

平成 29 年度 修士学位論文

人間同士による自動車の 協調運転特性に関する研究

指導教員 池浦良淳 教授

三重大学大学院工学研究科

博士前期課程 機械工学専攻

システム設計研究室

服部 智哉

目次

はじめに.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	7
1.3 本論文の構成.....	8
装置構成とステアリング装置の詳細.....	9
2.1 装置構成.....	9
2.2 ステアリング装置.....	11
走行環境及び実験条件	16
3.1 走行環境	16
3.2 実験条件	17
運転状態判断法	19
4.1 取得データ値	19
4.2 状態判断式.....	20

実験及び結果・考察	23
5.1 実験結果処理方法	44
5.2 1回目の試行比較	24
5.3 試行回数による比較	44
5.4 運転状態の時間割合	38
結言	43
5.1 まとめ	43
5.2 今後の課題	44
参考文献	45
謝辞	48

第1章 はじめに

1.1 研究背景

現在，自動車の自動運転技術は，多くの研究機関・企業によって研究・開発が行われている．自動運転技術は交通事故を減少させ安全性を高める効果が期待される他，ドライバーの運転負担軽減，渋滞緩和などの交通障害の改善等の効果が見込まれる．

米国の SAE インターナショナルが定めた「SAE J3016」^[1]では，自動運転技術のレベルはレベル 0~5 の 6 段階で定めている．レベル 0 は人間がすべての運転タスクを行う．レベル 1 はシステムが人間を時々支援することで，いくつかの運転タスクを実行する．レベル 2 はシステムがいくつかの運転タスクを事実上実行することができるが，人間は運転環境を監視し続ける必要があり，また残りの運転タスクは人間が事項し続ける必要がある．レベル 3 はシステムがある条件化の下で運転環境を監視するとともに，いくつかの運転タスクを事実上実行するが，人間はシステムが要請した場合，制御を取り戻す準備をしておかなければならない．レベル 4 はシステムがある条件化の下で運転環境を監視し，すべての運転タスクを実行することができる．人間は制御を取り戻す必要は無い．レベル 5 はシステムがすべての条件の下で運転環境を監視し，すべての運転タスクを実行することができる．自動運転レベルについてまとめた表を Table 1.1 に示す．自動運転レベル 0~3 では人間が運転環境を監視する必要がある，レベル 3~5 ではシステムが運転環境を監視する．

現在実現している運転支援システムは前述したレベル 1,2 に該当するものが多く，例として，①『ACC，CACC』②『衝突被害軽減ブレーキ』③『レーンキープアシスト』が挙げられる^[2]．

ACC(Adaptive Cruise Control)は、車両の前方に搭載したレーダを使用することで、前方を走行する車両との車間距離をセンシングし、前方車との車間距離を一定に保ち、必要に応じてドライバーへの警告を行うシステムである。CACC(Cooperative Adaptive Cruise Control)は、ACC の機能に加え、車同士の通信によってそれぞれの車の加減速情報を共有し、より正確に車間距離の制御を行うシステムである。

衝突被害軽減ブレーキは、車両の前方に搭載したカメラやレーダ等の情報から前方の障害物等を検知した場合、ドライバーに対して警告を行う。しかし、衝突（追突）が回避できない場合にはブレーキの操作の補助を行うシステムである。

レーンキープアシストは、車両の前方に搭載したカメラ等で道路の白線等を検知、走行環境を認識することで車両が走行車線を維持できるよう、ステアリングの操作を支援するシステムである。

また、アウディ社は 2018 年に世界初のレベル 3 自動運転技術搭載の自動車「A8」を発売予定である^[3]。A8 には Audi AI トラフィックジャムパイロットが搭載されており、高速道路などでの交通渋滞等の時速 60km 以下のスピードで車両が走行している状況下で、ドライバーに代わって運転操作を引き受けることができる。

これらの技術を発展・応用させることで今後もレベル 3 の自動運転技術が実用化されることが予想される。しかしながら、レベル 3 では、限定された条件下でのみ自動運転が行われるため、指定された条件下に移る際には人間のドライバーから自動運転システムへ、または指定された条件下から外れる際は自動運転システムから人間のドライバーへ運転の主導権を引き継ぐ必要がある。この時、システムと人間が運転権限を共有するため、両者での権限切り替え時に、自動車の運転挙動が不安定になり、事故等が発生することが懸念される。この自動/手動問題に対して、各研究機関により研究が行われている^[4-8]。Merat, Mok らは切り替え時にドライバーが安全に運転主導権を引き継ぐためにかかる時間に関するものである。各研究により実験条件が異なるも

のの、おおよそ 5-15 秒程度必要であるとされている。その他にも、ドライバーの操舵・加減速の特性を調べたものがあり、Beukel らによる研究ではドライバーの状況認識と回避能力の関係を、Russell らによる研究では運転技術の学習過程の特性を調査している。Wada らによる研究では Shared control という人間・システムの共同運転状態を提案し、どのように運転者に運転権限を引き渡すべきかを検討している。このように、自動運転システムと人間のドライバー間での運転主導権の切り替え問題に対し、多角的な考えのもと、その解決が求められている。

Table 1.1 自動運転レベル

SAE level	Name	Execution of Steering and Acceleration/Deceleration	Monitoring of Driving Environment	Fallback Performance of Dynamic Driving Task	System Capability (Driving Modes)
Human driver monitors the driving environment					
0	No Automation	Human driver	Human driver	Human driver	n/a
1	Driver Assistance	Human driver and system	Human driver	Human driver	Some driving modes
2	Partial Automation	System	Human driver	Human driver	Some driving modes
Automated driving system monitors the driving environment					
3	Conditional Automation	System	System	Human driver	Some driving modes
4	High Automation	System	System	System	Some driving modes
5	Full Automation	System	System	System	All driving modes

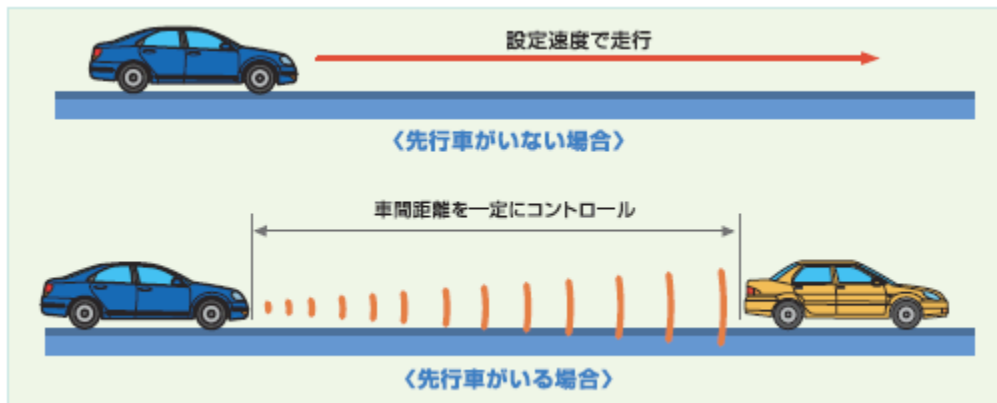


Figure 1.1 定速走行・車間距離制御装置（ACC）□

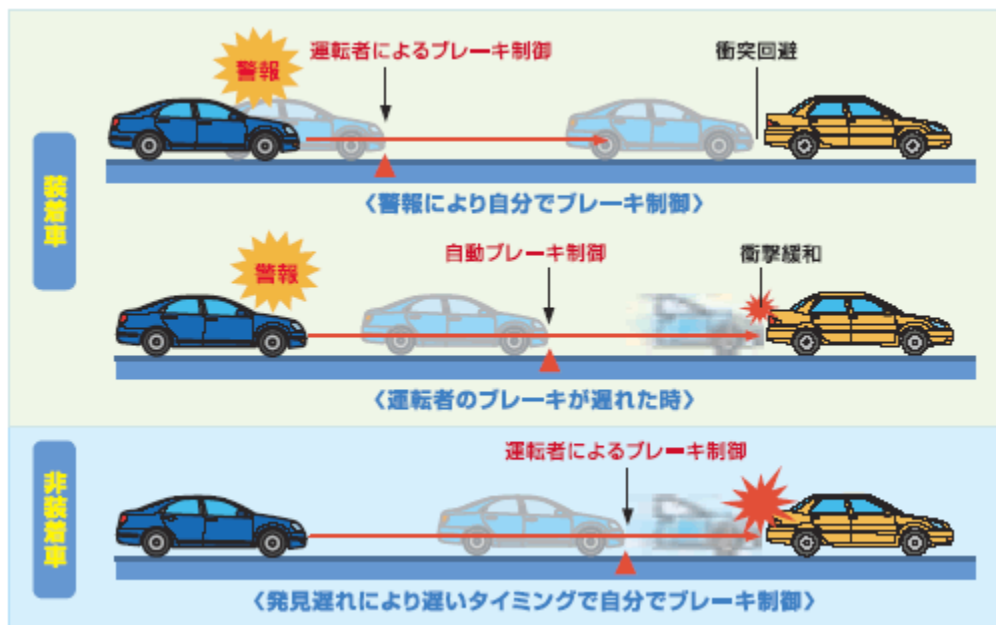


Figure 1.1 衝突被害軽減ブレーキ□

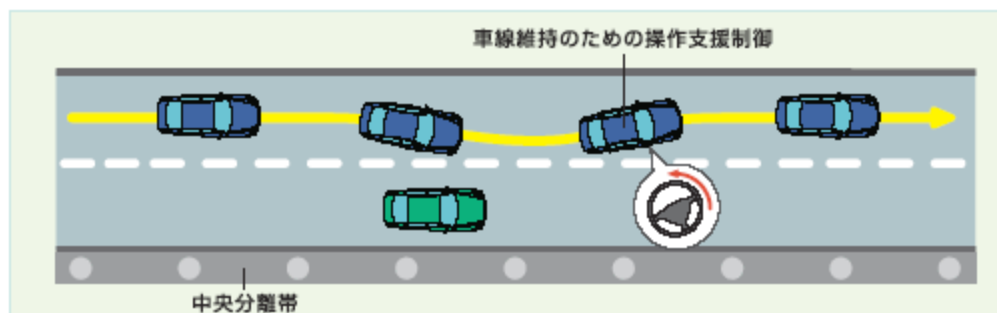


Figure 1.1 レーンキープアシスト □



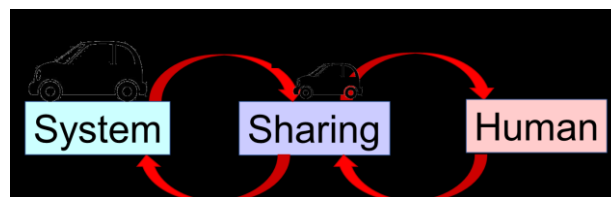
Figure 1. 1 Audi A8^{II}

1.2 研究目的

スムーズに自動運転システムと人間のドライバーの間で運転主導権を切り替えるために、人間に対して受容性の高いシステムを開発する必要がある。しかし、システムの開発・改良には多くの条件や方法を思考する必要があり、時間とコストがかかる。そのため、システム・人間での主導権切り替えがスムーズに行われるプロセスを調査し、システムに適応することが考えられる。

この問題を解消するため、本研究では、人間同士が協調しスムーズに動作することに注目し、システムに応用することを考える。Fig1.6 に運転主導権の共有状態を示す。従来研究では運転主導権をシステムから人間に受け渡す時、間にシステムと人間共有状態を介すものがあるが、今回の調査では、システム側の動作も人間が行うことで、一方の人間から他方の人間に運転権限の受け渡しを行う時、間に人間同士の共有運転状態を介す。この時の運転状況を取得し、スムーズな運転主導権の受け渡しができる自動運転実現のため、人間同士の運転主導権の受け渡しプロセスを解析する。

<<Previous research>>



<<This research>>

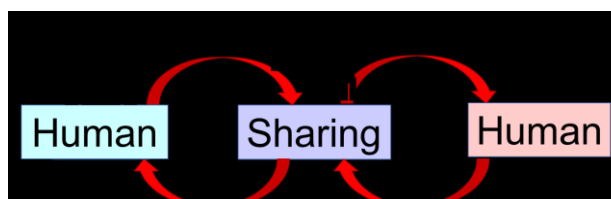


Figure 1.1 運転主導権の共有状況

1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す．まず，第 2 章では製作した専用の実験装置について述べる．第 3 章では実験に使用した条件・環境述べる．第 4 章では人間同士の間で発生するエネルギーの流れに注目した状態判断法について述べる．第 5 章では実験データとその解析から得られた結果について述べる．最後に，第 6 章では本研究のまとめと今後の課題について述べる．

第 2 章

装置構成とステアリング装置の詳細

本研究では、2 人の人間での運転を行うため、専用の装置を設計・製作した。本章では、実験に使用した実験装置について解説し、測定機構など詳細部を説明する。2.1 節では溶接時の基本姿勢である蹲踞姿勢について述べる。2.1 節では使用する装置概要と構成。2.2 節ではステアリング装置の詳細としてトルク測定機構等について述べる。

2.1 装置構成

Figure 2.1 に装置概要図を示す。実験装置には人間 2 人での運転を実現するため、2 つのステアリングをタイミングベルトで連結し、連動させたものを設計・製作した。また、実験にはドライビングシミュレーターを使用し、モニターには走行環境を表示する。2 人は隣同士で運転を行うため、相手の手元が見えないように間に仕切りを設ける。両者にアクセルペダル、ブレーキペダルを設け、踏み込み量が多い方を指令値とする。実験では各ドライバーのステアリングに対するトルクを測定する。

Figure 2.2 に実験装置の構成図を示す。各ドライバーに対してステアリング、シート、ブレーキ、アクセルを用意する。ステアリングからは回転角度、アクセルペダル・ブレーキペダルからは踏み込み量が PC 送られる。PC はドライバーの車両操作情報に基づいて車両のダイナミクスを計算し、その結果に基づいて運転映像をメインディスプレイに表示する。

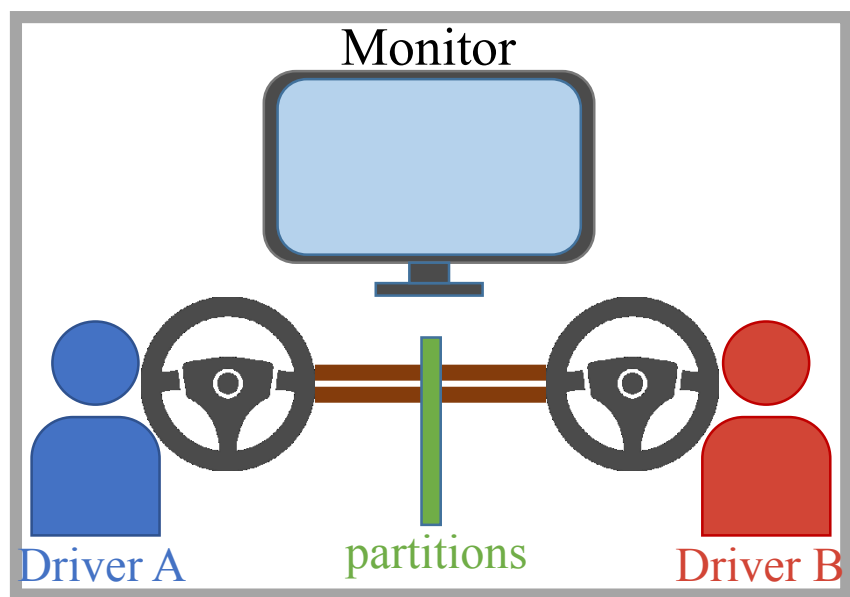


Figure 2.1 実験装置概要

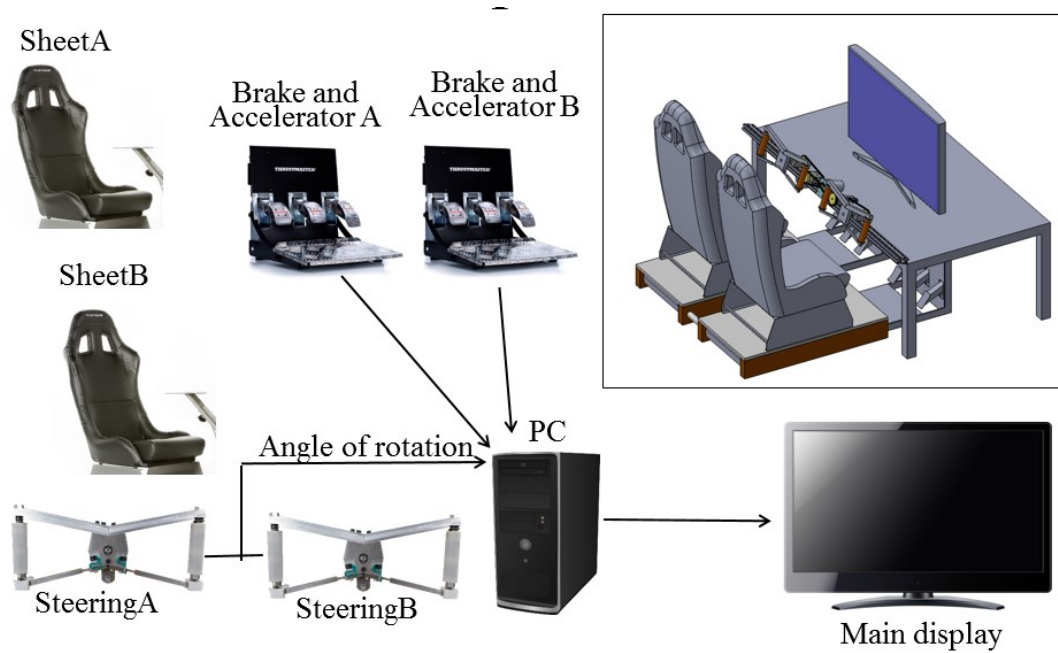


Figure 2.2 実験装置構成図

2.2 ステアリング装置

ステアリング装置の詳細図を Figure 2.3 に示す。装置は、2 人の人間が同期して運転を行うため、ステアリング同士の動作に遅れが生じないように、タイミングベルトで連結し、連動させる。装置を構成する各部品はレールの上に設置する。以下に各部品の詳細を記す。

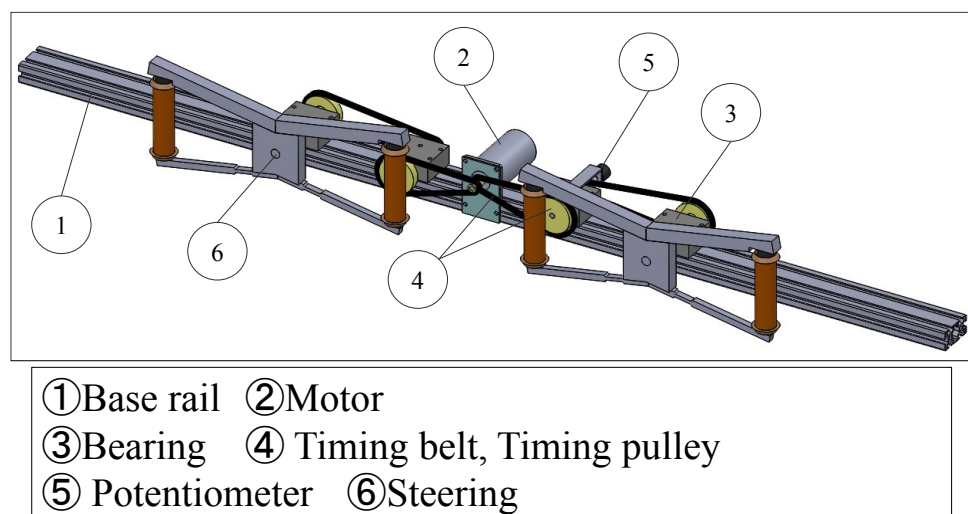


Figure 2.3 ステアリング装置詳細図

- ① 土台レール MISUMI のアルミフレーム「6 シリーズ 長方形 30×60mm 2 列溝 4 面溝」を使用する。全長は 1500mm. M6 ネジを使用して溝に部品を固定することができ、位置は自由に調節することができる。

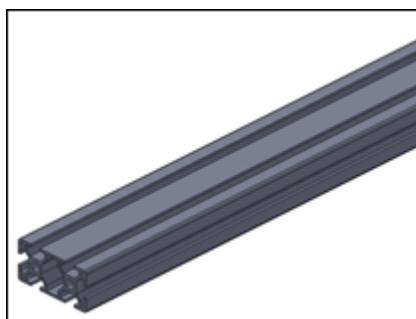


Figure 2.4 土台レール

- ② モーター SAWAMURA MOTOR SS40E4 DC12V を使用する．ステアリングにかかる負荷を変化させるため，装置中央に設置する．モーターは薄板を加工したものを使用して，側面の溝に 2 つのナットを使用して固定される．仕様を table2.1 に示す．

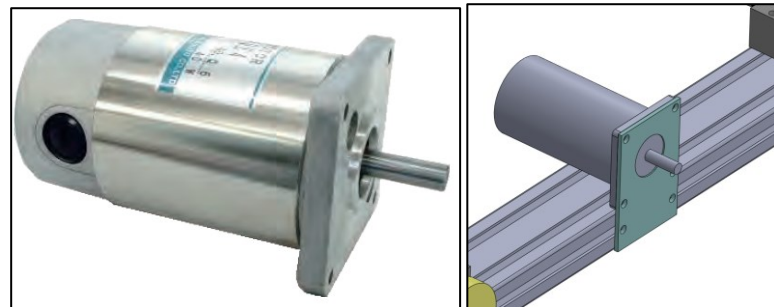


Figure 2.4 モーター

Table 2.1 モーターの仕様

連続定格 Continuous rating				無負荷 No load	
電圧 Voltage DC-V	電流 Current A	回転速度 Speed rpm	トルク Torque N・m (kgf・cm)	電流 Current A	回転速度 Speed rpm
12	5.5	2500	0.16 (1.6)	0.55	3100

電機子 抵抗 Armature R. Ω	電機子 慣性モーメント(GD ²) R. Inertia kg・cm ² (kgf・cm ²)	機械的 時定数 (tm) ms	逆起電力 定数 (Ke) V/krpm	トルク 定数 (Kt) N・m/A
0.4	0.53 (2.1)	18	3.87	0.037

- ③ ベアリング 装置には 4 つの軸があり，それぞれをベアリングも通す．軸は 2 段階変速をするための中間軸が 2 本，ステアリングの軸が 2 本ある．それぞれの軸と軸受けは樹脂で製作したブロックで固定される．中間軸受けブロックには フランジ付き深溝玉軸受け NSK MF148ZZ (内径 $\phi 8$, 外径 $\phi 14$) を使用する．ステアリング軸受けブロックにはスラスト方向とラジアル方向の力がかかるため，2 方向

の力に対応できるラジアルスラストベアリング NTN NKX 12T2Z(内径 $\phi 12$, 外径 $\phi 21$)を使用する.

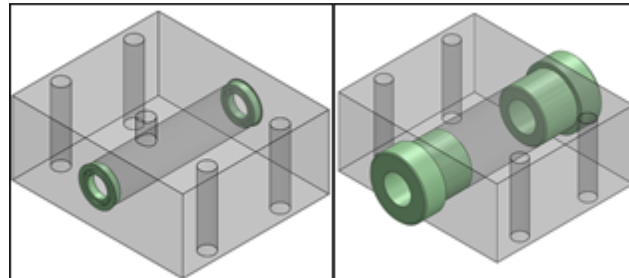


Figure 2.6 中間軸受けブロック・ステアリング軸受けブロック

- ④ タイミングベルト, タイミングプーリー タイミングベルトを掛けることで, 各ステアリングを連動させ, モーターからステアリングまで2段減速を行う. タイミングプーリーは P20MXL100(歯数 20), P84MXL100(歯数 84)の減速比 4.2 を使用する. タイミングベルトの規格を Figure 2.7 と Table 2.2 に, 示す.

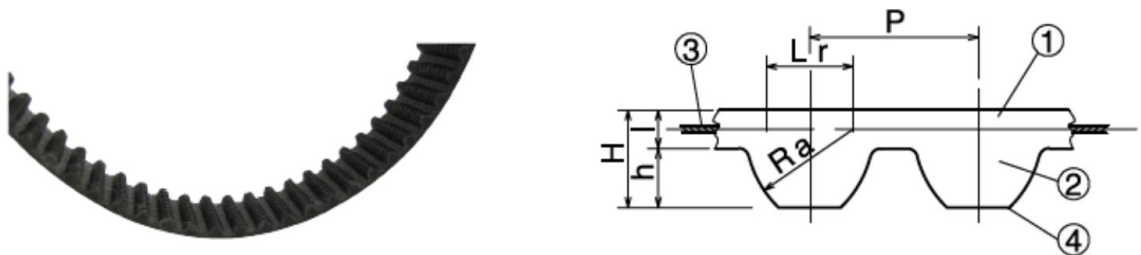


Figure 2.7 タイミングベルト

Table 2.2 タイミングベルトの規格

Belt width	Material	P[mm]	Ra[mm]	Lr[mm]	H[mm]	h[mm]	l[mm]
60	Gum	3	1.95	1.95	1.94	1.14	0.8

- ⑤ ポテンションメーター ステアリングの操舵角を測定するためにポテンションメーターを取り付ける． Figure 2.8 に使用するポテンションメーターを， Table 2.3 にその仕様を示す．



Figure 2. 8 ポテンションメーター

Table2. 3 ポテンションメーターの仕様

effective electrical travel	resistance	independent linearity	normal rated power
3600°	0.1k~100kΩ ±5%	±0.25%	2W
Optical resolution	mechanical radian	rotating torque	mass
0.007%~0.060%	3600°	max2.5mN・m	22g

- ⑥ ステアリング Figure 2.9 にステアリングの全体図を， Figure 2.10 にトルク測定機構の詳細図を示す．ステアリングの下部の部品には切りかきがついており，ひずみゲージを取り付けることで，各ドライバーの右手・左手のトルクを測定する．グリップ部分は中心に軸が通っており上下する仕組みになっている．また，中にバネが仕込まれており，下部の部品に押し付けた状態になっている．グリップ

プから1点のみで下部の部品に力を伝えるため、周方向のみの力を取り出すことができる。



Figure 2.9 ステアリング詳細図

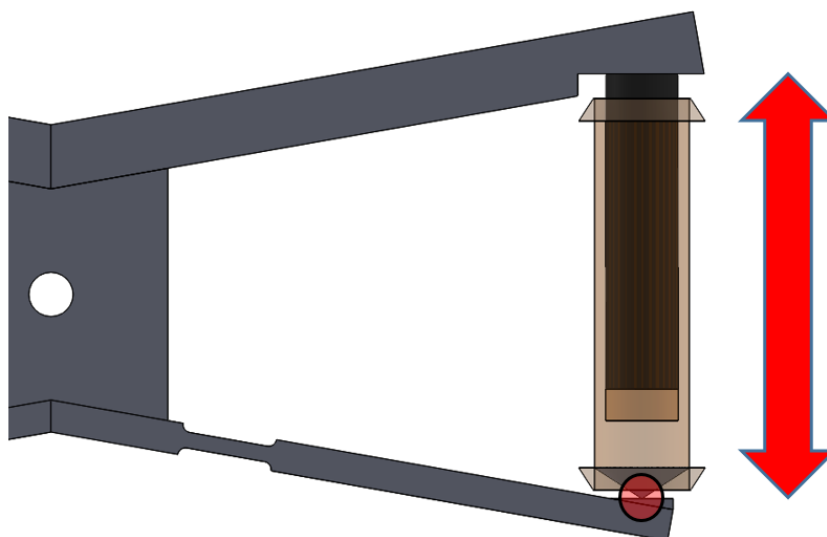


Figure 2.10 測定機構

第 3 章

走行環境及び実験条件

実際にレベル 3 自動運転技術でシステム/人間の間で運転主導権委譲が行われるのは、限定された条件の走行環境に入る・外れる時である。そのため、これを想定した走行環境を構築し、実験を行った。3.1 節では運転主導権切り替え動作のために構築した実験環境について、3.2 節では各ドライバーに与えられた運転実験条件について述べる。

3.1 走行環境

本実験では高速道路上の走行を限定された条件としたシステムから、人間のドライバーに運転主導権を受け渡すことを考える。そのため、ドライビングシミュレーターで再現する走行環境は高速道路のインターチェンジとし、車線変更を行い、高速道路から降りる運転動作を実験対象とした。使用した走行環境を、Figure 3.1 に示す。1 車線の幅は 3.5m、車線変更区間は 300m、退出後走行車線は 100m とする。また、他車両は表示しないものとする。

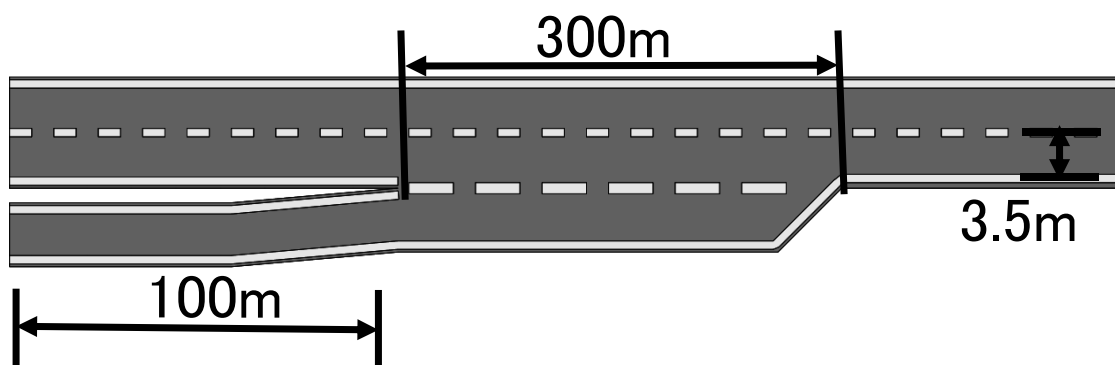


Figure 3.1 走行環境(インターチェンジ)

高速道路のインターチェンジから車線変更を行い、降りる運転動作を次の4つのステップに分けた。各ステップに対する車両の位置を Figure 3.2 に示す

- ① 本線の走行
- ② 分岐走行の操作(ステアリングををまわす)
- ③ 分岐走行操作後に車体安定させる(ステアリングを戻す)
- ④ 高速道路から降りる

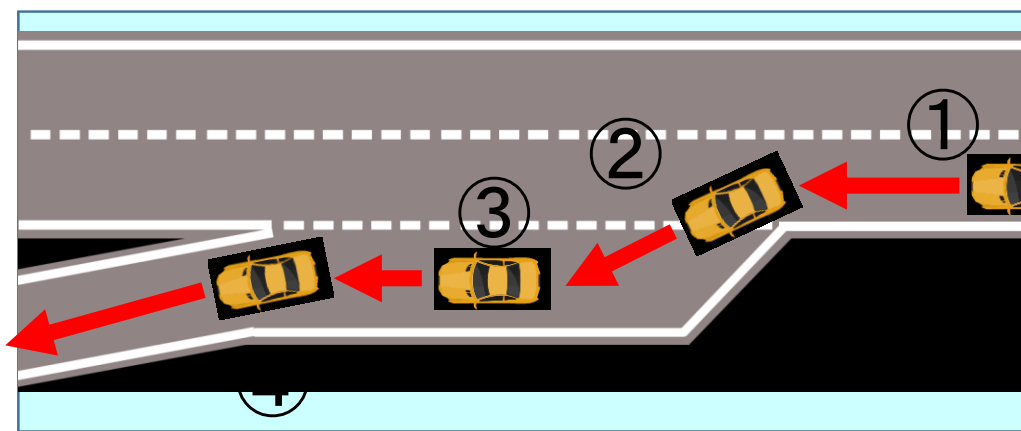


Figure 3.2 走行環境(インターチェンジ)

3.2 実験条件

設定した走行環境を使用し、人間同士の運転主導権委譲運転を行う。ドライバーAからドライバーBへ運転主導権を受け渡す時、まず、ドライバーAのみが運転を行う(①)。その後ドライバーBがステアリングを保持、運転に介入する。この時点でドライバー2人による運転が開始され、そのまま車線変更動作を行う(②, ③)。車線変更を行ったのちドライバーAがステアリングを手放しドライバーBのみの運転に移る。なお、あらかじめ被験者には、車線変更を行い、完了するまでは必ず2人による運転を行うよう指示し、共同運転の開始・終了のタイミングは被験者同士で声を掛けるなど自由とした。

Figure 3.3 に運転主導権の保持状況を示す。

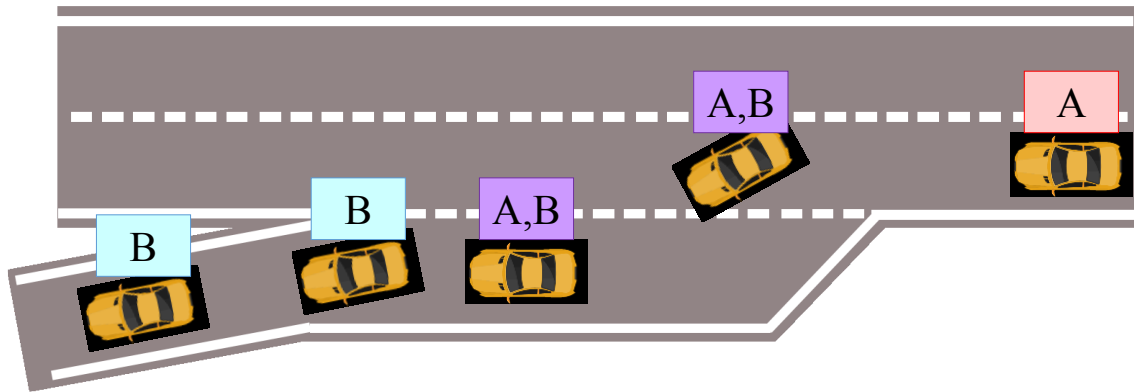


Figure 3.3 運転導線保持条件

実験を行う被験者数や回数，実験手順について説明する．被験者は 20 代男性，6 組 12 名の「Pair 1」（ドライバーA1・ドライバーB1）から「Pair 6」（ドライバーA6・ドライバーB6）に対し行った．被験者ははまずドライビングシミュレーターに慣れるまで 1 人で運転を行う．その後 2 人でのインターチェンジ退出運転動作について説明を行い，実際に運転実験を行った．運転実験は各組 10 回行った．

実験では「ドライバーA ステアリングに与えたトルク値」，「ドライバーB がステアリングに与えたトルク値」，「ステアリングの操舵角」を 0.01 秒のサンプリングタイムで取得する．

第 4 章

運転状態判断法

前章で述べた運転実験では運転の主導権が一方の人間から他方の人間に運転主導権を受け渡す動作について説明した。運転主導権が受け渡される時の特性を調べるため、2 者間のエネルギーの流れに注目し、運転状態を分類した。4.1 節では使用するデータ値について述べ、4.2 節では分類した状態について述べる

4.1 取得データ値

取得したデータは前章で述べた「ドライバーA ステアリングに与えたトルク値」、「ドライバーB がステアリングに与えたトルク値」、「ステアリングの操舵角」である。これらの計測値を含め、計算に使用する各値を以下に示す。なお、各値はステアリングを時計回りに回す方向を正に、半時計回りに回す方向を負とする。

- τ_A = ドライバーA がステアリングに与えるトルク
- τ_B = ドライバーB がステアリングに与えるトルク
- θ_t = 操舵角
- ΔT = 判定時間間隔(0.1s)
- $\bar{\tau}_A$ = ドライバーA がステアリングに与える平均トルク
- $\bar{\tau}_B$ = ドライバーB がステアリングに与える平均トルク

- ω = 操舵角速度

これらの計測した値より，操舵角から角速度を，各ドライバーがステアリングに与えたトルクから力積を導出する．角速度と力積から各ドライバーがステアリングに与えるエネルギーを算出する．ただし各計算式を式 4.1, 4.2, 4.3 に示す．

- $\bar{\tau}_A$ = ドライバーA がステアリングに与える平均トルク

- $\bar{\tau}_B$ = ドライバーB がステアリングに与える平均トルク

- ω = 操舵角速度

$$\bar{\tau}_A(t) := \frac{1}{\Delta T} \int_{t-\Delta T}^t \tau_A(t) dt \quad (3.1)$$

$$\bar{\tau}_B(t) := \frac{1}{\Delta T} \int_{t-\Delta T}^t \tau_B(s) ds \quad (3.2)$$

4.2 状態判断式

ドライバーA からドライバーB に運転主導権を移す時，両者の間にエネルギーの受け渡しが行われる．このエネルギーの受け渡しについて 3 つの状態に分類する判断法を提案し，実験より得られたデータに適応することで，運転主導権の受け渡しプロセスについて考察を行う．各ドライバーが発生させるエネルギーは各ステアリングに加えられる平均トルクと操舵角速度の積で表される．運転状態は「ドライバーA エネルギー供給状態」と「ドライバーB エネルギー供給状態」，「両ドライバーエネルギー供給状態」の 3 つに分類される．以下にそれぞれの状態について記す．

● ドライバーA エネルギー供給状態

この状態はドライバーAが発生させたエネルギーをドライバーBが吸収し、その余剰エネルギーが操舵エネルギーとなり、ステアリング操作を行っている状態である。すなわち、ドライバーAは実際に動作する操舵方向へトルクを加え、ドライバーBはその逆方向へトルクを加えている状態である。この状態の場合、 $\bar{\tau}_A(t)$ と $\omega(t)$ の積が正、 $\bar{\tau}_B(t)$ と $\omega(t)$ の積が負になる。Figure 4.1 にこの状態についてまとめたものを示す。

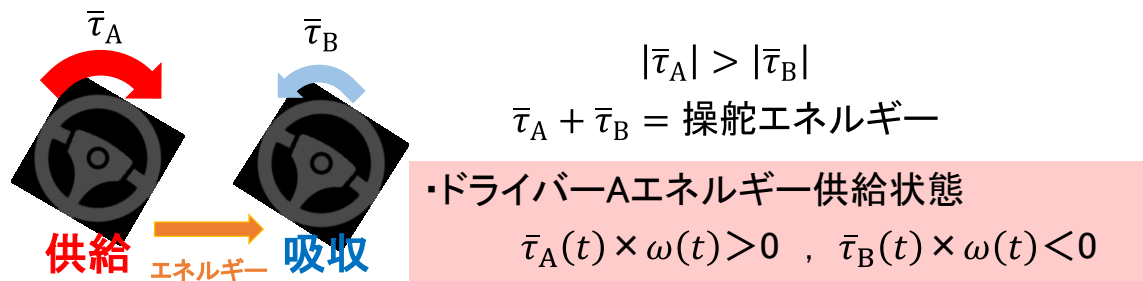


Figure 4.1 ドライバーAエネルギー供給状態

● ドライバーB エネルギー供給状態

この状態はドライバーBが発生させたエネルギーをドライバーAが吸収し、その余剰エネルギーが操舵エネルギーとなり、ステアリング操作を行っている状態である。すなわち、ドライバーBは実際に動作する操舵方向へトルクを加え、ドライバーAはその逆方向へトルクを加えている状態である。この状態の場合、 $\bar{\tau}_A(t)$ と $\omega(t)$ の積が負、 $\bar{\tau}_B(t)$ と $\omega(t)$ の積が正になる。Figure 4.2 にこの状態についてまとめたものを示す。

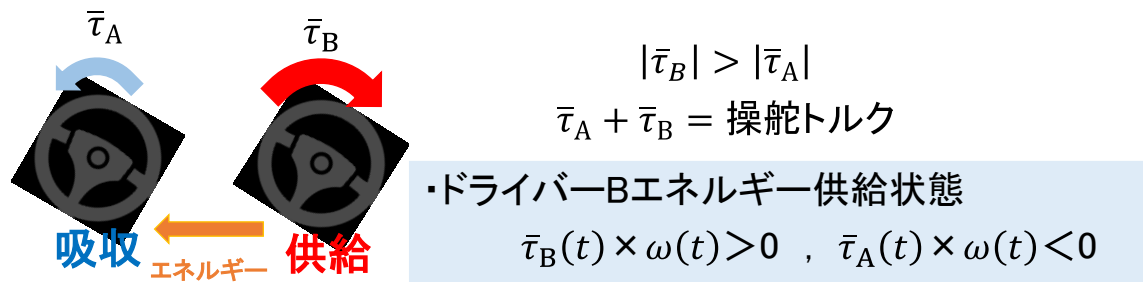


Figure 4.2 ドライバーBエネルギー供給状態

●両ドライバーエネルギー供給状態

この状態はドライバーA とドライバーB が発生させたエネルギーの和が操舵エネルギーとなり、ステアリング操作を行っている状態である。すなわち、ドライバーA もドライバーB も、実際に動作する操舵方向へトルクを加えている状態である。この状態の場合、 $\bar{\tau}_A(t)$ と $\omega(t)$ の積が正、 $\bar{\tau}_B(t)$ と $\omega(t)$ の積が正になる。Figure 4.3 にこの状態についてまとめたものを示す。

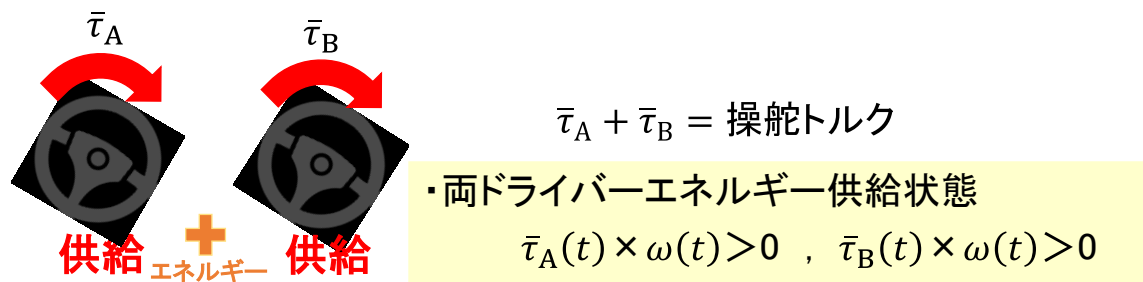


Figure 4.3 両ドライバーエネルギー供給状態

第 5 章

実験及び結果・考察

前章までに実験で使用するダブルステアリングを備えた装置・人間のドライバー2人が運転主導権を移す実験条件・2人の間で流れるエネルギーに注目した状態判断式を説明した。本章ではこれらを使用して実験を行い、その結果を示す。また、得られたよりいくつかの視点から考察を行う 5.1 節では実験で得られたデータの処理・表示方法について、5.2 節では各 Pair が行った実験における 1 回目の試行の比較について 5.3 節では試行回数における状態切り替え回数の変化について、5.4 節では共同運転時間内における各運転状態の割合について述べる。

5.1 実験結果処理方法

実験は 6 組 12 人(「Pair 1」~「Pair 6」)で行った。結果は 2 人のドライバーそれぞれのトルクと操舵角を線グラフで示す。縦軸には、トルク[N・m]と操舵角[Rad]を、横軸には時間[s]をとる Figure 5.1 に得られた結果の例を示す。ドライバーA からドライバーB に運転主導権を受け渡すことを考えた時、赤いラインがドライバーA のトルクを、青いラインがドライバーB のトルクを示している。各値はドライバーA のみが運転している状態から測定を開始しているが、前後のドライバーA のみの運転、ドライバーB のみの運転部分を取り除き、2 人での共同運転をしている部分のみを取り出す。

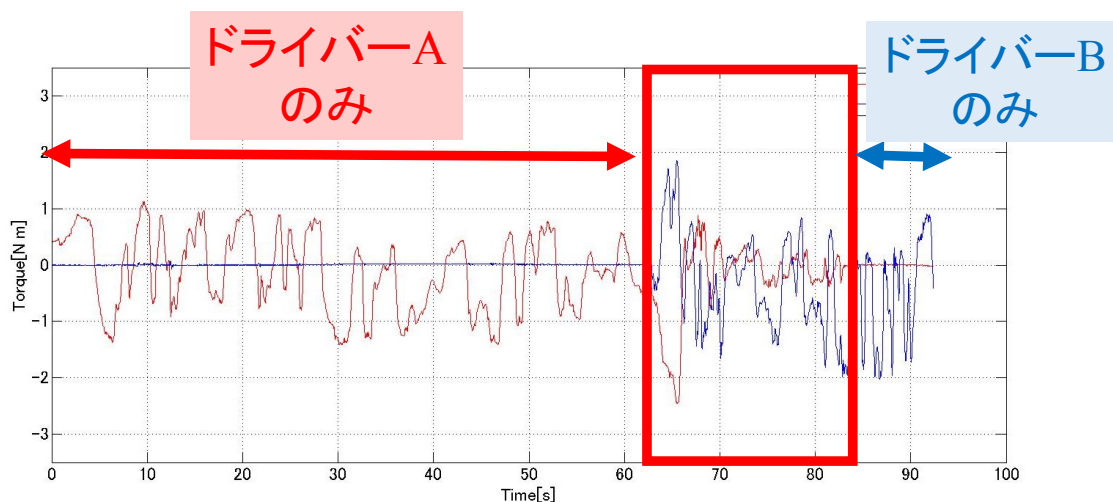


Figure 5.1 運転実験結果例

5.2 1回目の試行比較

この節では各組の1回目の運転実験での結果を示し、各組の特徴を考察、共通点等を調査する。第4章で記述した運転状態判断法に基づき0.1秒ごとに「ドライバーAエネルギー供給状態」と「ドライバーBエネルギー供給状態」、「両ドライバーエネルギー供給状態」の3つの状態を判断し、その結果を合わせてグラフに表示した。運転状態はグラフ上で色分けして表示されており、以下よりそれぞれのPairの結果とその特徴を記す。マゼンダのエリアがドライバーAエネルギー供給状態、シアンのエリアがドライバーBエネルギー供給状態、イエローのエリアが両ドライバーエネルギー供給状態を示している。

●Pair1 1 回目の試行

Figure 5.2 に Pair1 1 回目の実験結果を示す．共同運転は 21.3 秒間行われた．共同運転を開始したときドライバーA₁ とドライバーB₁ の互いのトルクが逆方向に大きく反発している．その後，約 67 秒～77 秒では，「ドライバーB₁ エネルギー供給状態」と「両ドライバーエネルギー供給状態」を繰り返した後，運転主導権を受け渡している．この区間，ドライバーA₁ とドライバーB₁ のトルクはどちらも 10 回程度符号を変えるように上下しているため，互いのトルク値が交差している．また，ドライバーB₁ の方がドライバーA₁ よりもトルクの値が大きく変動している．

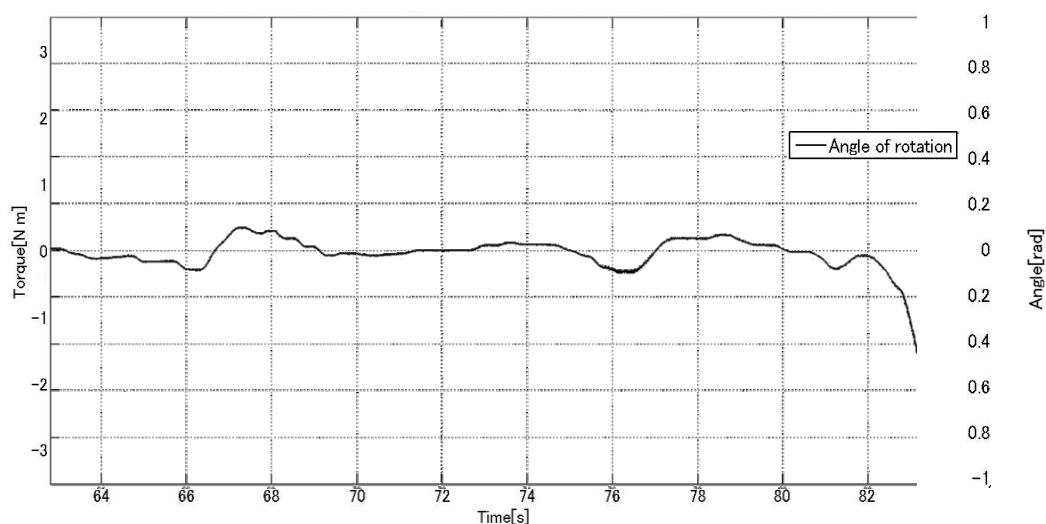


Figure 5.2 Pair1 1 回目の試行

●Pair2 1 回目の試行

Figure 5.3 に Pair2 1 回目の実験結果を示す．共同運転は 27.4 秒間行われた．共同運転を開始した時，ドライバーA₂ と B₂ の互いのトルクは 0 付近で細かく符号が入れ替わり，交差している．その後ステアリング大きく反発している．その後，約 104 秒~107 秒で 2 回操舵角が反時計回り，時計回りの順で大きく振れ，ステアリングが回った時，ドライバーB₂ のトルクの値が符号を変えて大きく上下している．その後 3 つの状態を細かく繰り返した後，運転主導権を受け渡している．この区間，ドライバーA₂ とドライバーB₂ のトルクはどちらも符号を変えるように上下しているため，互いのトルク値が交差している．また，ドライバーB₂ の方がドライバーA₂ よりもトルクの値が大きく変動している．

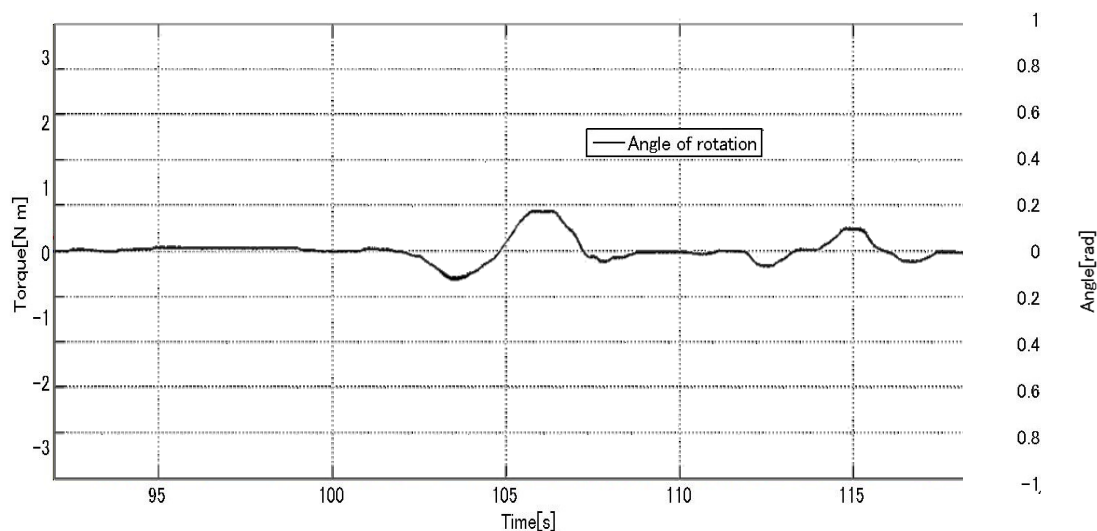


Figure 5.3 Pair2 1 回目の試行

●Pair3 1 回目の試行

Figure 5.4 に Pair3 1 回目の実験結果を示す．共同運転は 19.2 秒間行われた．共同運転を開始した時ドライバーA₃ と B₃ の互いのトルクに大きな変化は無いが，その後，約 67 秒~73 秒で 2 回操舵角が反時計回り，時計回りの順で振れ，ステアリングが回った時，ドライバーA₄ とドライバーB₁ の互いのトルクが逆方向に大きく反発している．ドライバーB₃ のトルクの値が符号を変えて大きく上下している．その後，約 67 秒~運転主導権の委譲が完了するまでは，大きく分けて，「両ドライバーエネルギー供給状態」→「ドライバーA₃ エネルギー供給状態」→「ドライバーB₃ エネルギー供給状態」の順番で遷移している．この間，ドライバーA₃ とドライバーB₃ のトルクはどちらも一度も交わることが無く，各ドライバーのトルクの値はドライバーA₃ では正，ドライバーB₃ では負と分かれている．また，ドライバーB₁ の方がドライバーA₁ よりもトルクの値が大きく変動している．

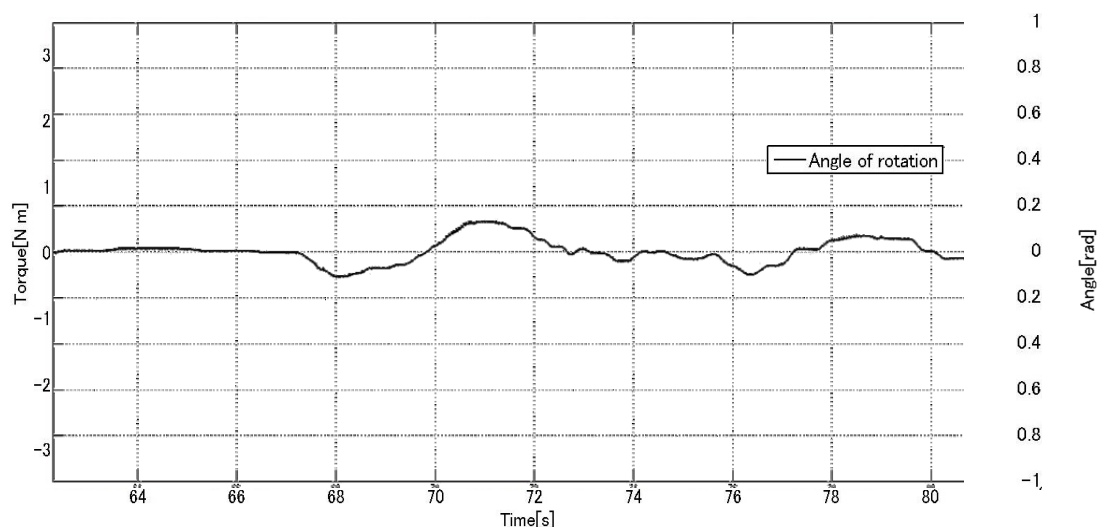


Figure 5.4 Pair3 1 回目の試行

●Pair4 1 回目の試行

Figure 5.5 に Pair4 1 回目の実験結果を示す．共同運転は 27.0 秒間行われた．共同運転を開始したときドライバーA₄ のトルクの値は符号を変えながら振れている．その後約 73 秒~77 秒で操舵角が正の方向に振れ，ステアリングが時計回りに回った時，ドライバーA₄ は正の方向に，ドライバーB₄ は負の方向に，互いのトルクが逆方向に大きく反発している．その後，約 77 秒~運転主導権の委譲が完了するまでは，大きく分けて，「ドライバーA₄ エネルギー供給状態」と「両ドライバーエネルギー供給状態」を交互に繰り返した後，運転主導権を受け渡している．この間，ドライバーA₄ とドライバーB₄ のトルクの値は，途中交わることもあるものの，ドライバーA₄ では正，ドライバーB₄ では負と分かれている．また，ドライバーA₄ の方がドライバーB₄ よりも値が大きく変動している．

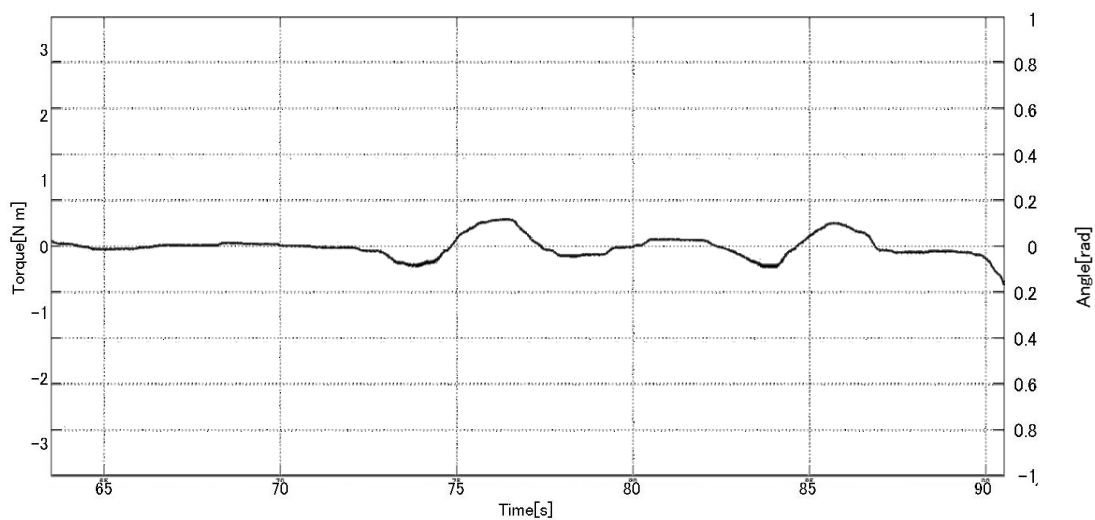


Figure 5.5 Pair4 1 回目の試行

●Pair5 1 回目の試行

Figure 5.6 に Pair1 1 回目の実験結果を示す．共同運転は 14.7 秒間行われた．共同運転を開始したときドライバーA₅ とドライバーB₅ のトルクの値はどちらも負の方向に振れている．その後，約 71 秒~73 秒で 2 回操舵角が反時計回り，時計回りの順で振れ，ステアリングが回った時，ドライバーA₅ とドライバーB₅ の互いのトルクが逆方向に 2 回反発している．約 74 秒~79 秒までは，「ドライバーB₅ エネルギー供給状態」が多く続き，その後状態の切り替えが行われた後，運転主導権を受け渡している．この間，ドライバーA₅ とドライバーB₅ のトルクの値は，途中 2 回交わることがあるものの，ドライバーA₅ では正，ドライバーB₅ では負と分かれている．

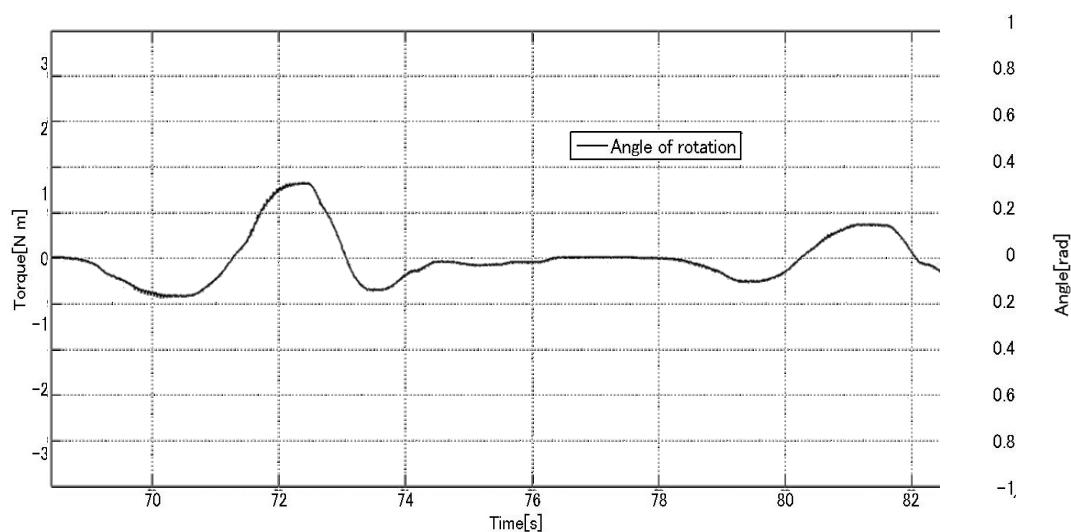


Figure 5.6 Pair5 1 回目の試行

●Pair6 1 回目の試行

Figure 5.7 に Pair1 1 回目の実験結果を示す．共同運転は 13.7 秒間行われた．共同運転を開始したときドライバーA₆ とドライバーB₆ のトルクの値はどちらも負の方向に振れている．その後，約 62 秒~65 秒で 2 回操舵角が反時計回り，時計回りの順で振れ，ステアリングが回った時，ドライバーA₆ とドライバーB₆ の互いのトルクが逆方向に大きく反発している．各ドライバーのトルクの値は，約 65 秒~71 秒の間，ドライバーA₆ では正，ドライバーB₅ では負と分かれている．

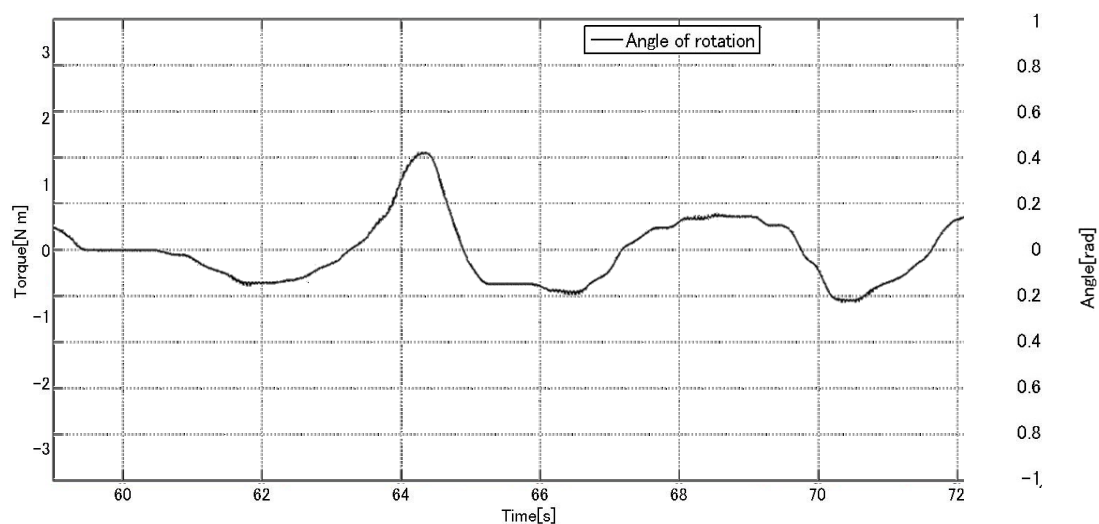


Figure 5.7 Pair 6 1 回目の試行

●1 回目の試行で共通して現れた特徴

Pair1~6 の被験者による 1 回目の試行で現れた共通する特徴を次に示す.

- ・共同運転を開始したとき, またはステアリングを回した時, ドライバーA とドライバーB のトルクが反発する.
- ・ドライバーA とドライバーB のトルクの値の符号が入れ替わり, 互いに交わる場合が多い場合, 状態の切り替え回数が増える.
- ・ドライバーA とドライバーB のトルクの値の符号が固定され, 互いに交わる場合が少ない場合, 状態の切り替え回数が減る.

ただし, 1 回目の試行ではそれぞれの組で違う特徴が現れたため, 被験者の性格・組み合わせにより状態の遷移傾向は変化するといえる.

5.3 試行回数による変化

この節では試行回数での状態切り替え回数の変化を調査する. 前節と同様, 第 4 章で示した運転状態判断方法を使用することで, 0.1 秒ごとに 3 つの状態に分類する. 例として, Pair1 の結果を抜き出し, Figure 5.8~5.17 に pair1 の 10 回の試行結果を示す.

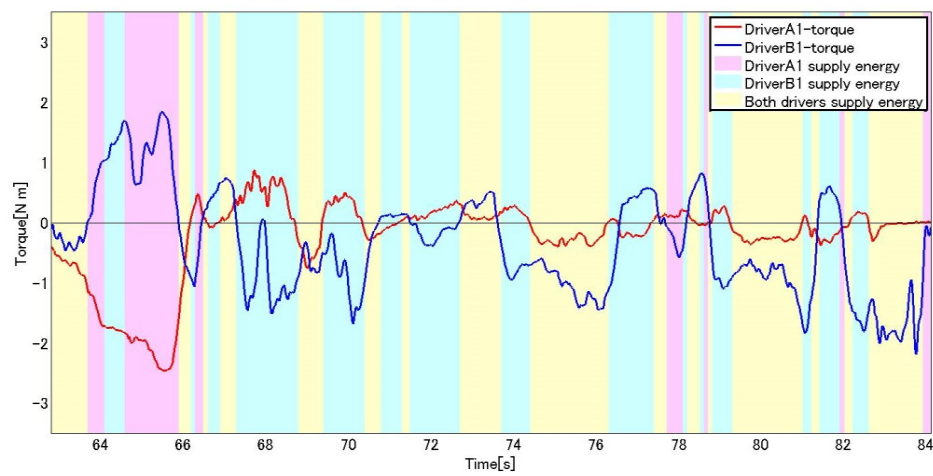


Figure 5.8 pair1 1回目の試行

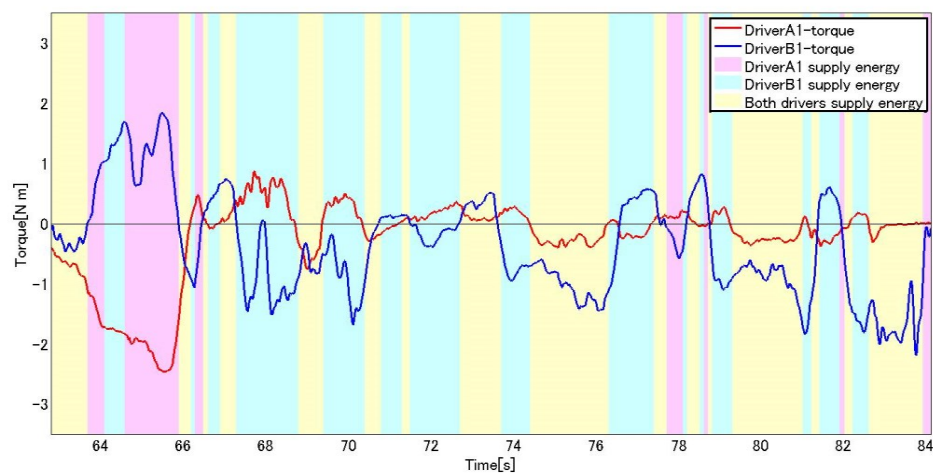


Figure 5.9 pair1 2回目の試行

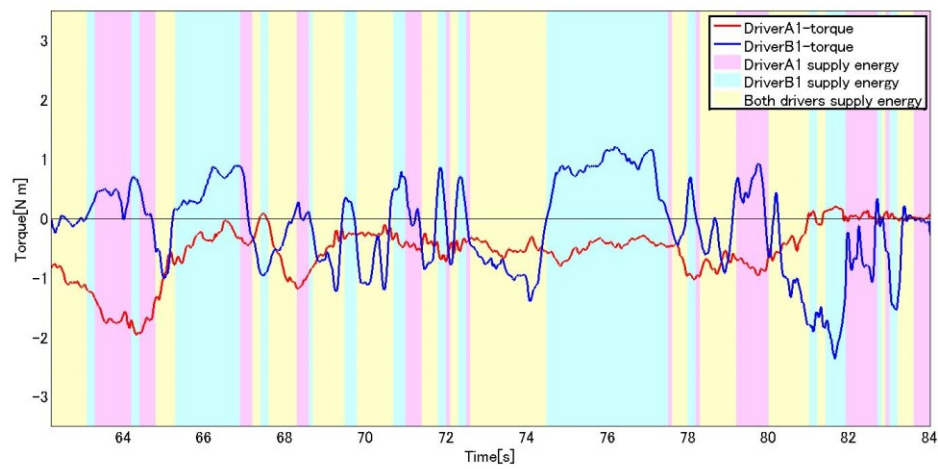


Figure 5.10 pair1 3回目の試行

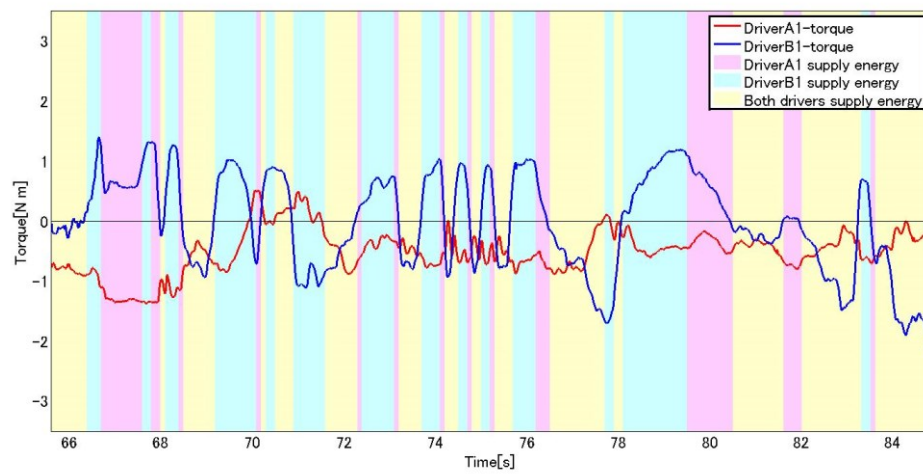


Figure 5.11 pair1 4回目の試行

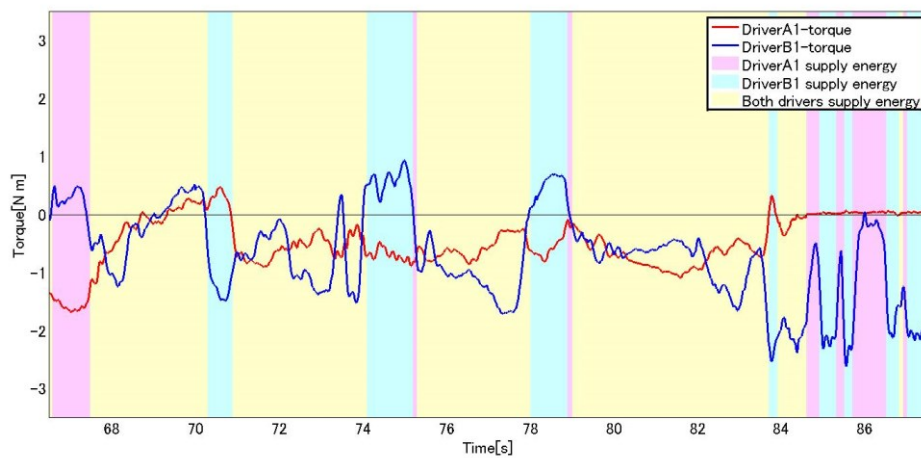


Figure 5.12 pair1 5回目の試行

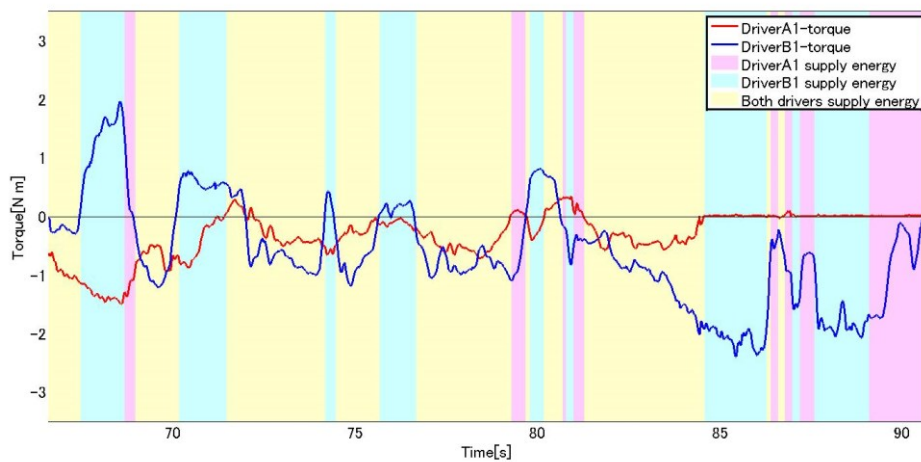


Figure 5.13 pair1 6回目の試行

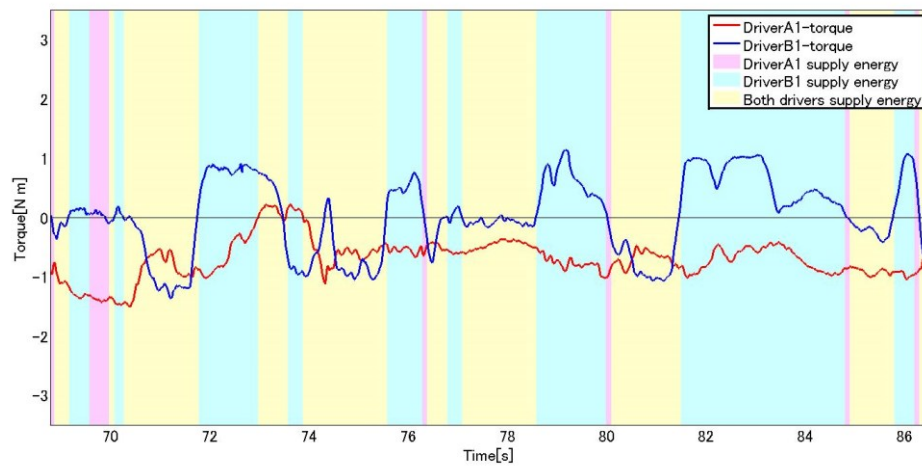


Figure 5.14 pair1 7回目の試行

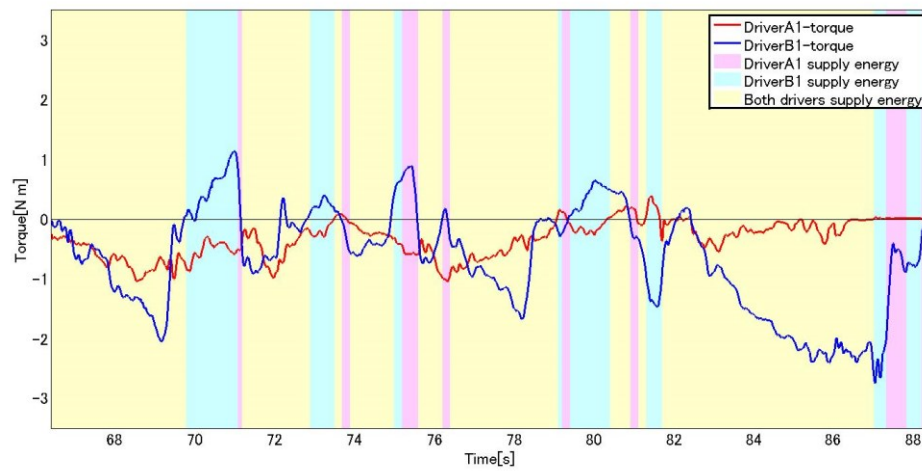


Figure 5.15 pair1 8回目の試行

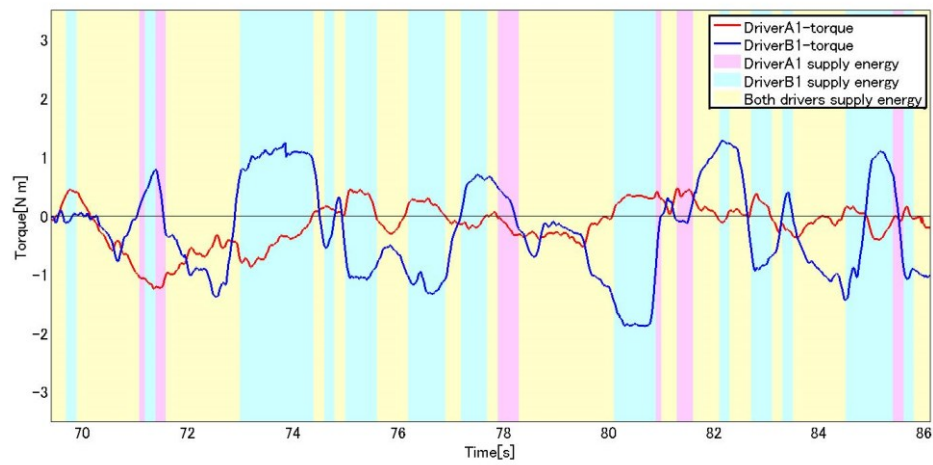


Figure 5.16 pair1 9回目の試行

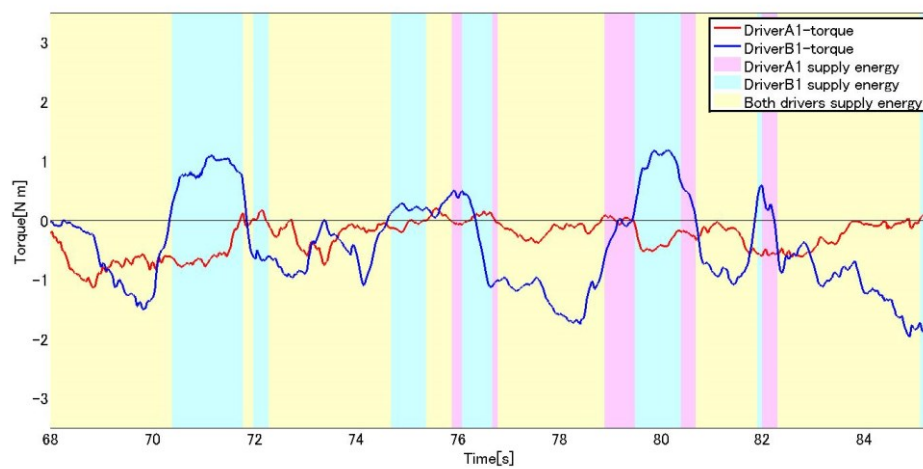


Figure 5.17 pair1 10回目の試行

施行ごとに状態の「切り替え回数」を調査する．状態が切り替わるとは，グラフ上で示すところの色が変わる回数である．各被験者の Pair ごとに切り替わる回数をまとめたものを Table5.1 に，グラフにしたものを Figure 5.8 に示す．

Table5.1 各 Pair の状態切り替え回数

試行回数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pair1	46	46	52	43	24	30	27	29	35	22
Pair2	62	49	48	49	29	40	43	32	21	47
Pair3	43	24	21	13	21	18	21	15	24	19
Pair4	29	26	46	47	26	24	26	31	48	49
Pair5	19	15	17	22	17	37	31	15	25	16
Pair6	20	36	25	17	30	29	47	52	22	30

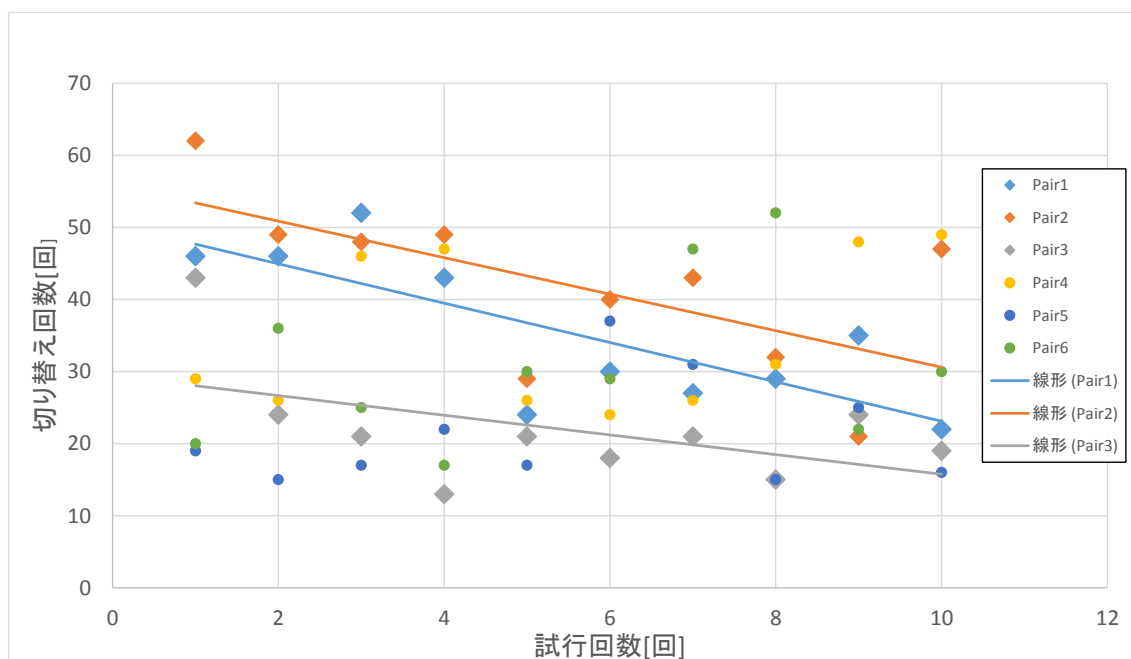


Figure 5.18 試行回数に対する状態切り替え回数

この結果の中で，特に Pair1, Pair2, Pair3 に注目する．この 3 組は 1 回目の試行で状態切り替え回数が比較的多く 40 回以上である．Figure 5.8 では，この 3 組の結果を直線近似したグラフを追加した．それぞれの近似式は Pair1: $-2.7x+50.4$ ，Pair2: $-2.5x+55.9$ ，Pair3: $-1.4x+29.4$ となる．このことから，試行回数が増えていくにつれ，状態切り替えの回数が減る傾向が認められる．したがって，協調性の学習が行われているといえる．

5.4 運転状態の時間割合

この節では共同運転時間内の各運転状態の時間的割合について論ずる．共同運転を行っている全体の時間を 1 とした時，4 章で述べた運転状態判断法にて分類された運転状態の割合を求める．Figure 5.9～5.14 に各 Pair の運転状態の時間割合を示す．横軸を試行回数，縦軸を状態の割合とする．マゼンダのエリアがドライバーA エネルギー供給状態，シアンのエリアがドライバーB エネルギー供給状態，イエローのエリアが両ドライバーエネルギー供給状態を示している．また Table5.2 に全 Pair の時間割合の平均についてまとめたものを示す．

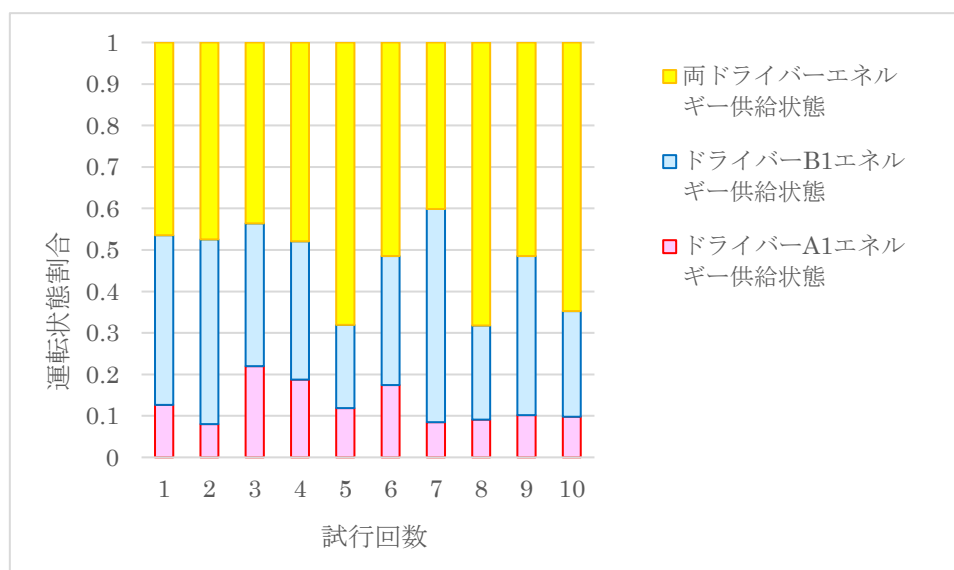


Figure 5.19 Pair1 運転状態の時間割合

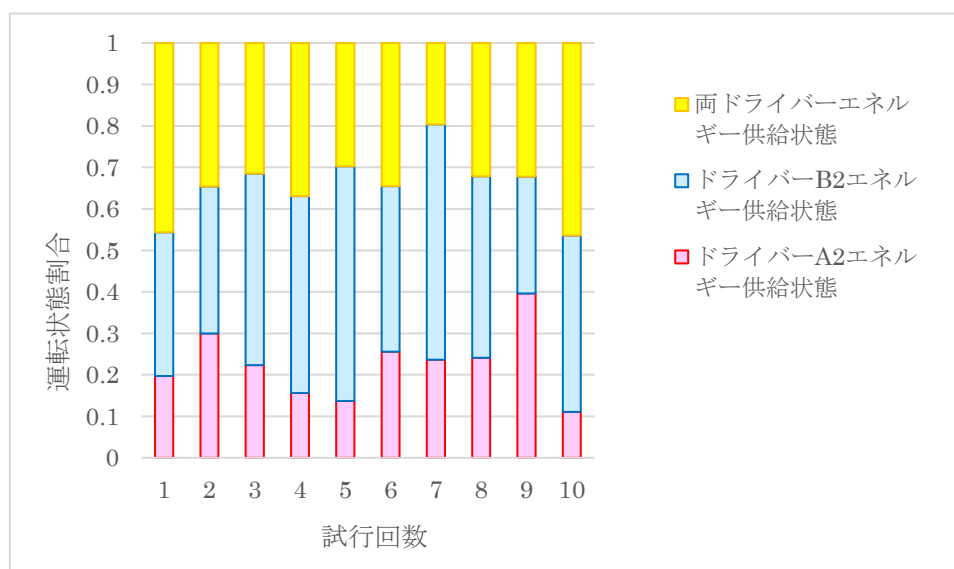


Figure 5.20 Pair2 運転状態の時間割合

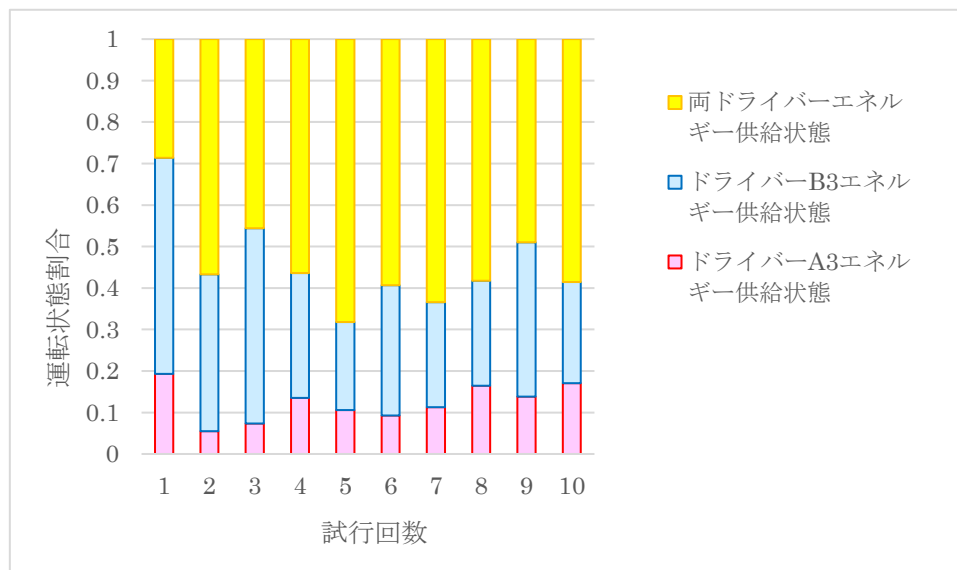


Figure 5.21 Pair3 運転状態の割合

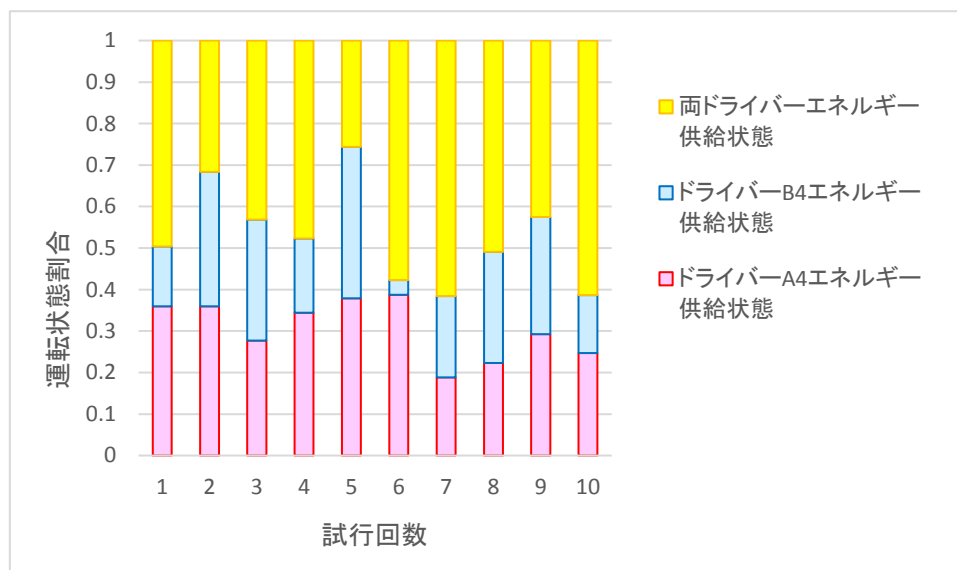


Figure 5.22 Pair4 運転状態の割合

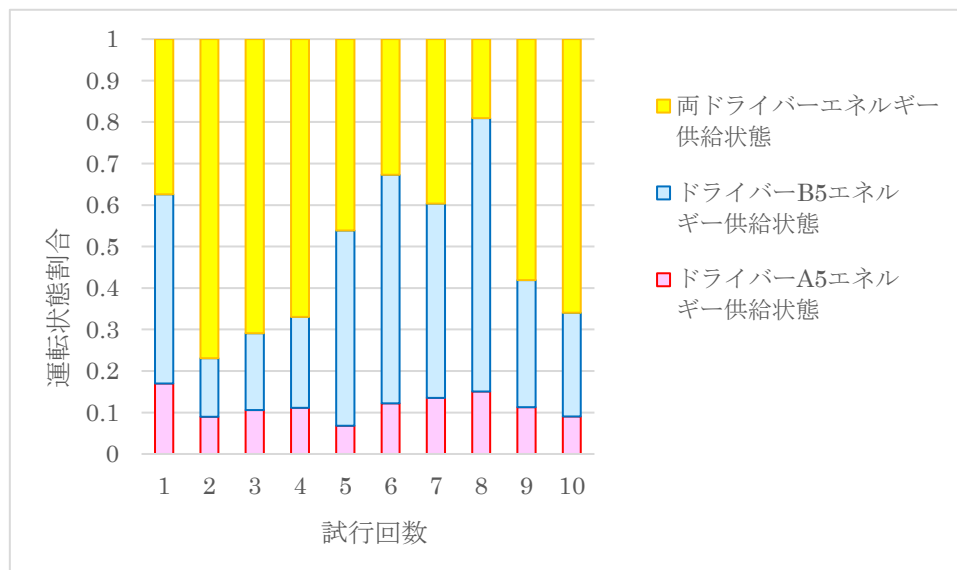


Figure 5.23 Pair5 運転状態の割合

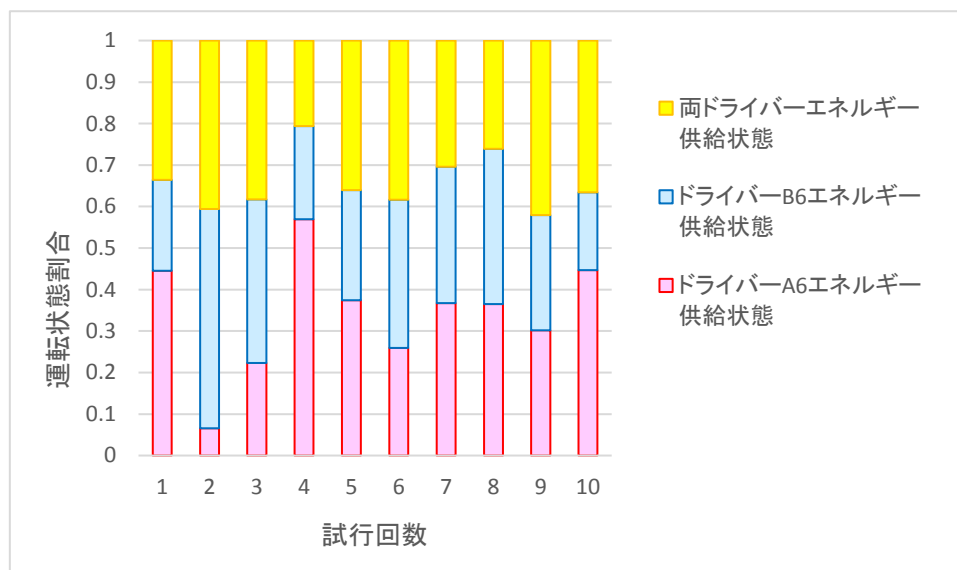


Figure 5.24 Pair6 運転状態の割合

Table5.2 各 Pair の運転状態の時間割合の平均

試行回数	ドライバーA エネルギー 供給状態	ドライバーB エネルギー 供給状態	両ドライバー エネルギー 供給状態
Pair1	13.0%	34.0%	53.0%
Pair2	21.9%	43.1%	35.0%
Pair3	12.8%	33.6%	53.6%
Pair4	30.3%	22.6%	47.1%
Pair5	11.5%	37.4%	51.1%
Pair6	33.6%	32.1%	34.3%

各 Pair の運転状態の時間割合より，Pair2 以外は 3 つの状態のうち両ドライバーエネルギー供給状態がもっとも多いことが分かった．この結果から，人間同士が共同で運転動作を行う時，両ドライバーエネルギー供給状態になることが多く，この状態を介すことで違和感無く運転主導権の委譲を行うことができると考えられる．

第 6 章

結言

6.1 まとめ

本研究では、スムーズな運転主導権の受け渡しができる自動運転実現のため、2 人の人間で協調運転をさせ、人間同士の運転主導権の受け渡しプロセスを解析することを目的とした。

人間同士の協調運転特性を明らかにするため、実験装置には 2 つのステアリングをタイミングベルトで連結し、連動させた専用のドライビングシミュレーターを製作した。各ドライバーのステアリングごとに右手・左手の力を測定することが可能で、各ドライバーのアクセルペダル・ブレーキペダルからの踏み込み量とステアリングからの操舵角を使用し操作を行う。実験は 2 人 1 組で行い、各組 10 回走行した。走行環境は高速道路のインターチェンジにて車線変更を行い、高速道路から降りる運転動作とした。ドライバー A からドライバー B へ運転主導権を受け渡す事を想定し、まず、ドライバー A のみが運転を行い、その後ドライバー B がステアリングを保持、運転に介入する。この時点でドライバー 2 人による運転が開始され、そのまま車線変更を行う。車線変更を行ったのちドライバー A がステアリングを手放しドライバー B のみの運転に移るように指示し実験をした。

2 人の間での運転主導権を受け渡す状況を解明するため、両者間でのエネルギーの流れに注目し、3 つの状態に分類した。計測した操舵角から角速度を、各ドライバーがステアリングにかけたトルクから力積を導出する。角速度と力積から各ドライバーがステアリングに与えるエネルギーを算出し、各値の正負より「ドライバー A エネルギーを供

給状態」と、「ドライバーB エネルギーを供給状態」、さらに、「両ドライバーエネルギーを供給状態」に分類して遷移の特性について分析した。

実験結果より、各組 1 回目の状態遷移について、それぞれの組で状態の切り替え回数やトルクの変化の様子が異なった。このことから、被験者の性格・組み合わせにより状態の遷移傾向は変化することがわかる。また、状態切り替え回数は、1 回目の試行で状態切り替え回数が 40 回以上と多い場合、試行回数を増やし回数をこなすことで減少した。このことから協調性の学習が行われたといえる。各組の運転状態の時間割合の平均を取ったとき 3 つの状態のうち両ドライバーエネルギー供給状態がもっとも多いことが分かった。この状態を介すことで違和感無く運転主導権の委譲を行うことができると考えられる。今後は、状態の遷移状況をいくつかのパターンに分類することで自動運転システムへの応用を目指す。

5.2 今後の課題

取得したデータを状態分類法に使用し、解析を行った結果、各組に似たような特徴は見られたものの、パターンとして分類するに至らなかった。そのため、実験を行い、取得データを増やすことでパターン分類を可能にする。また、運転動作に性格・組み合わせが影響するのか調べるため、診断テスト等により、各個人の性格を取得する。今後はこれらの手法より、人間同士の協調運転特性をより明らかにすることで今回達成することのできなかった自動運転システムへの応用を目指す。

参考文献

- [1] 国土交通省：現在実現している運転支援システムの概要，オートパイロットシステムに関する検討会，第1回，参考資料2
<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/autopilot/pdf/9.pdf>
- [2] SAE International：Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles J3016_201609,
https://www.sae.org/standards/content/j3016_201609/
- [3] Audi：A8 商品紹介 <https://www.audi.co.jp/jp/web/ja/models/a8/a8.html>
- [4] N. Merat A. H. Jamson, F. C. H. Lai, M. Daly, & O. M. Daly, & O. M. J. Carsten,
 “Transition to manual: Driver behaviour when resuming control from highly
 automated vehicle”, *Transportation Research Part F: Traffic psychology and Behaviour*, vol.27,
 pp.274-282,2014
- [5] B. Mok, M. Johns, K. J. Miller, D. Sirkin, P. Ive, & W. Ju, “Emergency, Automation Off:
 Unstructured Transition Timing for Distracted Drivers of Automated Vehicles”, *IEEE 18th
 International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 2458-2464, 2015
- [6] A.P.Beukel,&M.C.Voort,”The Influence of Time-criticality on Situation Awareness when
 Retrieving Human Control after Automated Driving”, *IEEE 16th International Conference on
 Intelligent Transportation Systems*, 2013
- [7] H.E.B.Russell, L.K.Harbott, I.Nisky, S.Pan, A.M.Okamura,&J.C.Gerdes,”Motor learning
 affects car-to-driver handover in automated vehicles”, *Machine-Human Interactions*,
 vol.1,no.1,2016

- [8] T.Wada, K.Sonoda, T.Okasaka, & T.saito, “Authority Transfer Method from Automated to Manual Driving via Happtic Shared Control”, *IEEE International Conference on System, Man, and Cyvernetics*, 2016

謝辞

本研究を進めるにあたり、三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 池浦良淳教授には研究に関する有益な御助言を頂き、深く感謝致します。厚く御礼申し上げます。また、御多忙の中本論文を査読して頂くとともに、多数のご教示、ご助言を賜りました三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 早川聡一郎准に厚く御礼申し上げます。さらに、実験装置の製作にあたり、親身な御協力、御尽力、アドバイスをくださった澤井秀樹技官に厚く御礼申し上げます。本研究を行うに際しまして、御多忙の中実験に協力していただきました被験者の皆様には貴重な時間を割いていただき、厚く御礼申し上げます。そして、先輩方、同期各氏、後輩各氏のおかげで、充実した研究室生活を送ることができました。これら各位のご指導、ご協力に対し、心より御礼申し上げます。最後に、学部・修士の間、より勉強をしたいという私の我儘に対して快く賛同して頂き、また惜しみない援助を送ってくださった家族のお陰で充実した素晴らしい勉強・研究生生活を送ることができました。感謝の気持ちを述べることで謝辞の最後とさせていただきます。