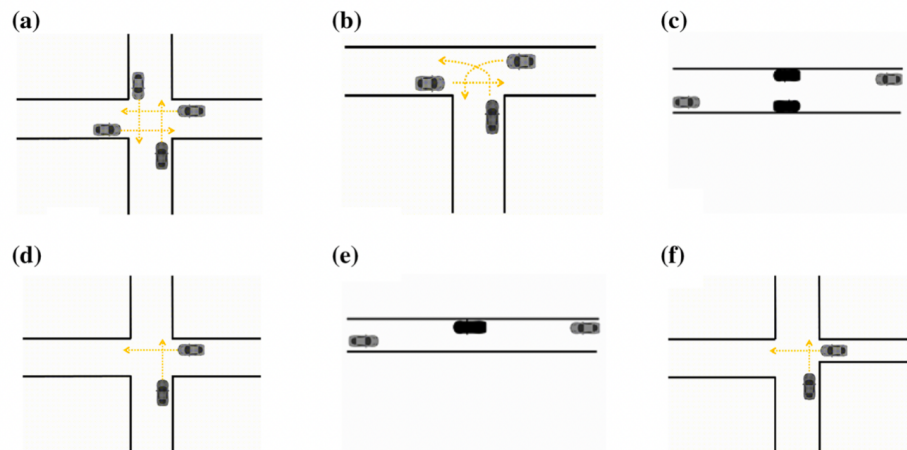


Imbsweiler, J., Stoll, T., Ruesch, M. *et al.* Insight into cooperation processes for traffic scenarios: modelling with naturalistic decision making. *Cogn Tech Work* **20**, 621–635 (2018).
<https://doi.org/10.1007/s10111-018-0518-7>

1 Introduction

- 交通交差点の事故リスクは高い。2014 年、ヨーロッパにおける道路交通死亡事故の約 24%がジャンクション事故によるものであった (European Commission 2016)
 - 2 人以上のドライバーが誰に道を譲るべきかについて迷っている交差点で特に多く発生している
 - ドライバーが互いにコミュニケーションを取ったり協力したりしなければならないため、解決が困難だ
- 自動車両ガイダンスの導入により、人間の道路利用者が他の道路利用者だけでなく、自律システムとも協力しなければならないという課題に直面した (Färber 2015)
 - そのため、自動車両ガイダンスは人間の協力信号を模倣できる必要がある
- この研究では、自然主義的意思決定 (NDM) を用いて、協力的な状況における基礎的な意思決定プロセスを調査する
- この研究の目的は、ドイツ道路交通規則によると、状況が規制されていないため、協力的な行動が必要な状況を調査することである (Fig. 1)

Fig. 1 The six traffic situations that were subject of the questionnaire. Starting from the left: **a** X-intersection scenario, **b** T-intersection scenario, **c** equal narrow passage, **d** priority to the right I, **e** non equal narrow passage and **f** priority to the right II

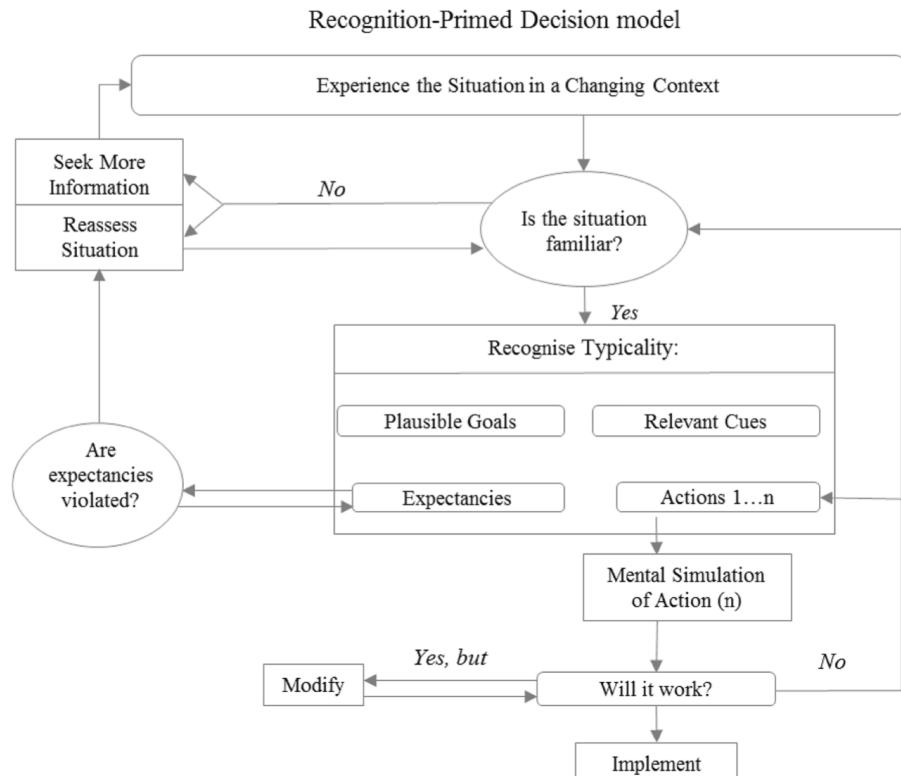


- 道路利用者が交渉しなければならない
- Bauer ら (1980) は、Schroder ら (1975) による協力が成功するための以下 4 つの基本条件を、道路交通に関連付けるように脚色した

- さまざまなサインを理解し解釈するための十分なタスク固有のスキルと知識
- 関心とモチベーションのレベルアップ
- 人と接する際の安全性：道路利用者は他の道路利用者の意図する行動を予測できなければならない
- 複雑な情報処理をこなす能力
- Vanderhaegen ら（2006）は、両エージェントが意図を伝える際に共通の参照枠（COFOR）を使用する場合にのみ、協力が成功すると指摘している
- Hoc (2001)に従い、著者らは「2つのエージェントが2つの条件を満たす場合、協力的な状況にある」と定義する
 - それぞれが目標、資源、手順などに向かって努力する
 - それぞれが、個々の活動や共通のタスクが存在する場合、それを促進するために干渉を管理しようとする
- その他、協力を表現するアプローチとして、障壁の除去や不利な条件の受容を目的としたものがある
 - しかし、特定のシナリオにのみ適用され、意思決定の背後にある認知的なプロセスを記述することができないという欠点がある
- 協力するためには、コミュニケーションは必要で、implicit 行動と explicit 行動両方は区別される（Färber 2015; De Ceunynck et al.2013; Risser 1985）
 - Implicit: ブレーキや加速の速度などの運転行動
 - Explicit: その意味がすぐに推測できる信号
- De Ceunynck ら（2013）は、コミュニケーションを、ヘッドライト、方向指示器、ジェスチャーの使用として理解している
- Imbsweiler ら（2017）は、単純な状況では道路利用者は先に走ることを好むが、より複雑な状況では道を譲ることを好むと結論づけた
 - しかし、協力プロセスの基本的なパターンは分析することができなかった
- 認識優先決定（RPD）モデル（Fig. 2）は、NDM モデルの一例である
 - このモデルは、人々が意思決定において、いくつかの代替的な行動の選択肢の利点と欠点を比較検討することなく、経験を利用することに焦点を当てている（Klein, 2009）
- RPD の以下 4 つの特性は、協力的あるいは相互作用的な交差点シナリオにおける意思決定プロセスに転用することができる
 - 問題解決の目標（システムによる）
 - 関連する手がかり
 - 期待
 - 行動

- 各ドライバーは目標、期待、合図に応じて、メンタルシミュレーションで特定の行動を選択し、判断・実行する
- Björklund と Åberg (2005)は、アンケート調査に基づいて、4つの異なるタイプのドライバーを特定することができた
 - 優先横断でほとんど譲らない攻撃的なドライバー
 - 道路設計に依存するドライバー
 - 形式的な規則に依存するドライバー
 - 非常に慎重に運転し頻繁に譲るドライバー
- しかし、他の道路利用者の期待や、回答者の Explicit 行動、回答者の目標は記録されていない
- 著者らは Klein (2009) の RPD モデルと Björklund と Åberg (2005) の方法を組み合わせて、アンケートを作成した
- RPD モデルと協力の研究分野の知見から、以下の仮説を導き出すことができる
 - 仮説 1：選択された行動 (actions) が運転の順番 (goal) を予測する
 - 仮説 2：選択された行動 (actions) と期待される行動 (expectancies) の間に相関があることを確認することが期待される
 - 仮説 3：交差点タイプ (cue) が運転順序 (goal) を予測する
 - 仮説 4：運転に対する自信 (mental stimulation) の違いにより、交差点タイプ (cue) に違いがある

Fig.2 Recognition-primed decision model by Klein (2008)



2 Method

- アンケートの目的は、認識モジュール (Fig. 2) の部品を変数に仕分けすることで、方法論的な移行は、論文中のデータ分析部分で紹介されている

2.1 Respondents

- N = 597 人の回答者のうち、全体で N = 281 人 (女性=88 人、男性=183 人) がアンケートに完全回答した
 - ドイツ人回答者のみを対象とした
 - 平均年齢 26.04 (SD = 8.4)
 - 運転免許の保有年数 (全体 M = 2.56、SD = 0.723)
 - 2 年未満 : 3.2%
 - 2 年以上 6 年未満 : 47.5%
 - 7 年以上 15 年未満 : 38.5%
 - 15 年以上 : 10.4%
 - 回答者の 1 週間の運転距離: 50km~200km
- 回答者は平均して、自分の運転スタイルを穏やかでもなく (= 1) 、スポーティでもなく (= 3) 、M = 1.96 (SD = 0.61) (Pion et al., 2012)
- 同年代の他のドライバーと比較すると、自分の運転技術は同等であると評価している M = 2.28 (SD = 0.63)

2.2 Procedures

- アンケートは、ソーシャルメディアと Institute of Human and Industrial Engineering (ifab) の参加者データベースで配信されたオンラインアンケートをもとに作成された
- 6 つの異なる交通状況が選ばれた (Fig. 1)
 - 状況(a)、(b)、(c) : ドイツの交通法では明確な指示がなく、道路利用者は交渉しなければならない
 - 状況(e) : クロスチェックとして使用した非等幅通路
 - 状況(d)、(f) : Björklund と Åberg の研究を検証するため (交差する道路が自分の道路より狭い場合、道路利用者はより高い譲る傾向がある)
- それぞれの状況について、GIF アニメーションを提示した
 - 車は同時に到着し、同じ一定の速度 (30km/h) で移動する
 - 交差点に到着した後、車の運転方向を示す矢印が表示された
 - Ego-Car は緑色で表示された
- 第一部のアンケートには、5 つの質問が含まれている (Fig. 4)

- その後、再びすべての状況を回答者に見せて、それぞれの状況において、どちらの車が道を譲っていたかを回答させた
- 運転に対する態度を問う質問ブロックが設置された (Benmimoun et al., 2004)
 - 1 = 「全くそう思わない」 から 5 = 「全くそう思う」 の 5 段階尺度
- 4 つの質問を、カテゴリごとに 1 問ずつ決定した
 - 利他的 (altruistic) : 他の方がより速く走れるなら、道路利用者は優先権を放棄すべき
 - システム的 (systemic) : 交通の流れをよくするためなら、道路利用者は他人を優先すべき
 - エゴイステック (egoistic) : 道路利用者は自分の目標に早く到達するために、自分の優先順位を主張する
 - 競争的 (competing) : 自分の運転は自分でするものだから、優先順位をつける

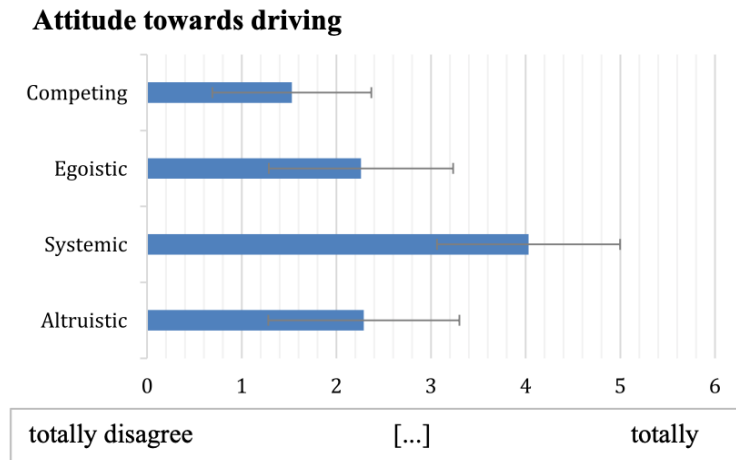


Fig. 3 Attitude towards driving according to Benmimoun et al. (2004): mean and standard error

- 年齢、国籍、性別、運転免許の有無、運転スタイルなどのデモグラフィックデータを収集した

2.3 Data-analysis

- 交通状況と RPD モデルとの対応、および関連する変数への転換
 - 選択した行動 → RPD-model の行動 (actions)
 - 目標 (goal) → 運転の順番
 - 認識モジュールの予想 (expectation) → 他の道路利用者の予想行動
 - 交差点タイプ → 関連する合図 (relevant cues)
- 統計ソフトウェア R (version number 3.4.1) を使用した
 - 仮説 1 : カテゴリ予測変数のロジスティック回帰を使用した

- 仮説 2 :
 - Bravais-Pearson の相関係数を使用した
 - 複数の変数が関与している場合、クラスター分析を使用した (Hatzinger et al., 2011)
- 仮説 3 & 仮説 4 : 従属変数「運転の自信」と因子「交差点タイプ」による一要因分散分析を算出した

3 Results

- 選択した行動が「運転の順番」全般に及ぼす影響を検証するために、カテゴリー別予測変数の名目ロジスティック回帰が選択された
- モデルがヌルモデルと有意に異なる (Table 1)
 - 「運転の順番」値 : 0 = 先に運転、1 = 2 番目以降に運転

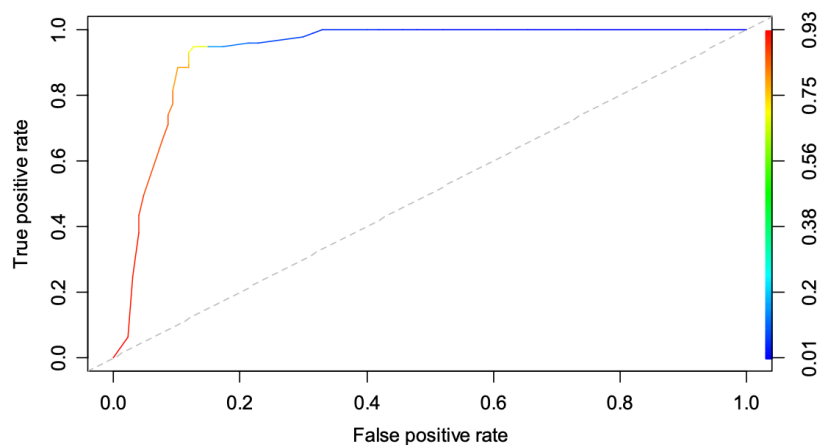
Table 1 Model test: a comparison between the null model and the tested model 1 for all types of intersections

Model	df	AIC	Deviance	Residual df	Residual Deviance	Chi ²	p
Null model	3	2597.4	2595.4	2223	2295		
1	8	1462	1133	2215	1462	1132.9	0.000***

$p < .000$ ***. $p < 0.001$ **. $p < 0.005$ *. $p < 0.01$

- Henking ら (2006) による ROC (Receiver Operating Characteristics) は、正しい分類の真実性が非常に高いことを示している (Fig. 5)

Fig. 5 Hypothesis 1: ROC-curve for model 1. True positive rate = 1 – specificity, false positive rate = Sensitivity



- 選択された行動が運転の順番を予測すると推論することができる (Table 2)

Table 2 Summary of the logistic regression for Hypothesis 1 for model 1 for variables predicting the order of driving

	95% CI for odds ratio			
	<i>B</i> (SE)	Lower	Odds ratio	Upper
Constant	0.575*** (0.174)	0.237	1.777	0.920
Hand gesture	0.714*** (0.143)	0.435	2.043	0.997
Acceleration	-2.625*** (0.377)	-3.409	0.072	-1.922
Stop	1.971*** (0.147)	1.697	7.177	2.263
Deceleration	-0.476*** (0.159)	-0.794	0.621	-0.168
Maintained Speed	-3.794*** (0.342)	-4.516	0.0225	-3.164
Horn	-1.742** (0.842)	-3.540	0.175	-0.166
Headlight flasher	0.924*** (0.200)	0.0542	2.519	1.329
Direction Indicator	0.152 (0.174)	-0.184	1.164	0.480

McFadden-Pseudo²=0.437; observations 2224; log Likelihood -731.241; Akaike Inf. Crit. 1480.481, *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$

- 選択された行動と期待される行動との相関を検証するため、Bravais-Pearson 相関係数を算出し、仮説 2 は確認することができた (Table 3)

Table 3 Chosen and expected behaviour

chosen/expected	Maintained speed	Acceleration	Deceleration	Stop	Horn	Headlight flash	Direction indicator	Hand gesture
Horn	0.014	0.005	0.009	0.034	0.002	0.016	0.042	0.002
Headlight flash	0.013	0.268*	0.55*	0.198	0.062*	0.218*	0.098*	0.167*
Direction indicator	0.083*	0.057*	0.039	0.012	0.06*	0.051*	0.163*	0.036*
Deceleration	0.197*	0.052*	0.051*	0.199	0.003	0.058*	0.053*	0.142*
Acceleration	0.073*	0.081*	0.119*	0.227	0.006	0.015	0.045*	0.068*
Maintained Speed	0.2*	0.223*	0.208*	0.496	0.013	0.016	0.001	0.223*
Stop	0.267*	0.094*	0.072*	0.291	0.028	0.004	0.031	0.145*
Hand gesture	0.174*	0.213*	0.026	0.186	0.032	0.041	0.098	0.452*

Bravais-Pearson Correlation ($N=281$)

$p < 0.000$ ***, $p < 0.001$ **, $p < 0.005$ *, $p < 0.01$

- [仮説 3] 協力的な状況 (a) ~ (c) については、ファジークラスタが計算された
 - x-交差点のファジー分析の Dunn 係数 (Table 4) は $Fk(U) = 0.87$ で、Dunn (1974) によれば、非常に高い値である
 - T 字路は、左折位置 (Table 5) と直進位置 (Table 6) に分割され、それぞれの位置で異なる挙動が予想されたからである
 - 直進位置を除いた T 字路 : $Fk(U) = 0.74$ (Table 5)

- 左折位置のない交差点 : $Fk(U) = 0.76$ (Table 6)
- 等幅通路 : $Fk(U) = 0.76$ (Table 7)
- 仮説モデルの検証 (Table 8) と回答者自身の運転の順位に関する選択を示す記述 (Table 9) を記録された
- 交差点タイプ (cues) が運転順序 (aims) を予測するという仮説が確認できる (Table 10)

Table 4 Fuzzy analysis for the X-intersection with three clusters sorted in descending order

Signal	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
C—Horn	1	0	0
C—Headlight flash	0.98	0.02	0
C—Direction indicator	1	0	0
C—Acceleration	1	0	0
C—Maintain speed	1	0	0
E—Maintain speed	0.93	0.06	0.01
E—Acceleration	0.67	0.19	0.14
E—Horn	1	0	0
E—Headlight flash	0.99	0	0
E—Direction indicator	1	0	0
C—Deceleration	0.03	0.86	0.11
E—Deceleration	0.03	0.94	0.03
E—Stop	0.35	0.54	0.11
C—Stop	0.02	0.10	0.89
C—Hand gesture	0	0.02	0.97
E—Hand gesture	0.02	0.08	0.90

The highest value can be assigned to the corresponding cluster
The bold-marking represents a potential transition to a next cluster
C chosen behaviour, E expected behaviour

Table 5 Fuzzy analysis for the T-intersection without going ahead with four clusters

Signal	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
C—Horn	1	0	0	0
E—Horn	1	0	0	0
C—Direction indicator	0.97	0.02	0	0
C—Acceleration	0.99	0.01	0	0
C—Maintain speed	0.93	0.05	0.01	0.01
E—Maintain speed	0.69	0.23	0.05	0.02
E—Headlight flash	0.93	0.05	0.01	0.01
E—Stop	0.55	0.15	0.20	0.10
C—Headlight flash	0.05	0.92	0.02	0.01
E—Acceleration	0.05	0.91	0.02	0.02
E—Direction indicator	0.04	0.06	0.83	0.07
C—Deceleration	0.05	0.06	0.76	0.14
C—Stop	0.04	0.07	0.71	0.17
E—Deceleration	0.21	0.12	0.53	0.13
C—Hand gesture	0.01	0.02	0.04	0.93
E—Hand gesture	0.01	0.02	0.03	0.94

Only the left turn position was considered without the going ahead position. The highest value can be assigned to the corresponding cluster

The bold-marking represents a potential transition to a next cluster
C chosen behaviour, E expected behaviour

Table 6 Fuzzy analysis for the T-intersection without turning left with four clusters

Signal	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
C—Horn	1	0	0	0
C—Headlight flash	0.97	0.02	0	0
C—Direction indicator	0.99	0.01	0	0
C—Acceleration	0.93	0.05	0.01	0.01
C—Maintain speed	0.69	0.23	0.05	0.02
E—Maintain speed	0.55	0.15	0.20	0.10
E—Acceleration	1	0	0	0
E—Horn	0.93	0.05	0.01	0.01
E—Headlight flash	0.05	0.92	0.02	0.01
E—Direction indicator	0.05	0.91	0.02	0.02
C—Deceleration	0.05	0.06	0.76	0.14
E—Deceleration	0.04	0.07	0.71	0.17
E—Stop	0.21	0.12	0.53	0.13
C—Stop	0.04	0.06	0.83	0.07
C—Hand gesture	0.01	0.02	0.04	0.93
E—Hand gesture	0.01	0.02	0.03	0.94

Only the going ahead position was considered without the left turn positions. The highest value can be assigned to the corresponding cluster

The bold-marking represents a potential transition to a next cluster
C chosen behaviour, E expected behaviour

Table 7 Fuzzy analysis for the equal narrow passage with 5 clusters

Signal	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5
C—Horn	1	0	0	0	0
C—Headlight flash	0.99	0	0	0	0
C—Direction indicator	0.99	0	0	0	0
C—Acceleration	0.71	0.06	0.12	0.05	0.05
C—Maintain speed	0.78	0.02	0.14	0.02	0.03
E—Maintain speed	1	0	0	0	0
E—Acceleration	0.83	0.02	0.11	0.02	0.02
E—Horn	0.01	0.88	0.02	0.05	0.03
E—Headlight flash	0.04	0.86	0.03	0.03	0.04
E—Direction indicator	0.06	0.01	0.90	0.01	0.01
C—Deceleration	0.15	0.05	0.56	0.13	0.11
E—Deceleration	0.04	0.05	0.81	0.05	0.04
E—Stop	0.01	0.03	0.03	0.89	0.04
C—Stop	0.01	0.04	0.04	0.84	0.06
C—Hand gesture	0.02	0.03	0.04	0.05	0.87
E—Hand gesture	0.01	0.03	0.03	0.04	0.88

Sorted in descending order. The highest value can be assigned to the corresponding cluster

The bold-marking represents a potential transition to a next cluster

C chosen behaviour, E expected behaviour

Table 8 Comparison between the null model and the tested model for all intersections for the dependent variable (dv) order of driving

Model	df	AIC	Deviance	Residual df	Residual deviance	Chi	p
Null model	3	2597.4	2595.4	2223	2595.4		
1	4	2291.6	2281.6	2219	2281.6	314	0.000***

$p < 0.000$ ***, $p < 0.001$ **, $p < 0.005$ *, $p < 0.01$

Table 9 Descriptive statistics

Rank of driving/situation	(a) (%)	(b) (%)	(c) (%)	(d) (%)
First	7.99	17.39	12.23	49.28
Second or later	92.01	82.61	87.77	50.72

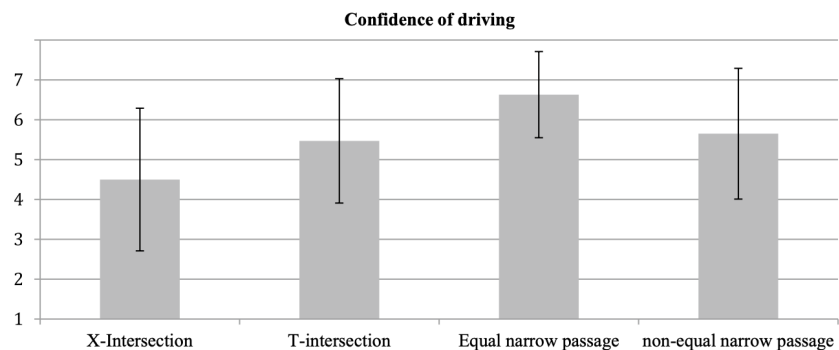
Percentage for driving first or later for all tested situations

Table 10 Predictors of the logistic regression model 1 for hypothesis 3 for predicting the order of driving

	95% CI for odds ratio			
	B (SE)	Lower	Odds ratio	Upper
Constant	0.101 (0.085)	−0.065	1.106	0.268
X-intersection (a)	2.353*** (0.238)	1.908	10.520	2.845
T-intersection (b)	1.458*** (0.125)	1.215	4.296	1.704
Equal narrow passage (c)	1.904*** (0.204)	1.517	6.711	2.319
Priority to the right II (f)	−0.072 (0.147)	−0.360	0.930	0.216

McFadden=0.121; observations 2224; log likelihood −1140.818; Akaike Inf. Crit. 2291.635, *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$

Fig. 6 Mean-Bar plot with the standard deviation for confidence of driving for the different intersection types. Likert-scale from 1 to 7



- ANOVA で従属変数(dv)運転の信頼度に関する交差点タイプ間の差異に関する仮説 4 は確認することができる (Fig. 6)

4 Discussion

- 著者らの仮説はすべて確認された
- 仮説 1 : 「行動 (actions)」と「目的 (aims)」のつながりをモデル化したもの
 - Implicit 行動 (加速、減速、速度維持) からは、一番目に運転することがわかる
 - これらの行動カテゴリーは攻撃的 (offensive) な行動を表している
 - 一番目に運転する傾向を伝える explicit 信号がないことが注目される
 - ハンドジェスチャー、はっきりと止まる、ヘッドライト・フラッシャーの使用は防御的 (defensive) な行動を表している
 - 方向指示器は、運転の順序を説明するのに役立つ信号ではない
- 仮説 2 : 選択された行動 (actions) と期待される行動 (expectations) の関連性を検証した
 - すべてのクラスター分析を比較すると、1 つの強いクラスターがある
 - 被験者がハンドジェスチャーをしたい場合、協力相手からのハンドジェスチャーを期待していることを示している
 - コミュニケーション信号が非同期である場合にのみ、成功した協力が行われる
 - 成功した相互作用や協力は、少なくとも 1 つの explicit 信号で示される
 - NDM アプローチとその結果得られた定義 :

	Implicit	Explicit
Offensive	加速、速度維持	クラクションの使用
Defensive	減速	ハンドジェスチャー、停止、ヘッドライトの点滅

- 仮説 3 : 判断プロセスにおける「目的 (aim)」の 1 つは交差点タイプ (cue)
 - どの協力的な状況でも、回答者は防衛的な行動をとる傾向を示している
 - このような状況では、自動運転システムが主導権を握る可能性がある
- 仮説 4 : 交差点タイプ (cue) に対する運転の自信 (mental stimulation) に違いがあることを示す可能性がある
 - 状況の複雑さが増すにつれて、運転に対する信頼度は低下する

- 個々の交差点の異なる結果を組み合わせると、攻撃的 (offensive) な信号は通常、他の道路利用者の予想される防御的 (defensive) な信号にリンクしていることが明らかになる (逆もまた然りである)
 - 攻撃的 (offensive) な行動の意図を示す信号：クラクションの使用、加速、速度維持、方向指示器の使用など
 - 防御的 (defensive) 行動を示す信号：減速、停止、ジェスチャー、ヘッドライトの点滅
- Implicit コミュニケーション信号は、explicit コミュニケーション信号よりも明瞭であることが示された (例：クラクションの使用)
- 意図した動作を強調するために explicit シグナルを使用することができる
- 安全な交通は、自動運転による車両ガイダンスが両方の意図を示すことができる場合にのみ保証される

5 Conclusion

- 認識モジュールの個々のパーツをテストすることができた
- メンタルシミュレーションを確認するための解決策は見つかっていない
- 行動と目標との関連性を理解することができる
- 選択した行動と他の道路利用者の期待される行動を理解し、結びつけることができる
- 協調的な状況における自動的な車両ガイダンスのための設計上の推奨事項 (検討したシナリオにのみ適用されるもの)
 - 状況が複雑であればあるほど、自動車両は早く優先的に運転しようとするはず
 - Implicit 行動は、先に運転するという意思を伝えるのに最適な方法である
 - 2 番目以降に運転する傾向を伝えるには、Implicit 行動と explicit 行動の両方が適している
 - 協力自体では、協力相手の 1 人が明示的な信号を送るように試みるべきである
- 次のステップは、協調的な状況に対する複雑さの尺度を導き出すことである