生

シミュレーション条件

・流量：（歩行者：平均15.0s/人, 車両：5.0s/台）

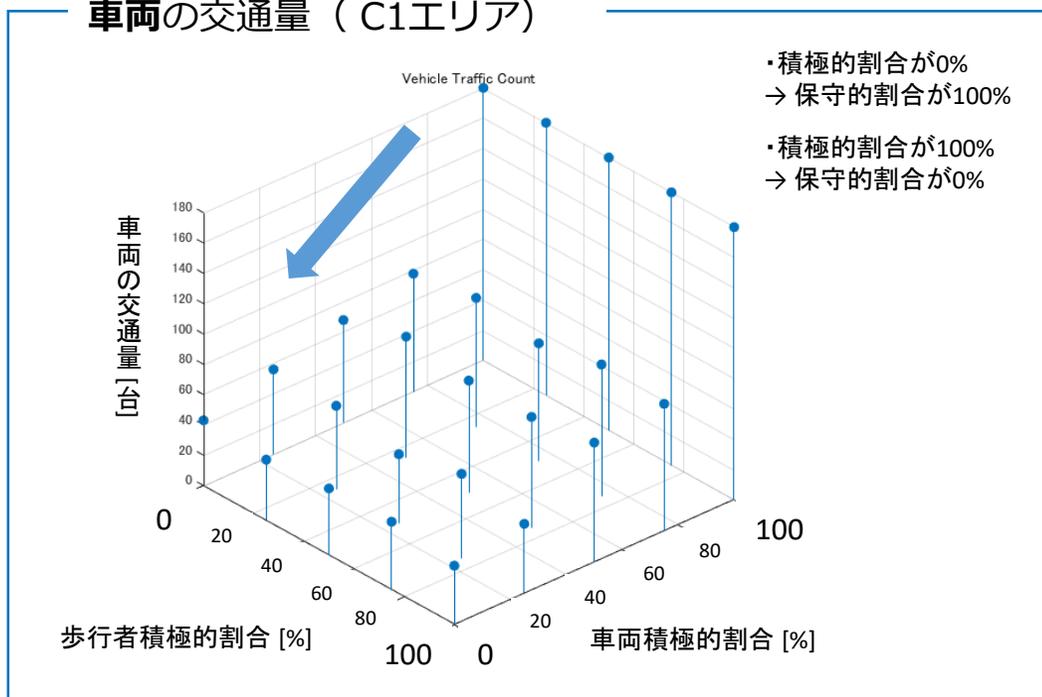
・シミュレーション時間：15min×25

（各回で車両・歩行者の個人特性割合を変更）

交通量

定義：各乱横断エリアを通過した歩行者・車両の数

車両の交通量（C1エリア）



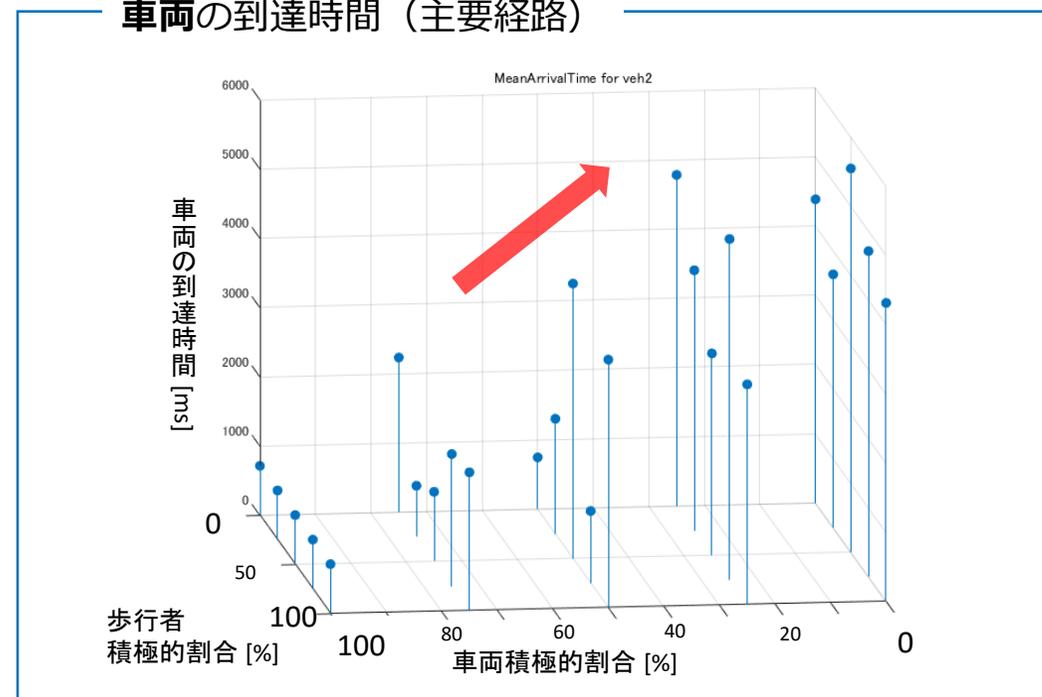
▶ 車両が**保守的**になるほど、乱横断エリアで車両がせき止められ、**交通量が減少**する

到達時間

定義：各歩行者・車両が経路ゴール到達に要する時間

（なお、各歩行者は1回・車両は少なくとも2回は乱横断エリアを通過する）

車両の到達時間（主要経路）



▶ 車両が**保守的**になるほど、乱横断エリアで待つ判断をし、**到達時間が長くなる**

横断余裕時間(PET):

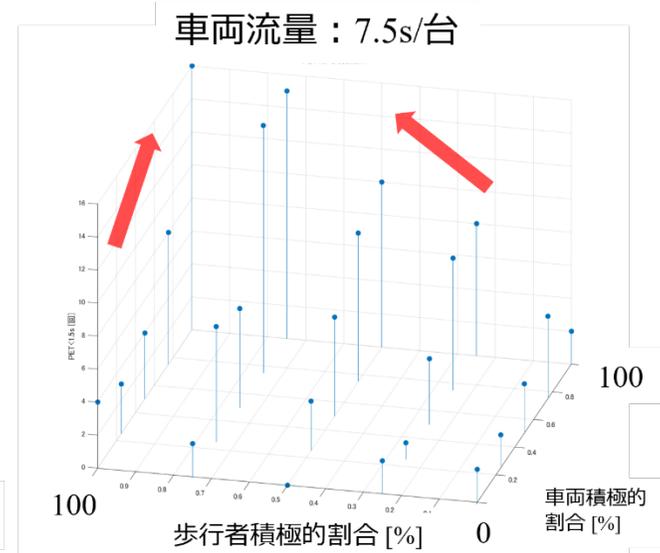
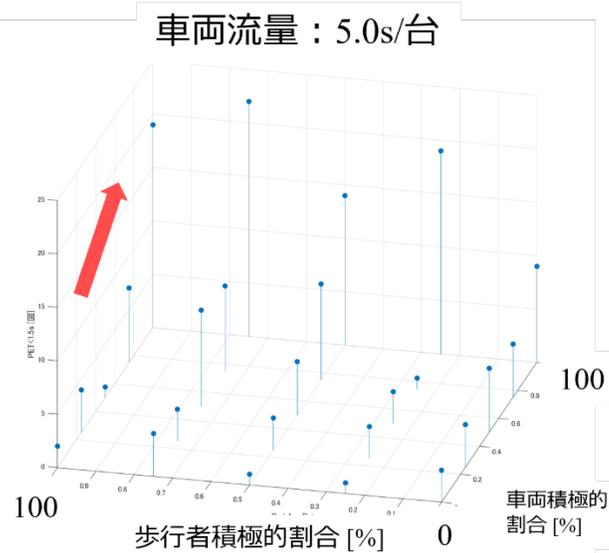
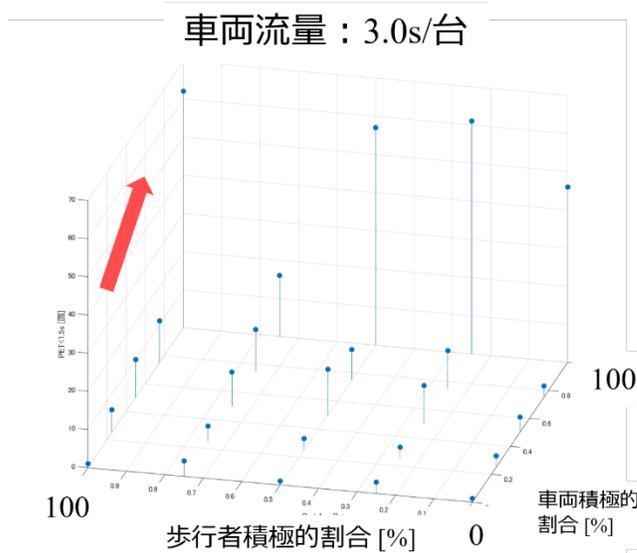
1. 歩行者がCross-pointを通過

2. 車両がCross-pointを通過

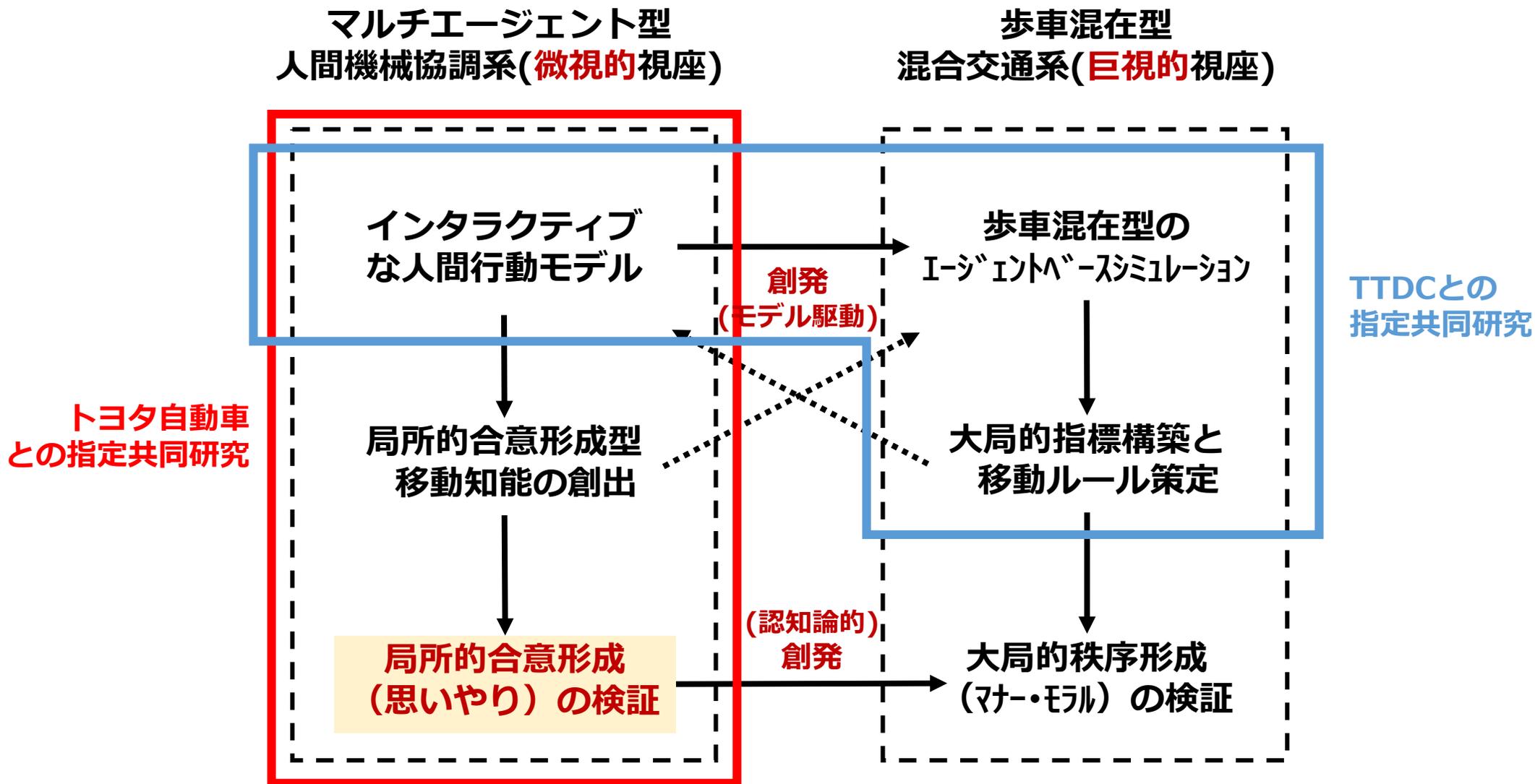


横断余裕時間：歩行者がCross-pointを通過後、何秒後に車両が同地点を通過するか
→ 値が小さいほど危険な横断

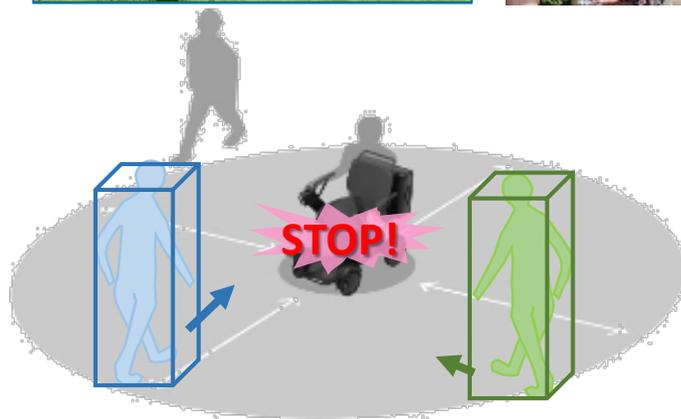
危険試行数：PET<1.5 (C1エリア)



・ 車両/歩行者のAgg割合が高くなるほど、横断余裕時間が短い危険試行の数が多くなる



歩車共存空間で人と共生する「思いやり」のある小型（低速）モビリティ (パーソナルモビリティ：PM)



これまでのPM



目指すPM

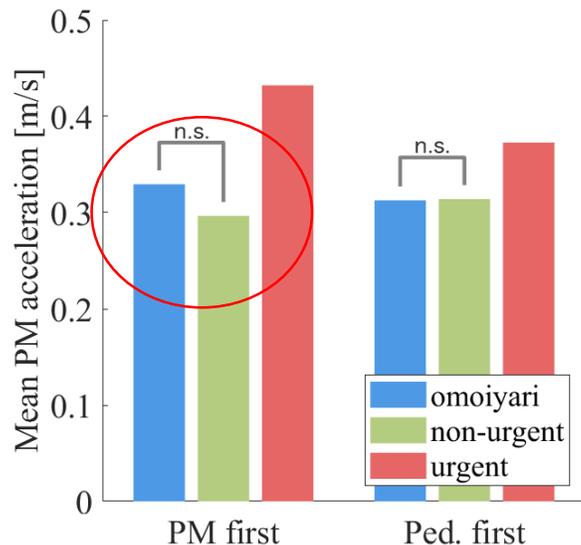
歩行者2名とPM1台が混在するインタラクション実験



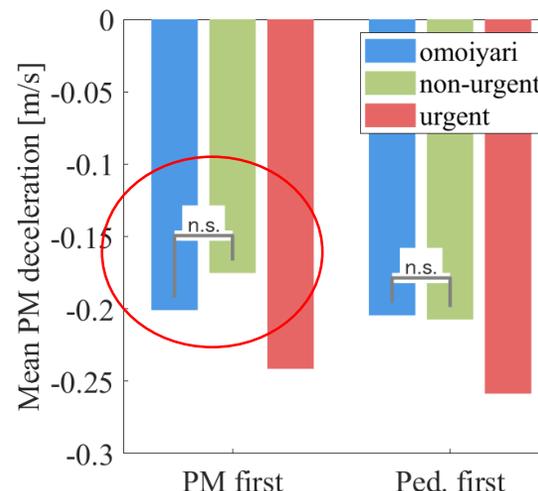
思いやりのある運転とは？

- PM操縦者に3条件を課す
- 他の歩行者に思いやりを持って走行してください
 - 時間的余裕が十分にある前提で走行してください
 - 急いでいる前提で走行してください

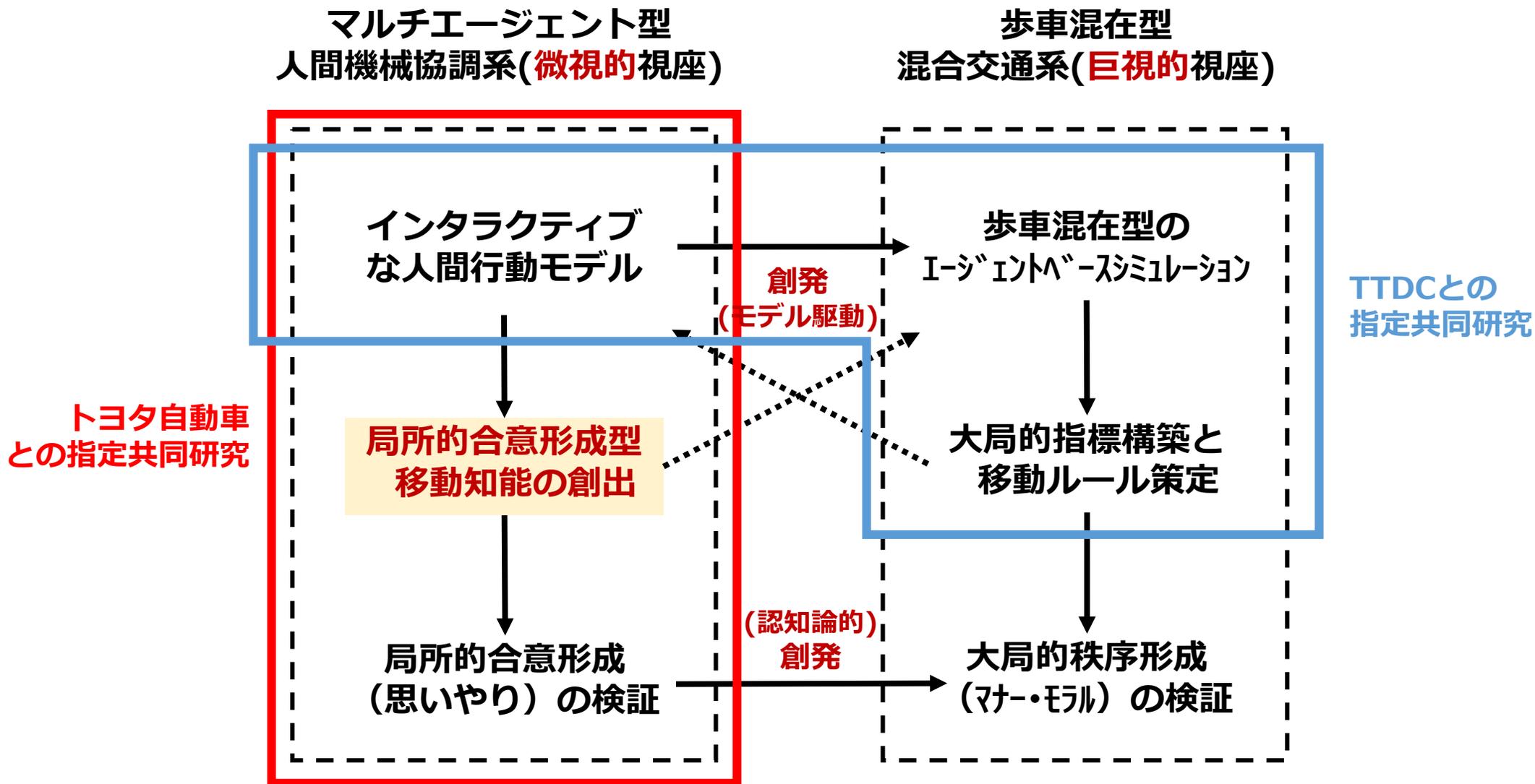
PMの平均の加速度



PMの平均の減速度



「思いやりを持った運転」においては、**インタラクション時に積極的に加減速を行う**
 ➔ 相手に自身の意思を明確に伝えようとしていると思われる



自車両：小型モビリティ
 周辺他者：歩行者
 明示的な通信は想定しない

モデル予測制御による実現

周辺他者の判断
 モデルを考慮

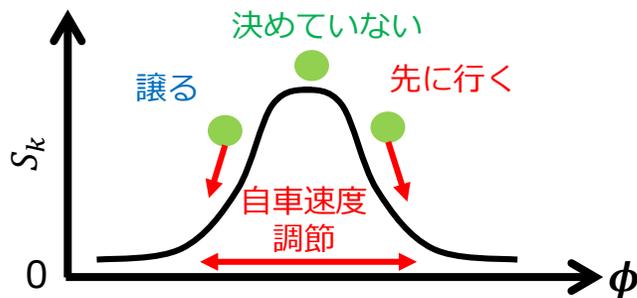
周辺歩行者が判断に迷う状況に
 陥らないよう自車速度を制御する



周辺歩行者への配慮

周辺歩行者の判断エントロピー

$$S_k = - \sum_{s=1}^3 P(X_k = s | \phi_k) \times \log_2 P(X_k = s | \phi_k)$$



Given $x(0|t) = x(t), L_w,$
 Find: $u^M(k|t) (k \in \{1, 2, \dots, K\})$
 which minimize:

$$J(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N S_i(k|t) + J_*$$

Subject to:
 各種制約条件
 自車両モデル
 周辺歩行者の判断・運動モデル

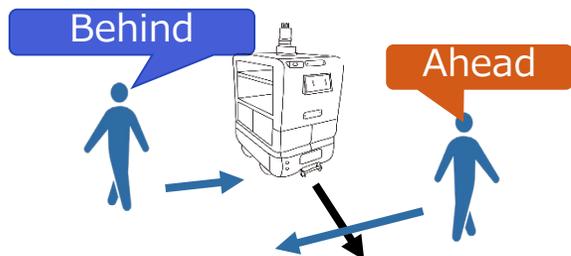


計測自動制御学会論文賞
 (2023)

1. 周辺歩行者の判断・運動モデルを同定
2. 周辺歩行者の判断エントロピーを実時間で最小化するよう車速を制御

歩行者が複数の場合はエントロピーの和を考慮

- 他者の「迷い」を低減する行動計画の効果
 - 判断エントロピー項の有無による違いの比較



判断エントロピー低減制御：
相手が譲る／譲らないの判断の
迷いを定量化，これを低減する
コスト関数を考慮する



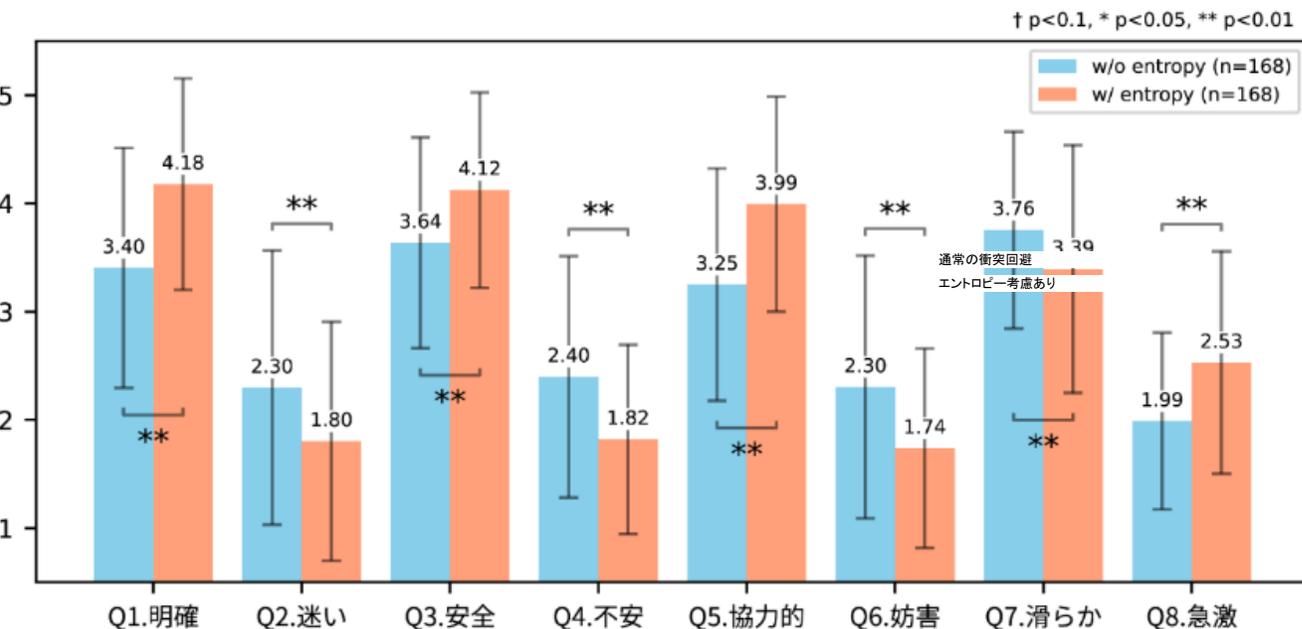
w/o entropy

w/ entropy
より手前で明確に停止



w/o entropy

w/ entropy
邪魔しないよう迅速に通過



提案手法により **迷いを低減** し，挙動の滑らかさは**減少**

メリハリある動きで**明確性**・**安全性**・**協調性**が向上

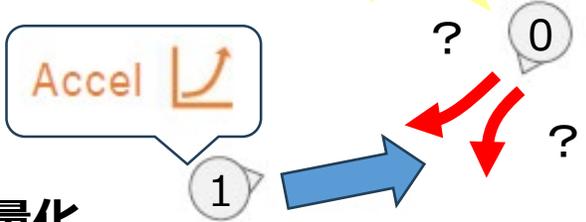
行動によるナッジの可能性の探求：

モビリティが他者に与える影響の定量化

可誘導性指標を提案

最優秀論文賞
受賞※1

自分(①)が
相手(②)に
与える影響を
制御論的に定量化



入力と、状態や確率の変化の比から導出可能

Step1: 周囲の人の応答モデルの推定

歩行観測データから先行/後行の判断とその時の動作をモデル化

B: Behind, A: Ahead
U: Undecided



歩行観測実験 (2~5人が歩行)

判断モデル(soft max関数)

$$P(D(t) = s) = \begin{cases} \frac{\exp(\eta_s \phi(t))}{1 + \sum_{r \in \{B, A\}} \exp(\eta_r \phi(t))} & \text{if } s = B, A \\ 1 - \sum_{r \in \{B, A\}} P(D(t) = r) & \text{if } s = U \end{cases}$$

$D_t \in \{B, A, U\}$: 歩行者の判断
 $P(D_t = s)$: 判断 "s" の予測確率
 $\phi(t)$: 説明変数
 η : 係数ベクトル

動作モデル (状態方程式)

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ v_0 \end{bmatrix}_{k+1} \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cos \varphi \\ 0 & 1 & \sin \varphi \\ 0 & 0 & 1 - \alpha \Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ v_0 \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta v_0(v_1) \end{bmatrix}_k$$

A_k B_k

$$\Delta v_0(v_1) = \alpha \Delta t \begin{bmatrix} V_{\text{Behind}}^{\text{ref}} & V_{\text{Ahead}}^{\text{ref}} & V_{\text{Undecided}}^{\text{ref}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P(D(t) = B) \\ P(D(t) = A) \\ P(D(t) = U) \end{bmatrix}$$

各判断の目標歩行速度の期待値

※1 : 計測自動制御学会システム情報部門大会 Best paper award 受賞

Step2: 周囲の人の応答モデルから 可誘導性を計算

指標 1. 他者の状態の可制御性

(相手の位置・速度の動かしやすさ)

可制御性グラミアンとその大きさ

$$W_C^L(t) = \sum_{k=0}^{L-1} A_k B_k B_k^T (A_k^T)$$

$$J_{cg}^{1,0}(t) = \text{tr}(W_C^L(t))$$

A_k, B_k : 前頁の状態方程式より

指標 2. 入力に対する他者の状態の感度

(自分の行動変化により相手の判断を
どのようにどのくらい変化させられるか)

各意図の判断確率の勾配(ヤコビアン)

$$J_{sens}^{1,0,s}(t) = \frac{\partial P(D(t) = s)}{\partial v_1},$$

$\forall s = \{A, B, U\}$

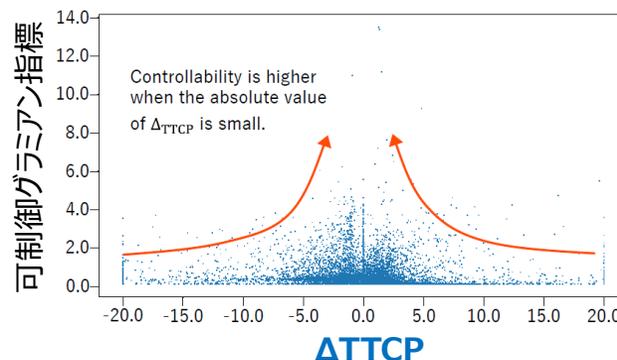
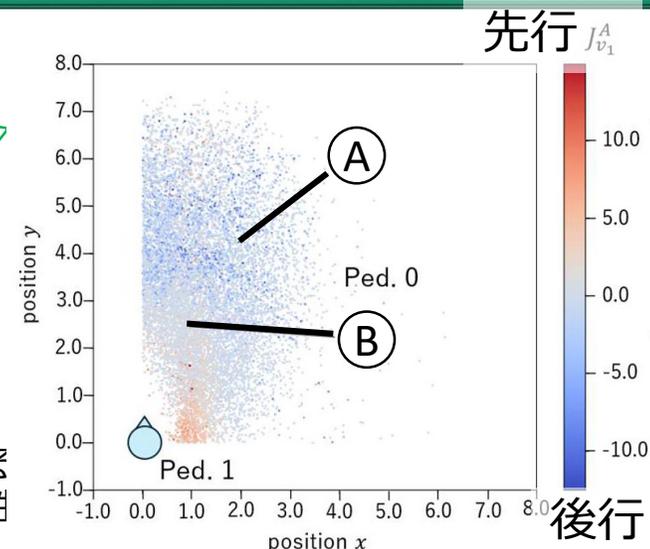
Aのエリア(負)

Ped1が加速をすると
Ped0を「後行」にしやすくなる

Bのエリア(絶対値が小)

Ped1が加減速を調整しても
Ped0の「先行」判断に影響が小さい

可制御グラミアンによる
「Ped. 0が先行」判断に対する可誘導性



可誘導性が大きい所では
ΔTTCP(交差予測地点までの所要時間
の差)が**小さい**傾向
(**インタラクションの度合いが大きい状況**
で可誘導性も大きい傾向にある)

提案手法により **相手への影響度が大きい状況を推定可能** に,

制御戦略の選択や誘導タイミングの決定に用いられるのでは

投影のみ

1. 仮想空間でのインタラクション実験をもっと大規模に手軽に行えるようにしたい



2. インタラクションメカニズムの解明による仮想世界でのシミュレーションの精度向上
3. シミュレーションを活用した各種アルゴリズムの設計・評価
4. 実世界からのデータ取得・シミュレーションによる将来予測・実世界へのフィードバックのループを回す ➡ デジタルツイン

Q&A