
平成 30 年度 修士学位論文

自動運転への適用を前提とした
2 人の人間の協調運転解析

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

羽柴 洋太

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	6
1.3 本論文の構成	7
第2章 実験.....	8
2.1 実験目的	8
2.2 実験装置概要	9
2.3 ステアリング装置機構	12
2.3.1 土台レール	12
2.3.2 モーター	13
2.3.3 軸受け.....	13
2.3.4 タイミングベルト, タイミングプーリー.....	14
2.3.5 ポテンションメーター	15
2.3.6 ステアリング	16
2.4 走行環境	17
2.4.1 想定状況	17
2.4.2 車線変更.....	18
2.5 走行状態	19
2.6 実験方法	20
第3章 評価方法.....	21
3.1 力学モデル.....	21
3.2 運転状態判断法	23
・ドライバーA エネルギー供給状態.....	24
・ドライバーB エネルギー供給状態.....	24
・両ドライバーエネルギー供給状態	24
3.3 協調運転中の各被験者の仕事	25
3.4 主観評価による主従判定.....	26
3.5 トルク, 角速度の相関	27

第 4 章 実験結果, 考察	30
4.1 運転状態判断法による評価	30
4.1.1 両エネルギー供給状態時間割合	32
4.1.2 運転状態切り替え回数	38
4.2 運転操作仕事量変化	40
4.3 トルク角速度相関と主観評価	45
第 5 章 結論	48
参考文献	50

第 1 章 序論

1.1 研究背景

現在，自動車関連企業の他に IT 関連企業等が自動車の自動運転化の技術の確立を目指し研究・開発が行われている．運転支援システムとして ACC(Adaptive Cruise Control), CACC(Cooperative Adaptive Cruise Control), 衝突被害軽減ブレーキ，レーンキープアシスト等が実際に自動車に搭載されている．ACC は，自動車に搭載されたレーダーと CPU を使用，走行中に前方車との車間距離を計測し，車間距離を一定に保ちつつ定速走行を自動車自体が担うものである^[1]．CACC は ACC の発展型で，車両同士が通信を行うことによってそれぞれの車両の制御情報を共有し，前方車との車間距離に加え，前方車の加減速の情報を得る事で正確に車間距離の制御を行うシステムである．従来の ACC と比べ応答遅れや車間距離の変動を少なく，利用可能な環境が増える事で，走行時の運転車の疲労軽減，無人隊列走行の実現が期待されている^[2]．衝突被害軽減ブレーキは，車両に搭載されたカメラやレーダー等の情報から前方の自動車や歩行者といった障害物を検知した場合，音や警告を用いてドライバーに対して警告を行う．衝突が回避できない場合とシステムが判断した場合には，被害軽減のために自動的にブレーキ操作を行うシステムである^[3]．レーンキープアシストは，車両に搭載したカメラ等で道路の白線等を検知，車線を認識し，車両が走行中車線を維持できるよう，ステアリング操作を支援する．車線逸脱時のみ警告を発するものや車線維持をシステムが担うものがある^[4]．これらの技術を組み合わせ発展応用させていく中で自動化レベルの定義がされた．

現在主に用いられるものとして，SAE International (Society of Automotive Engineers International) が定めた「SAE J3016」がある．この基準では自動運転化技術のレベルは

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動作を行う。レベル 1 はシステムが運転動作の一部を支援，運転の縦方向または横方向の運動制御を行う。レベル 2 はシステムが複数の運転動作を担う事で，事実上システムが運転するものであるが，ドライバーは運転環境を監視し続ける必要があり，制約としてステアリングに手をかける必要がある。現在実用されている自動運転技術はこのレベル 2 までのものが多い。レベル 3 はシステムが高速道路等の一定の条件化の下で運転環境を監視するとともに，運転操作を実行するが，人間はシステムからシステム限界時等に操作要求された場合，操作を担う準備をする必要がある。レベル 4 はシステムが一定条件化の下で運転環境を監視し，すべての運転操作を実行することができ，人間が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，すべての運転操作を実行することができる^[5]。自動運転のレベルの基準を Table1.1 に示す。

各企業はレベル 3 の自動運転技術が実用化，商品化を目指している。アウディ社は 2018 年に世界初のレベル 3 相当のシステムを搭載した「A8」を発売予定であったが，各国の法整備等の問題があり，システムの搭載を断念した経緯がある^[6]。レベル 3 の実用化には多くの問題があり，安全性に疑問が生じる場面も想定されている。この問題の 1 つとして運転主権の移行が挙げられる。レベル 3 では，一定条件下でのみシステムが運転操作を担う事ができるが，システム限界時にシステムから人間へ運転の主権を受け継ぎ，人間が運転を続ける必要がある。この受け渡しの際，システムと人間が運転主権を共有するため，ドライバーとシステムの意図が異なった場合，操舵安定性，車両安全性が低下することで重大な事故につながる恐れがある。将来自動化レベル 3 の自動車が普及するに伴い，このような移行直後の事故が頻繁に発生すると考えられ，実際に自動運転の試験走行中，システムから人間への運転主権の移行直後に追突事故が起きている^[7]。

この問題に対して，各研究機関により研究が行われている^{[8]-[12]}。Merat, Mok らは運転主権の切り替え時，ドライバーがシステムから運転主権を安全に引き継ぐために所要時間に 5~15 秒程度必要であることを示した^{[8][9]}。その他に，ドライバーの操舵・加速の特

性に着目したものがあり、Beukel らの研究ではドライバーの状況認識と危機回避能力の関係を^[10]、Russell らによる研究では自動運転におけるドライバーの運転技術の学習過程の特性を調査している^[11]。また運転主権を安全に受け渡すために人間の覚醒度による影響を調査したものもあり、本間らは人間の覚醒度の低下が移行動作に及ぼす影響を考慮し、移行動作中のドライバーの行動について述べている。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権の移行に対し、様々な方向からの解決が模索されている。

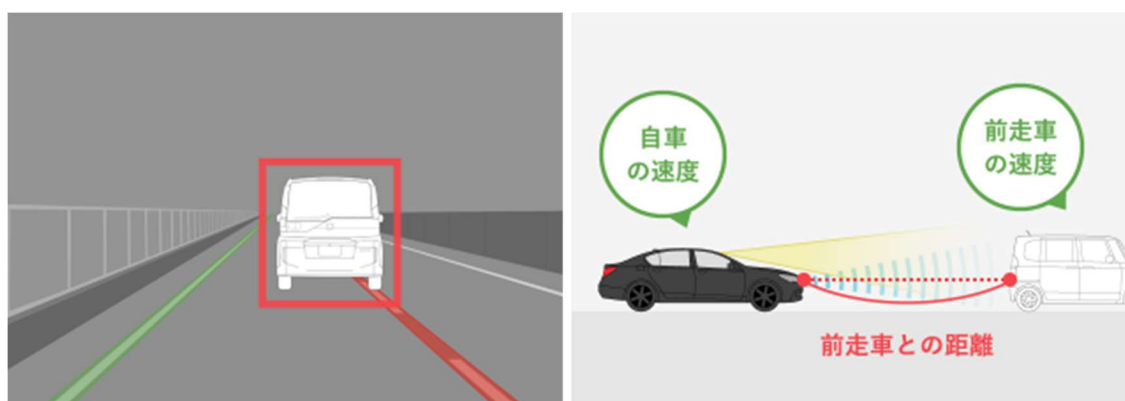


Fig.1.1 ACC



Fig.1.2 CACC

衝突被害軽減ブレーキの概要

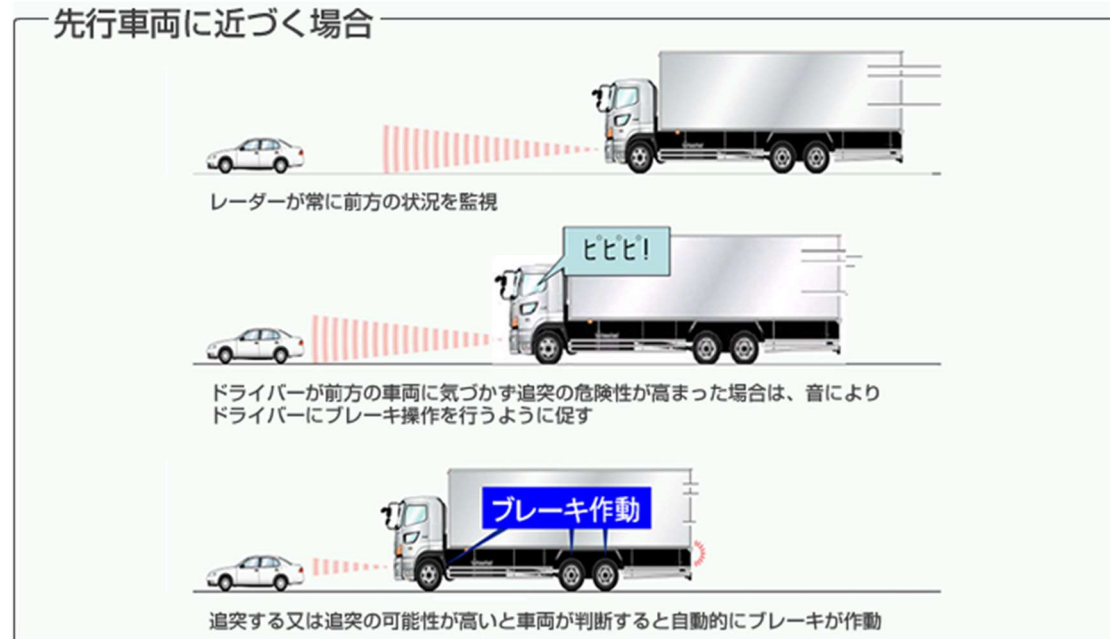


Fig.1.3 Autonomous Emergency Braking

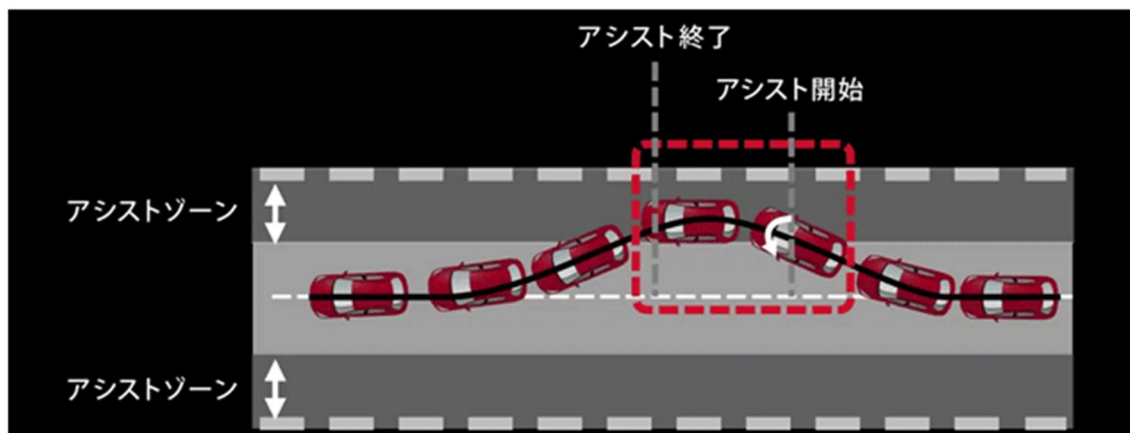


Fig.1.4 Lane keep assist

Table1.1 Automation level

SAE level	Name	Narrative Definition
0	No Automation	The full-time performance by the human driver of all aspects of the dynamic driving task, even when enhanced by warning or intervention systems.
1	Driver Assistance	The driving mode-specific execution by a driver assistance system of either steering acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the human driver perform all remaining aspects of the dynamic driving task.
2	Partial Automation	The driving mode-specific execution by one or more driver assistance systems of both steering and acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the human driver perform all remaining aspects of the dynamic driving task.
3	Conditional Automation	The driving mode-specific performance by an automated driving system of all aspects of the dynamic driving task with the expectation that the human driver will respond appropriately to a request to intervene.
4	High Automation	The driving mode-specific performance by an automated driving system of all aspects of the dynamic driving task, even if a human driver does not respond appropriately to a request to intervene.
5	Full Automation	The full-time performance by an automated driving system of all aspects of the dynamic driving task under all roadway and environmental conditions that can be managed by a human driver.

1.2 研究目的

現在のレベル 2 相当におけるシステムの限界時ではシステムは予告，運転の共有状態が無くドライバーへ運転主権を移行している．これはシステム限界時，急にステアリングにかかっているシステム側の力がなくなる状況である．この現状に対し，齋藤らによる研究では Shared control という人間・システムの共同運転状態を介することによる操舵，車両安定性の向上提案し，ドライバーへの運転主権の移行方法を検討している^[13]．

また，システムの条件として人間に対して受容性の高いものが要求される．人間に対して受容性の高いシステムを求める場合，人間と機械の協調性に着目する事が重要である．これに対して，人間の他者に対して挙動を合わせ協調性や物事に臨機応変に対応する事ができる応用性に注目し，機械側の動きを人間の動きに似せる事によって協調性を高める手法が提案されてきた．Shahriman らは人間同士の協調特性を解析，得られた特性をシステムに適応する事で，人と機械が協調する制御手法を提案している^[14]．これらを元に服部，著者らは運転主権の共有運転を人間同士で行い，協調して運転動作を行なう協調運転におけるステアリング操作をエネルギー授受の関係で判別する方法を提案した^[15]．

先行研究より人間とシステムで力を共有する状態を介して受け渡す手法が操舵・車両安定性の向上に影響すると考えられる．本研究はシステムから人間への運転主権の移行問題に対して，共同運転状態を通しての運転主権の移行と、人間同士による協調特性に着目し人間同士での運転主権の移行を行う．この運転主権移行の特性を解析する事で，最終的に自動手運転システムへの適応を目標とする．

1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す．第 2 章では実験目的と製作した専用の実験装置等の実験環境と実験方法について述べる．第 3 章では実験で得られたデータの評価方法を述べる．第 4 章で実験結果と考察を第 5 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 実験

2.1 実験目的

本研究の実験では本来システム，ドライバー間で行われる運転主権の移行を 2 人の人間での運転を行う．運転補助システムの搭載された自動車を運転する場合，運転の主権を持つものはシステムとドライバーの 2 者である．運転主権の移行中はどちらか一方が運転操作を行うのではなく，共に運転操作を行う共同運転状態を通すことで，操作安定性の向上を目指す．さらにこの運転主権の移行を人間同士で行うことにより，人間の協調性，応用性を以ってどのように移行が行われるか測定する．得られる車両挙動，ステアリング入力，被験者の主観評価を以って安全かつスムーズな運転主権の移行を目指す．人間同士で自動車の主権の移行を行うためには，同時に 2 人の人間が同一の自動車の運転操作を行える環境でなくてはならない．通常の自動車，走行環境では不可能なため専用の装置を設計・製作した．本章では，実験に使用，作成した実験装置について測定機構など詳細部を含め，述べる．

2.2 実験装置概要

Fig.2.1 に実験風景を，Fig.2.2 に装置概要図を示す．実験装置は 2 人の人間 が同時に同一の車両を操作可能でなくてはならない．実験環境として実車での実験は安全性の確保が難しいため PC 上のドライビングシミュレーター(DS)を使用し，モニターに走行環境を表示させた．二人の人間の運転を実現可能とするよう，2 つのステアリングをタイミングベルトで連結し，連動させた機構となっている．このステアリングから被験者がステアリング操作に要したトルクを測定する．被験者は 2 人横並びで運転を行うため，実験条件として相手の手元を見て判断しないよう，互いを視覚的に遮断する仕切りを設置した．二人のドライバーに与えられるアクセルペダル，ブレーキペダルは，踏み込み量が多い方を指令値として採用する．

Fig.2.3 に実験装置の構成図を示す．各被験者に対してステアリング，シート，ブレーキ，アクセル，モニターを用意する．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．

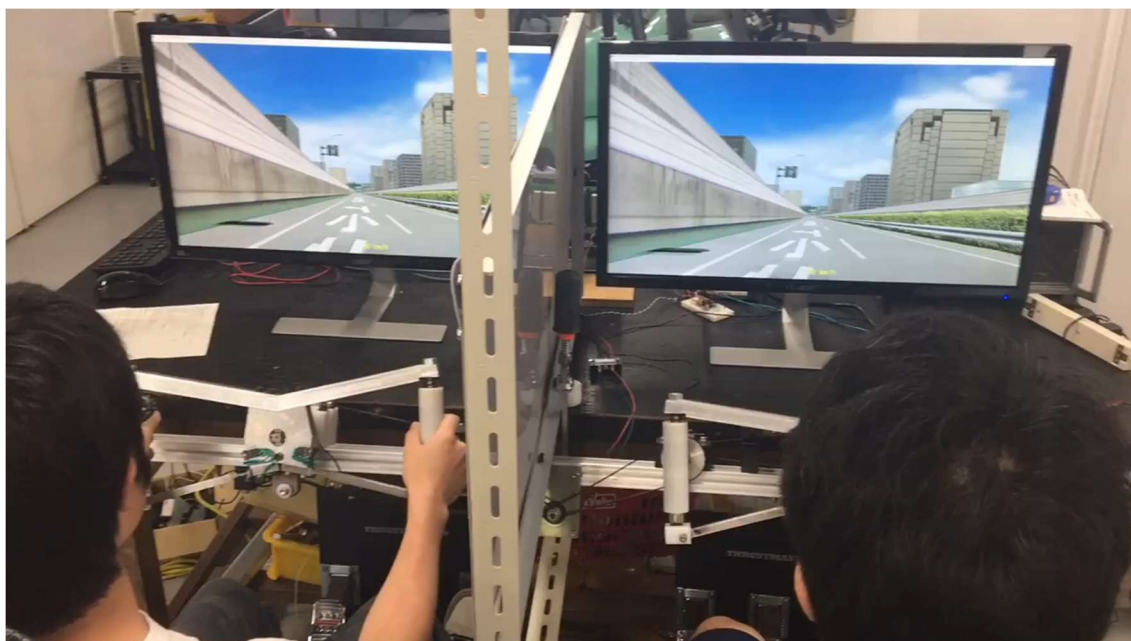


Fig.2.1 Experimental landscape

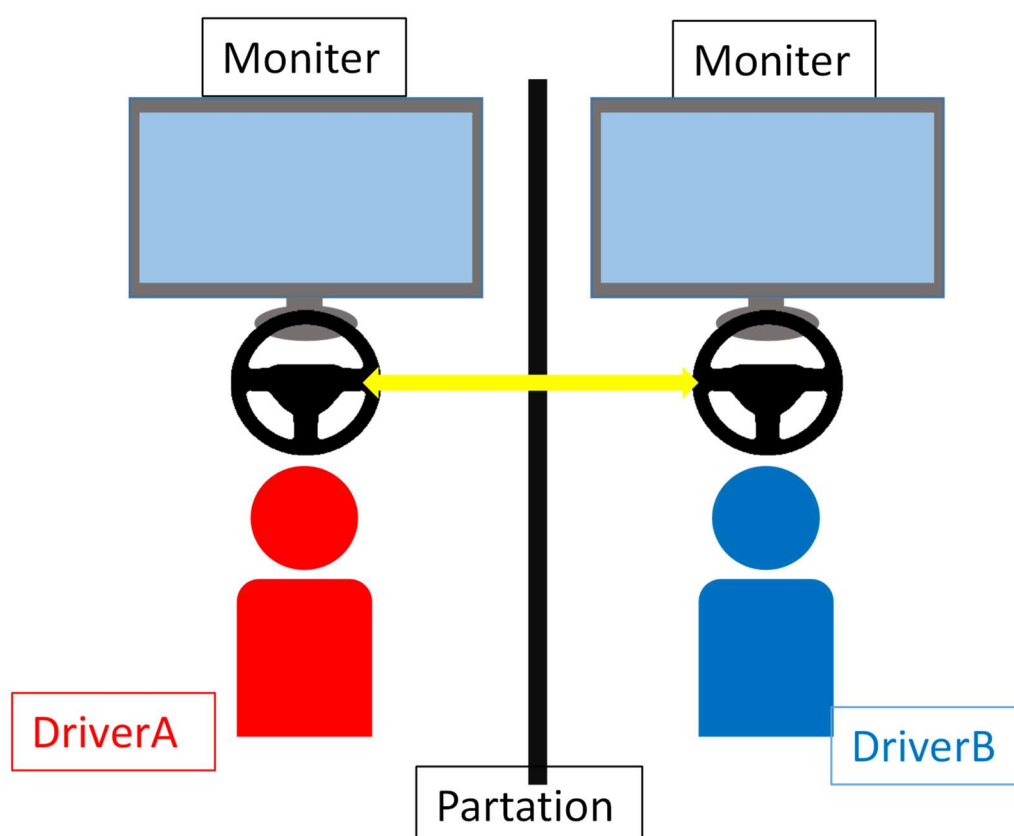


Fig.2.2 Schematic views of the equipment

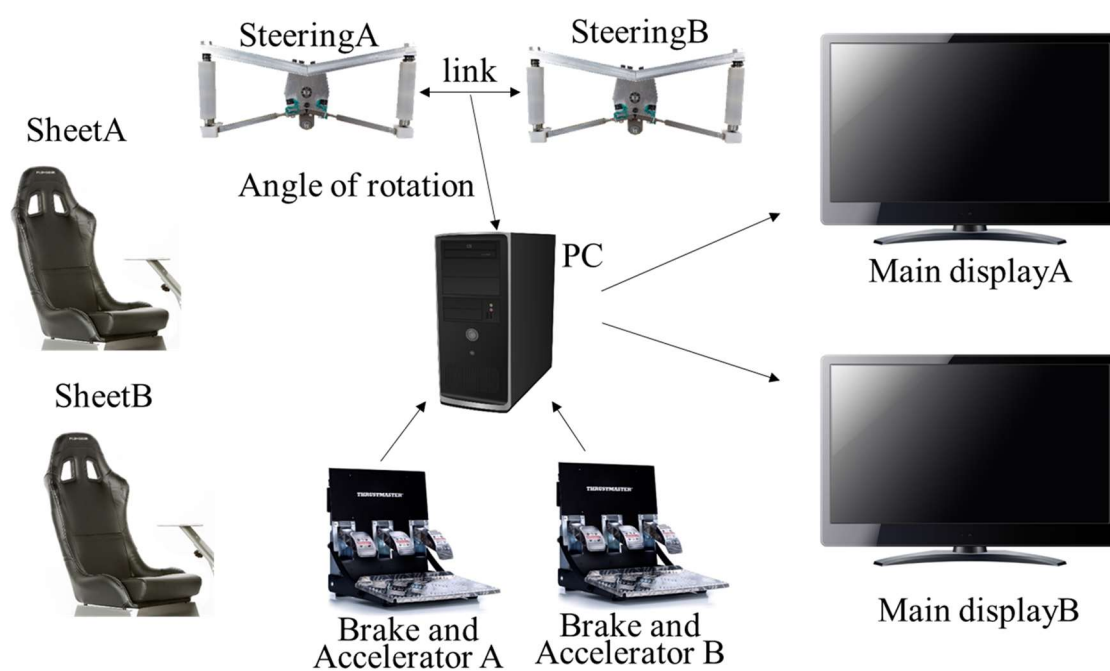


Fig.2.3 conFig.uration diagram

2.3 ステアリング装置機構

ステアリング装置の構成図を Fig.2.4 示す. 実験では 2 人の人間が異なるステアリングで同一の車両を操作するため, 二つのステアリングの回転を同期させなければならない. 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, 連動させるリンク機構を作成した. 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.

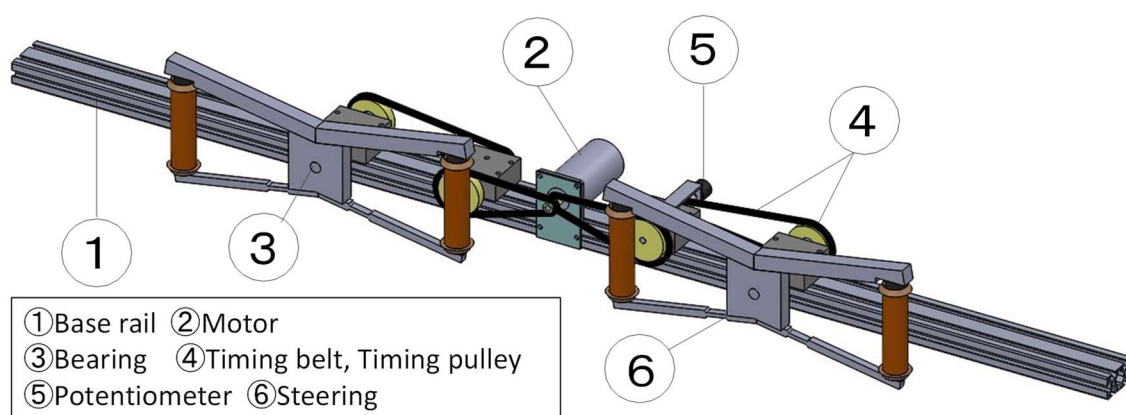


Fig.2.4 Structure of steering device

2.3.1 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 ネジを使用することで溝に部品を任意の位置で固定することができる. ステアリング装置の機構はこのレール上に構築した.



Fig.2.5 Base rail

2.3.2 モーター

SAWAMURA MOTOR SS40E4 DC24V 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，土台レールの側面の溝にねじ，ナット二組を使用して固定される．仕様を Table2.1 に示す．

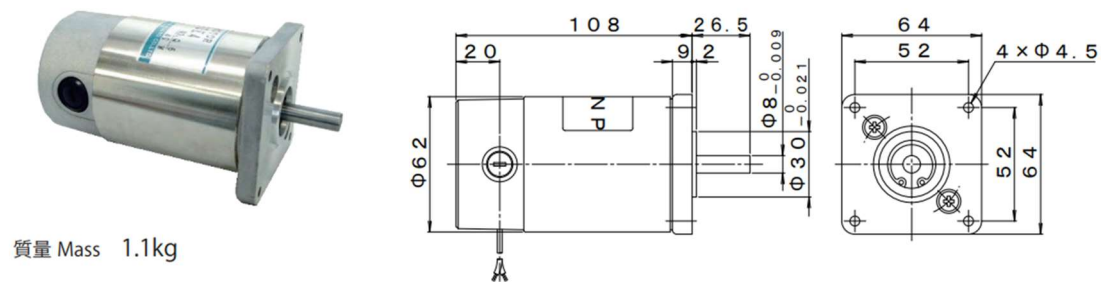


Fig.2.6 Motor

Table2.1 Motor

連続定格 Continuous rating				無負荷 No load		電機子抵抗	電機子慣性モーメント(GD ²)	機械的時定数	逆起電力定数	トルク定数	ブラシ長さ Brush L mm
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	Ω	R. Inertia kg·cm ² (kgf·cm ²)	ms	V/krpm	N·m/A	
12	5.5	2500	0.16 (1.6)	0.55	3100	0.4	0.53 (2.1)	18	3.87	0.037	
24	2.7	2500	0.16 (1.6)	0.28	3100	1.7	0.53 (2.1)	18	7.74	0.074	
100	0.6	2500	0.16 (1.6)	0.06	3100	28	0.53 (2.1)	18	32.3	0.31	10 限度長さ 4

2.3.3 軸受け

モーターの回転を減速させるために装置には4本の軸があり，それぞれをベアリングに通す．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．それぞれの軸周りの機構は樹脂で製作したブロックを用いて製作した．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 φ8，外径 φ14)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 φ12，外径 φ21)を使用する．

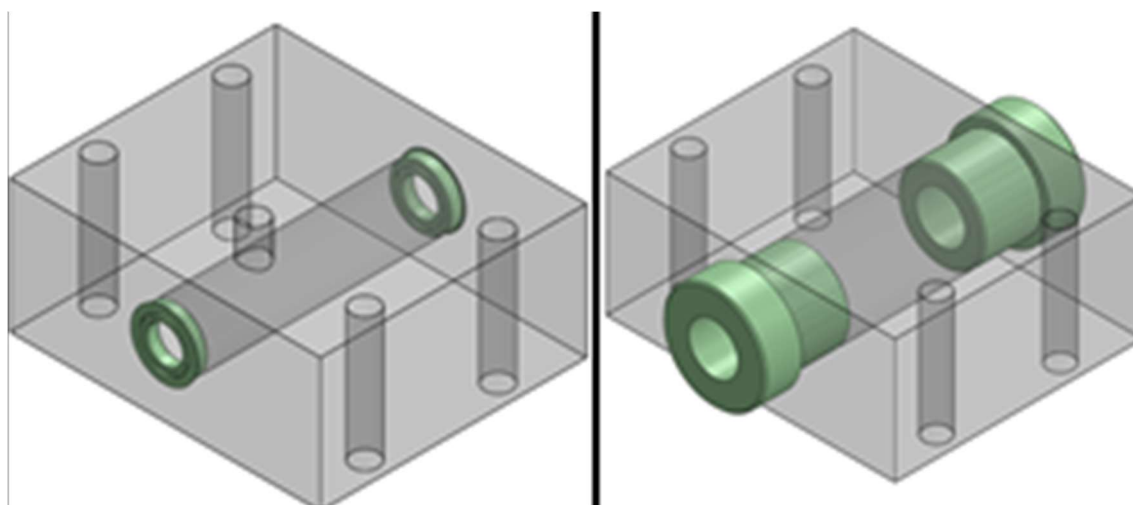


Fig.2.7 Bearing

2.3.4 タイミングベルト，タイミングプーリー

動作に遅れの出にくいタイミングベルト，タイミングプーリーを使用し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 2 段階用い減速比 17.64 で減速させる．タイミングベルトの規格を Fig.2.8 と Table. 2.2 に示す．

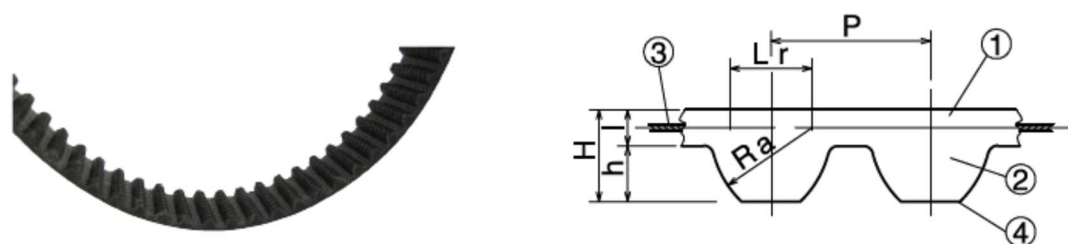


Fig.2.8 Timing belt

Table2.2 Standard of Timing belt

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

2.3.5 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．Fig.2.8 に使用するポテンションメーターを，Table2.3 にその仕様を示す．



Fig.2.9 Potentiometer

Table2.3 Standard of Potentiometer

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

2.3.6 ステアリング

Fig.2.10 にステアリングの全体図を，Fig.2.11 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，中にバネが仕組まれており，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．

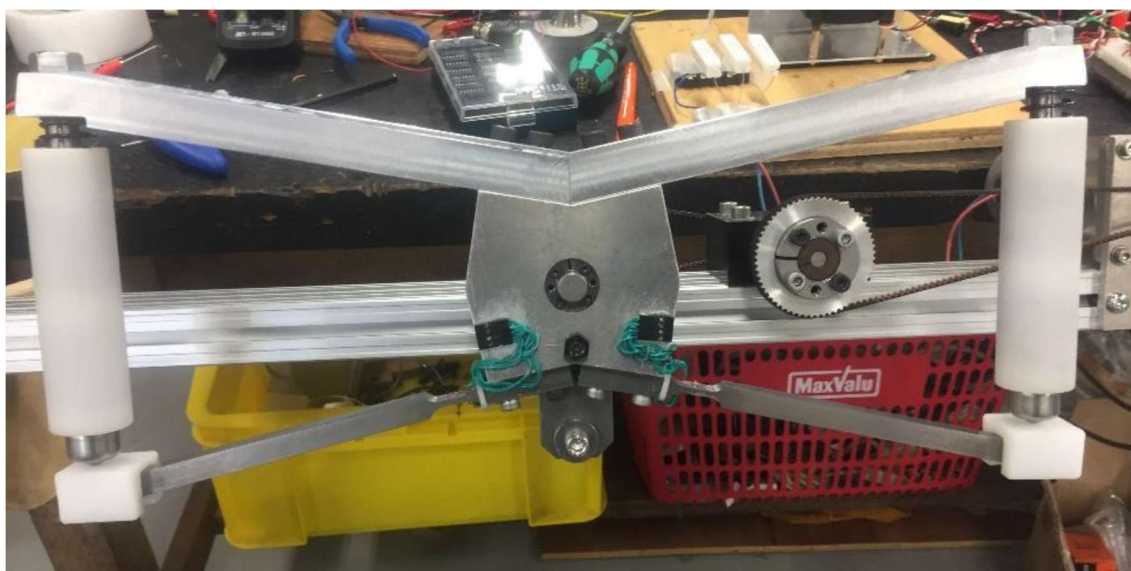


Fig.2.10 Overall view of steering

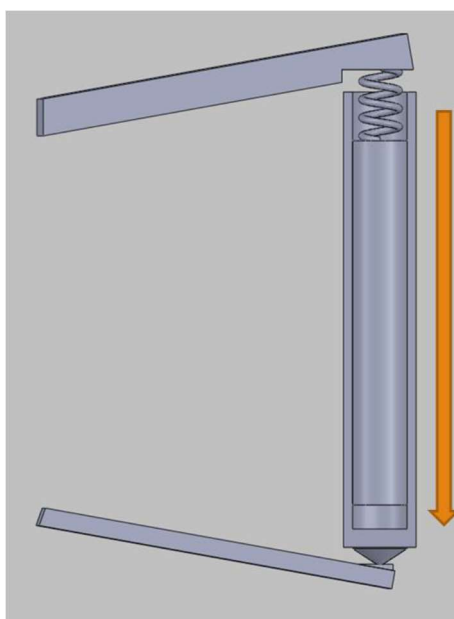


Fig.2.11 Mechanism of steering

2.4 走行環境

2.4.1 想定状況

実際にレベル3 自動運転技術でシステムから人間へ運転主権の移行が行われるのは、一定条件の走行環境下から外れる状況である。現在レベル2、もしくはレベル3で想定されている走行環境は高速道路である。障害物が少なく、速度の加減速の機会が少なく一定速度で走行可能、また車線の幅が広く車線を計器類が認識しやすいためである。この走行環境下から外れる状況を想定し走行環境を構築、実験を行った。

高速道路上の走行を一定条件とし、システムから、人間のドライバーに運転主権を受け渡すことを考える。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上インターチェンジ付近の高速道路から離脱するための本線から減速車線への車線変更である。使用した走行環境を Fig.2.12 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、本実験では車線変更に着目するため他車両は表示しないものとする。

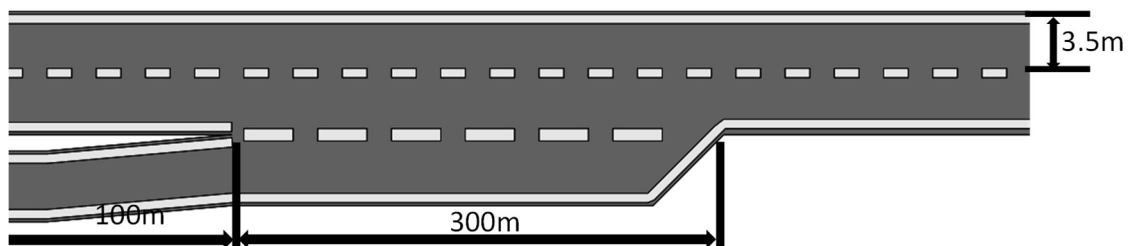


Fig.2.12 Driving environment (near the interchange)

2.4.2 車線変更

通常の高速道路上における本線から減速車線への車線変更について、ドライバーがとる運転動作を4段階に分類した。この各段階における車両位置と運転動作について Fig.2.13 に示す。まず、①は本線の走行。次の②は目標の減速車線がとステアリング操作を開始する車線変更。③で車線変更終了後ステアリングを正位置に戻すことで車両の安定をはかる。④はそのままインターチェンジに向かって走行を続け高速道路から離脱する状態である。

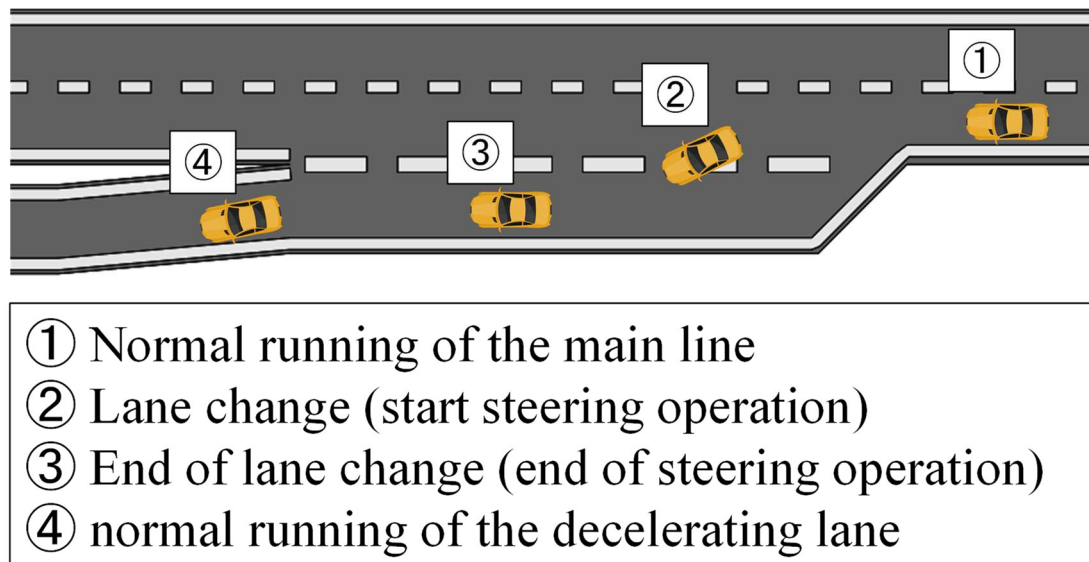


Fig.2.13 Lane change

2.5 走行状態

2章, 2.4.4節で述べている走行環境を元に, 二人の人間で運転主権の移行を行う. 本実験では本来のシステム側の役割の被験者をドライバーA, 人間のドライバー側の役割の被験者をドライバーBと呼称する. 運転主権の移行を含めた減速車線変更について, システムとドライバーがとる運転動作を5段階に分類した. Fig.2.14に運転主権の保持状況を示す. まず①は本線の走行をドライバーAのみの運転で行う. ②で減速車線が近づき, ドライバーBがステアリングの保持を始め, 運転に介入し, 2人の人間による協調運転が開始される. その後③で二人の人間が共に運転操作をしている状態のまま車線変更動作を行う. 車線変更が完了した④で, ドライバーAがステアリングから手を放し運転動作を終了する事で, ⑤のドライバーB単体の運転に移り, 運転主権の移行が完了する. 被験者には, 車線変更を二人で同時に行うこと, 車線変更終了後に運転操作の受け渡しを終わらせる事を指示した. 共同運転の開始・終了のタイミングは被験者同士でコミュニケーションをとることで自由とした. Fig.2.14に運転主権の保持状況を示す.

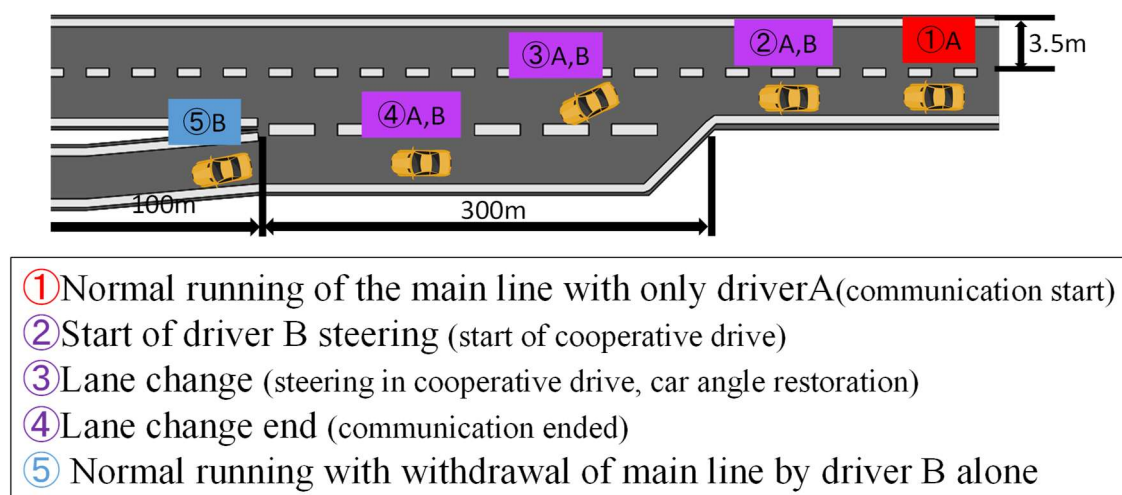


Fig.2.14 Driving sovereign holding condition

2.6 実験方法

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，9 組の「Pair1」（ドライバーA1・ドライバーB1）から「Pair9」（ドライバーA9・ドライバーB9）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 人で本線から減速車線への車線変更における運転動作について説明を行い，実際に運転実験を行う．被験者には運転実験は車線変更 1 回を 1 本とし各組 10 回ずつ行い，1 本ごとに被験者それぞれの実験に対する主観評価を行った．

第3章 評価方法

3.1 力学モデル

本実験の協調運転を評価するに当たり、実験装置から得られた実測データ、実験ごとの主観評価を用いる。実験装置からはステアリングから得られる被験者が入力したトルク $[N \cdot m]$ 、ステアリング機構内に設置したポテンションメーターからステアリング操舵角 $[^\circ]$ を測定する。「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」の3つが得られ、それぞれ 0.01 秒のサンプリングタイムで取得する。また主観評価はアンケートを用い、行った協調運転による車線変更を被験者自身で評価を行う。操舵角はステアリングを切っていない位置を 0 として時計回り方向を正に、反時計回り方向を負とする。また、実験時間は協調運転を開始した時点を開始点(0s)とする。各値を以下に示す。

t : 実験時間

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

$I[-]$ を慣性、 $k[-]$ をバネ係数、 $d[-]$ を粘性係数、 $\tau_f[N]$ を摩擦として、力学モデルを Fig.3.1 に、運動方程式を以下に示す。

$$I\ddot{\theta}_t + d\dot{\theta}_t + k\theta_t + \tau_f = \tau_A + \tau_B \quad (3.1)$$

また、式(3.1)の左辺を $T(t)$ 、 τ_{int} を内力、 α を力の分配比率を示す重み係数とし、それぞれのトルクの計算式を以下に示す。

$$\tau_A = \alpha T(t) + \tau_{int} \quad (3.2)$$

$$\tau_B = (1 - \alpha)T(t) - \tau_{int} \quad (3.3)$$

この式では重み係数の値によって内力を見る事が出来る。被験者がそれぞれ逆方向にステアリングを切っている場合、内力が発生しトルク量の少ない方のドライバーの操作が負荷となる。また同方向にステアリングを切っている場合は、内力は発生せず、ステアリングに入力したトルクは全てステアリング操作に使われる事となる。

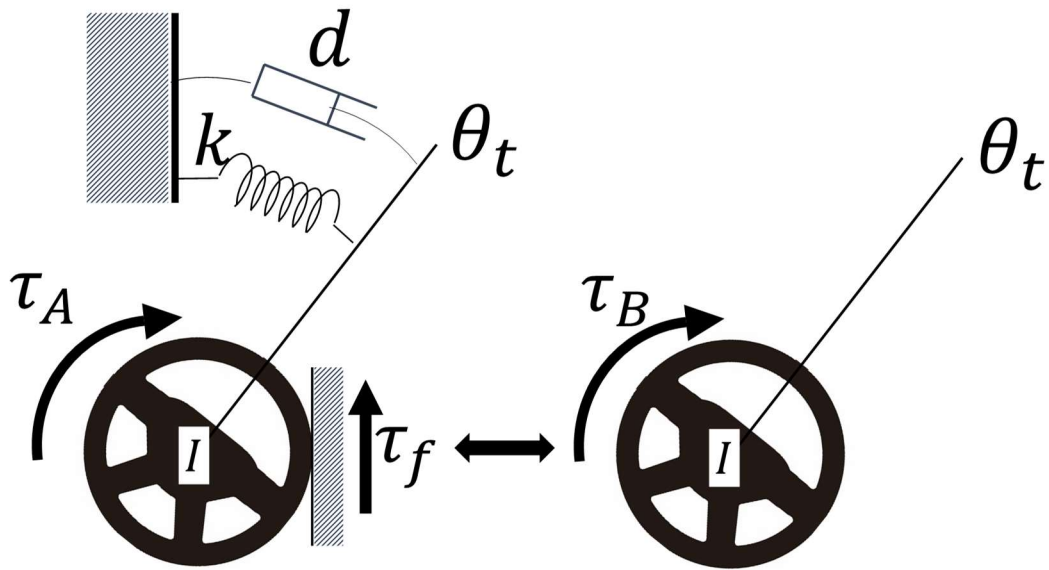


Fig3.1 Dynamic model of steering

3.2 運転状態判断法

運転実験では運転の主権が一方の人間から他方の人間に移行する動作について説明した。服部、著者らは運転主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、運転状態を分類する手法を提案した^[15]。2 人の人間が同時に一つのステアリング機構を操作する際の、力と方向を見ることで内部でのエネルギーのやり取りの状態遷移を見る事ができるため、本研究ではこの提案手法も評価方法のひとつとして用いる。実験装置から得られた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(3.2), (3.3)式で述べ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各ドライバーのエネルギーの授受を見る事が出来る。しかし、この評価方法はどちらのドライバーが主導的に運転操作を行っているかは算出できないため、これについては3.4 節で述べる。各計算式を式 (3.4), (3.5), (3.6) に示す。

T : 協調運転を行った総時間

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

$$\bar{\tau}_A = \frac{1}{\Delta T} \int_{t-\Delta T}^t \tau_A(t) dt \quad (3.4)$$

$$\bar{\tau}_B = \frac{1}{\Delta T} \int_{t-\Delta T}^t \tau_B(t) dt \quad (3.5)$$

$$\Delta\theta = \frac{1}{\Delta T} (\theta_t - \theta_{t-\Delta t}) \quad (3.6)$$

ドライバーA からドライバーB への運転主権の移行時、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用い、実験より得られたデータに適応することで、運転主権の移行プロセスについてエネルギー授受の観点から考察を行う。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種に分類される. 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3 節にそれぞれの状態について記し, Fig.3.1 に運転状態についてまとめたものを示す.

・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 がステアリングに入力し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. 実際はドライバーA が動作する操舵方向へステアリング操作をし, ドライバーB はその逆方向へステアリング操作をしている状態である. また, ドライバーAのステアリング操作にドライバーBのステアリング操作が負荷としてかかっていると考えられる. この状態の場合, $\bar{\tau}_A(t)$ と $\Delta\theta(t)$ の積が正, $\bar{\tau}_B(t)$ と $\Delta\theta(t)$ の積が負になる.

・ドライバーB エネルギー供給状態

この状態は 3.3.1 節で前述した「ドライバーAエネルギー供給状態」と逆の状態である. ドライバーB がステアリングに入力し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. 実際はドライバーB が動作する操舵方向へステアリング操作をし, ドライバーAはその逆方向へステアリング操作をしている状態である. また, ドライバーBのステアリング操作にドライバーAのステアリング操作が負荷としてかかっていると考えられる. この状態の場合, $\bar{\tau}_B(t)$ と $\Delta\theta(t)$ の積が正, $\bar{\tau}_A(t)$ と $\Delta\theta(t)$ の積が負になる.

・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 のステアリング操作が同方向に行われている状態である. 互いに同方向にステアリングを操作しているため, 互いの操作は負荷とならない. 発生させたエネルギーの和がそのまま操舵に用いられており, 協調してステアリング操作を行っている状態である. 互いの操作が負荷となる場合, ステアリング操作に対して相手に応じた余剰な力を加える必要があり, 反応の遅れにより急なステアリング操作を行ってしまう可能性がある. この「両ドライバーエネルギー供給状態」では,

負荷に応じた力を加える必要は無いため、車両安定性，操舵安定性も高くなる．エネルギー授受に着目するとこの状態で共同運転が行われていることが望ましいと考えられる．この場合， $\bar{\tau}_A(t)$ と $\Delta\theta(t)$ の積が正， $\bar{\tau}_B(t)$ と $\Delta\theta(t)$ の積が正になる．

また，(3.2)，(3.3)式からこの状態で内力 τ_{int} は，0となる．

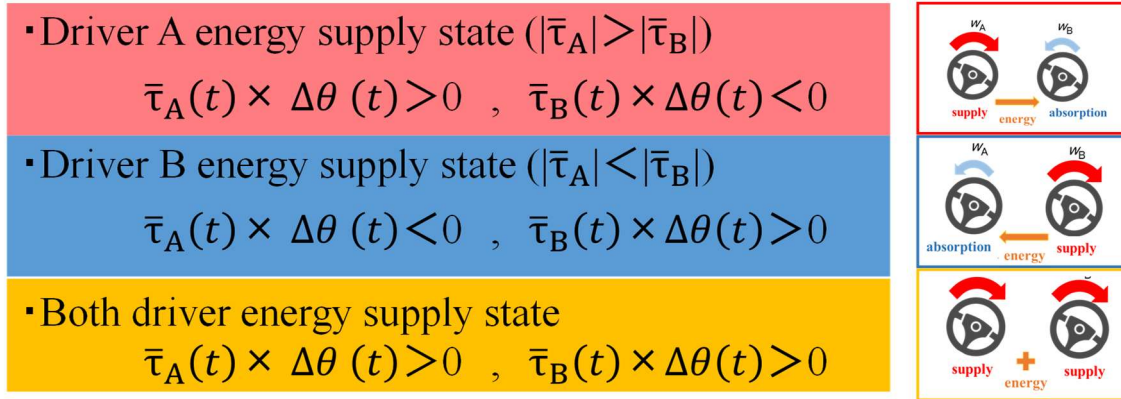


Fig.3.1 The driver's sovereign state

3.3 協調運転中の各被験者の仕事

実験装置から得られるドライバー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」から，被験者がステアリング操作に要した仕事を求める．協調運転中に入力した仕事をそれぞれ J_A ， J_B とする．また，ドライバーAが要した仕事量を W_A ，ドライバーBが要した仕事量を W_B とする．

以下にそれぞれ式に示す．

$$J_A = \tau_A \times \dot{\theta}_t \quad (3.7)$$

$$J_B = \tau_B \times \dot{\theta}_t \quad (3.8)$$

$$W_A = \int_0^T J_A t \, dt \quad (3.9)$$

$$W_B = \int_0^T J_B t \, dt \quad (3.10)$$

また，被験者の組，実験毎に協調を行う時間は任意であり一定ではない．そのため協調運転中に入力された仕事を協調運転に要した時間を割る事により，平均的な仕事率 J'_A ， J'_B を求める．以下にそれぞれ式に示す．

$$J'_A = W_A/T \quad (3.11)$$

$$J'_B = W_B/T \quad (3.12)$$

3.4 主観評価による主従判定

ドライバー自身が運転操作をどのように感じたか主観的な面も重要である。本実験では実験ごとにアンケートを行い、協調運転を自身がどのように感じたか主観評価を行った。ア被験者は協調運転を行っている中で自身が主導的に運転操作を行ったか、相手に運転操作を合わせ従動的に行ったかドライバーとしての特性を知る上で重要となってくる。そのため被験者自身が運転動作を主従どちらかに感じるか、またどちらを好むかを調査するために「車線変更中は従動的でしたか、主導的でしたか？」を調査した。アンケートは11段階で評価を行い、評価値の6を中間とし、値が高いほど主導的と、値が低いほど従動的と設定した。Fig.3.2 に実際の用いたアンケート表を示す。

以下の問について、実験毎に解答欄の選択肢の中から当てはまるものを選び、○で囲んで下さい。
車線変更中は従動的でしたか、主導的でしたか？

	1	2	3	4	5
従動的					
どちらでもない					
主導的					

Fig.3.2 Questionnaire

3.5 トルク，角速度の相関

通常の運転操作で車線変更を行う場合，ステアリングの切り始めのタイミング，隣車線への侵入角等々，人それぞれに異なってくる．本実験では2人のドライバーが同時に操作を行っているため，ドライバーは各個人の特性に基づいて運転する事ができず，お互いの干渉が生じる．そのため協調運転中ではどちらの被験者の運転操作が実際の車両挙動に大きく影響しているか不明である．力学的な観点と主観評価を比較する事により，互いの挙動に対するドライバーの認識を得る事で，個々のドライバーに適応するシステムの開発に繋がると考えられる．

運転状態判断法によるドライバー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を考えると(3.2)，(3.3)式の重み係数が0もしくは1となる．しかし力学的にステアリング操作の負荷となっている側は，入力するトルクを調節する事で，意図したステアリング操作に誘導する事ができる．こうした被験者の意図は不明のため，(3.2)，(3.3)式における $T(t)$ とそれぞれの入力トルクの相関を取る事で，どちらの被験者の意図通りにステアリング操作が行われているか見る．(3.1)におけるバネ項 $k\theta_t$ と慣性項 $I\ddot{\theta}_t$ は実験装置の特性上値が小さくなるため無視できるものとし，摩擦項 τ_f は一定の値であるため，本実験ではステアリング角速度とそれぞれの被験者が入力したトルクの相関係数を求める事で主導従導をみる．

相関係数を求めるに当たって以下のパラメーターと式を用いた． N をデータ点数， t を時間，ドライバーA のトルクを $\tau_A(t)$ ，ドライバーB のトルクを $\tau_B(t)$ ，ステアリングの角速度を $\omega(t)$ ， $\tau_A(t)$ の平均値を μ_A ， $\tau_B(t)$ の平均値を μ_B ， $\omega(t)$ の平均値を μ_ω ， $\omega(t)$ の標準偏差を σ_ω ， $\tau_A(t)$ の値を A_i ， $\tau_B(t)$ の値を B_i ， $\omega(t)$ の値を C_i ， $\tau_A(t)$ と $\omega(t)$ の相関係数を ρ_A ， $\tau_B(t)$ と $\omega(t)$ の相関係数を ρ_B とする．以上のパラメーターを用いて以下の式を用いて相関係数を求めた．

$$\rho_A = \frac{\sum_1^N (A_i - \mu_A)(C_i - \mu_C)}{\sqrt{\sum_1^N (A_i - \mu_A)^2} \sqrt{\sum_1^N (C_i - \mu_C)^2}} \quad (3.13)$$

$$\rho_A = \frac{\sum_1^N (B_i - \mu_B)(C_i - \mu_C)}{\sqrt{\sum_1^N (B_i - \mu_B)^2} \sqrt{\sum_1^N (C_i - \mu_C)^2}} \quad (3.14)$$

協調運転中はステアリングを通して相手のステアリング操作を認識し、それに対してステアリング操作を行うため、全体の相関を取り評価するのではなく部分的に見る事が重要だと考えられる。そのため、今回は、ステアリング操作を区切りその区間の相関係数を求めた。走行車線から左の減速車線への車線変更をステアリング角速度の観点で見てみる。まず車線変更を始めるためにステアリング操作を開始、ステアリングを左へ切り始めるため角速度は速くなる①。左方向へのステアリング操作を終えるためドライバーはステアリング操作を調整、角速度は遅くなり操作は終了する②。次に車体角度を車線とあわせるため、右方向へと操作を開始する③。最後に車線変更を終了するために、車体角度を調整する④。車線変更中のステアリング角度をこの4段階に分け、この区間中の各被験者の入力トルクとステアリング角速度の相関を取り比較する。Fig.3.3 に実測データの区間分けについての概要図を示す。

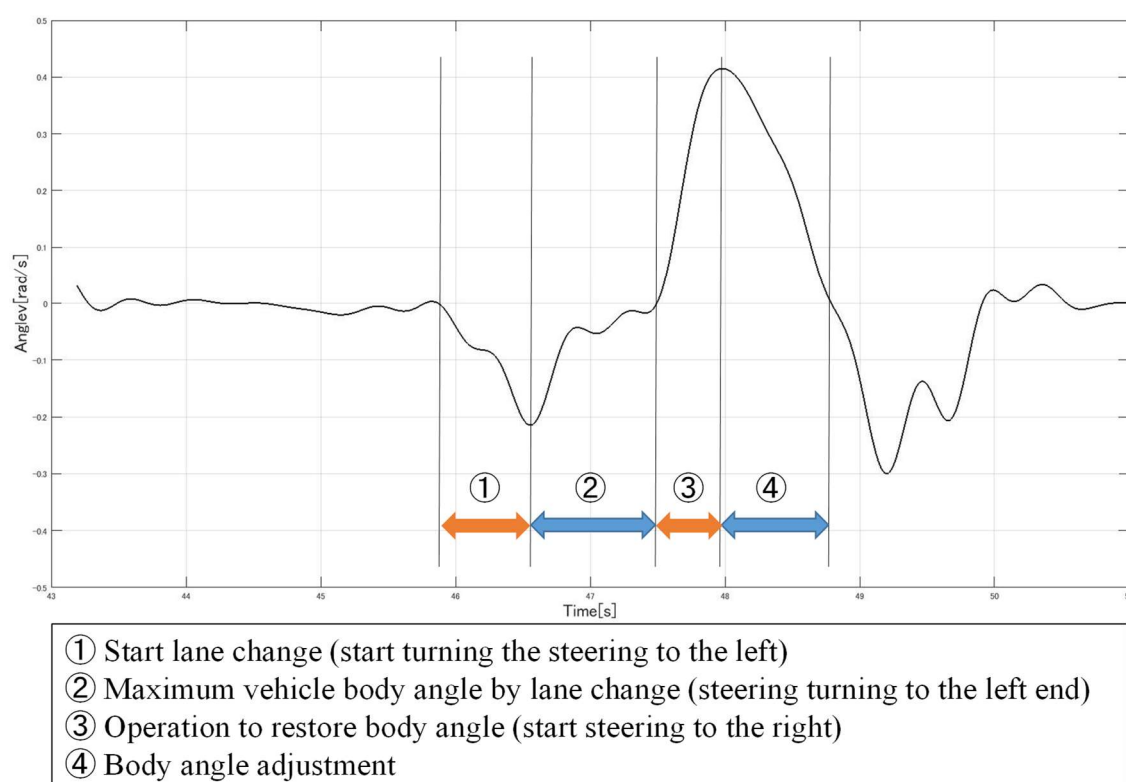


Fig.3.3 Division of cooperative driving

第 4 章

実験結果, 考察

前章で述べた評価方法を用い, 二人の人間による協調運転実験の結果と考察を行う。エネルギー授受に着目した運転状態判断法, 被験者がステアリング操作時にステアリングに加えた仕事, アンケートを用いた主観評価, トルクと角加速度の相関係数の 4 種の評価を行った。本章ではこれらの結果と考察を示す。4.1 節では運転状態判別法を用いて協調運転を解析する。4.2 節では被験者が協調運転中にステアリング操作に要した仕事を, 4.3 節では主観評価と協調運転中のトルクとステアリングの相関係数を比較する。

4.1 運転状態判断法による評価

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 $[N \cdot m]$ と操舵角 $[Rad]$ を, 横軸には時間 $[s]$ をとる Fig.4.1 に得られた結果の例を示す。赤線がドライバー A のトルクを, 青線がドライバー B のトルク、黒線がステアリング操舵角を示している。各値は正の値がステアリングを時計回り、負の値がステアリングを反時計周りに対応する。この値はドライバー 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。これを Fig.4.2 に示す。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 種の状態を判断した。運転状態はグラフ上で色分けして表示されており, 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。

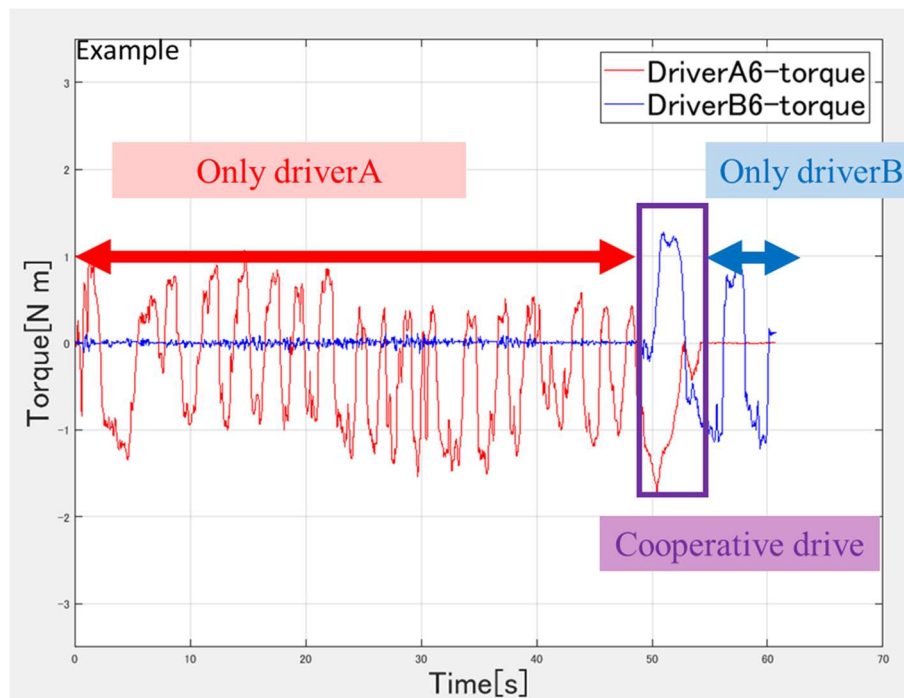


Fig.4.1 Example of Torque

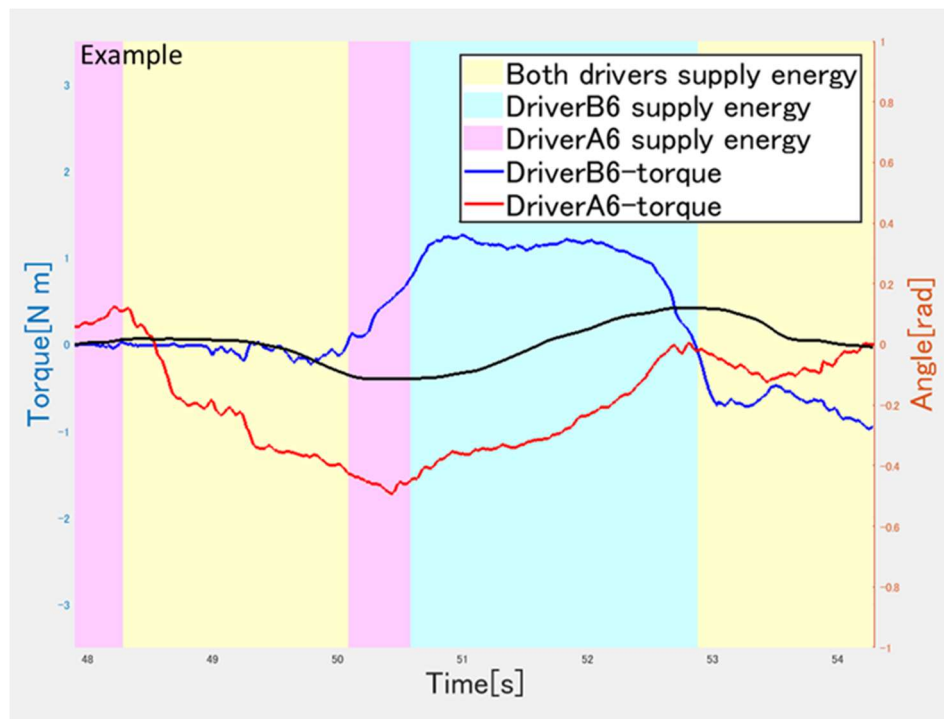


Fig.4.2 Example of during cooperative driving

4.1.1 両エネルギー供給状態時間割合

協調運転中の時間割合を求める. 試行ごとに, 協調運転を行った時間を 100%として, 「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」それぞれの時間割合を計算したものを Fig.4.3 に示す. また Table4.1 にそれぞれの組の運転状態の時間割合の平均を, Fig.4.4 にそれぞれの組の運転状態の時間割合の平均と標準偏差を示す.

ペアごとに着目してみると Pair1,3,6 は「両ドライバー供給状態」の時間割合が多く協調している状態が多い結果が出た. しかし, Pair2,4,8,のように「ドライバーB エネルギー供給状態」の時間割合が試行によっては大きくなり, 協調状態であるか否かエネルギー授受の観点ではドライバーB に寄る組もある. また, 多くの試行で「両ドライバー供給状態」の割合が多くなるという結果から, 人間は互いに協調して互いの負荷とならないようステアリング操作を行っていることがわかる. ステアリング操作に要した仕事そのまま操舵に用いられており, 余剰な力を使う必要がないため, 急激な操作を行う可能性は低くなる. よって実際のシステムからドライバーへ運転主権の移行を行う際も, この状態を介すシステムにすることで, 安全かつスムーズな運転主権の移行が可能となると考えられる.

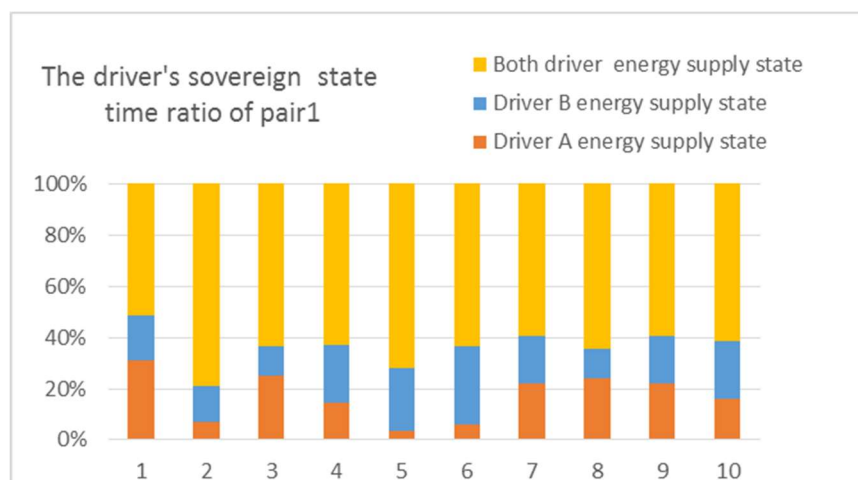


Fig.4.3a The driver's sovereign state time ratio of pair1

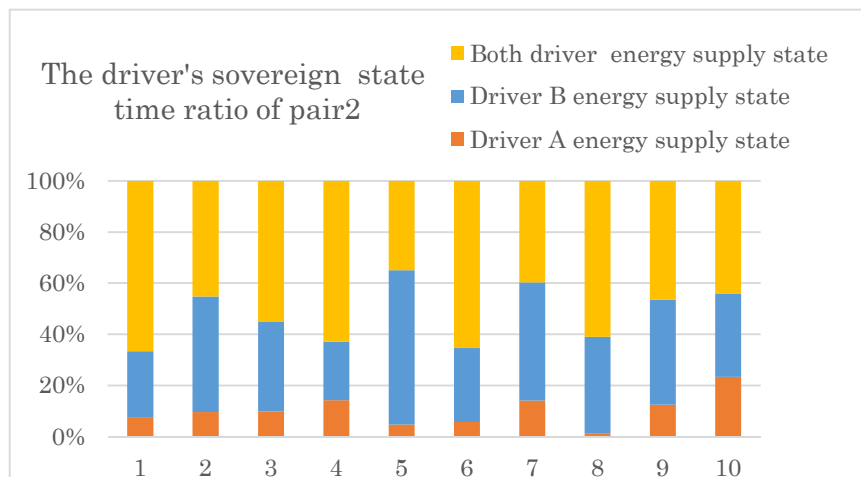


Fig.4.3b The driver's sovereign state time ratio of pair2

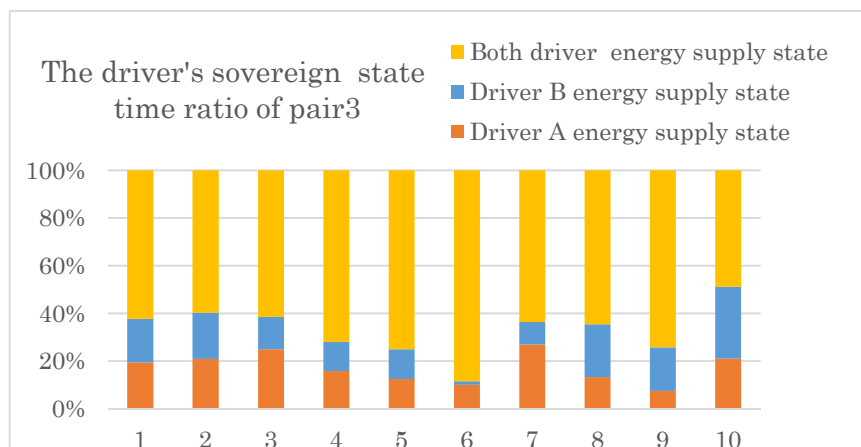


Fig.4.3c The driver's sovereign state time ratio of pair3

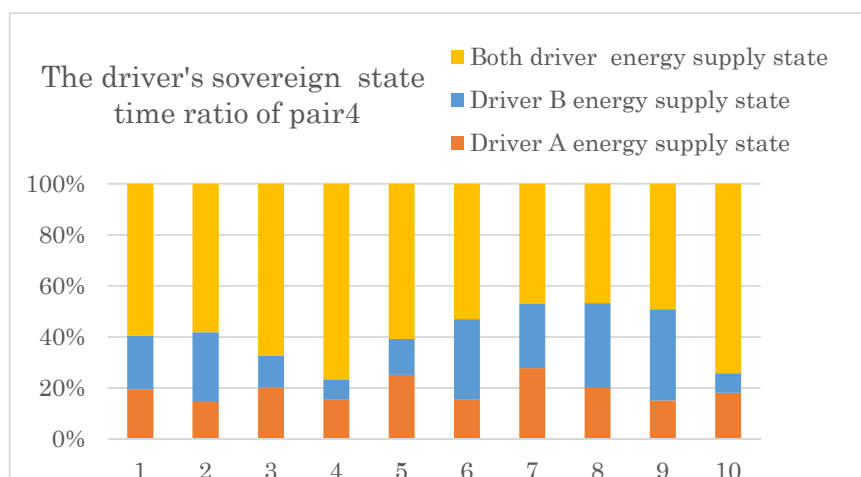


Fig.4.3d The driver's sovereign state time ratio of pair4

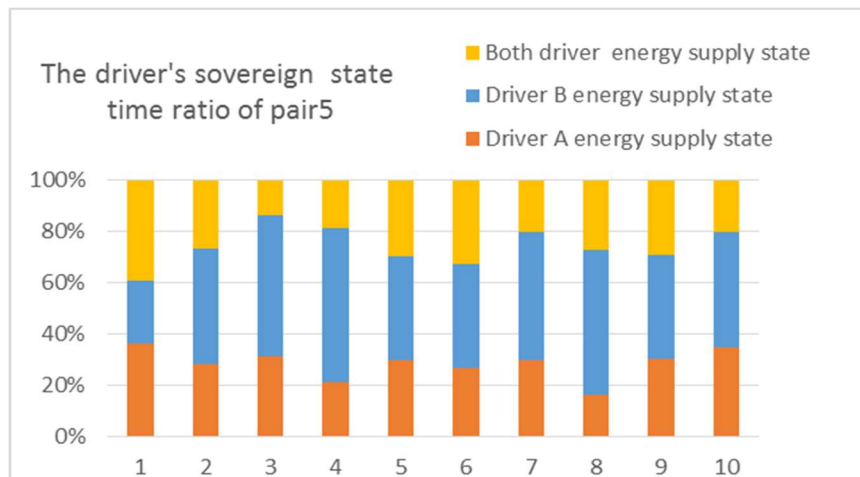


Fig.4.3e The driver's sovereign state time ratio of pair5

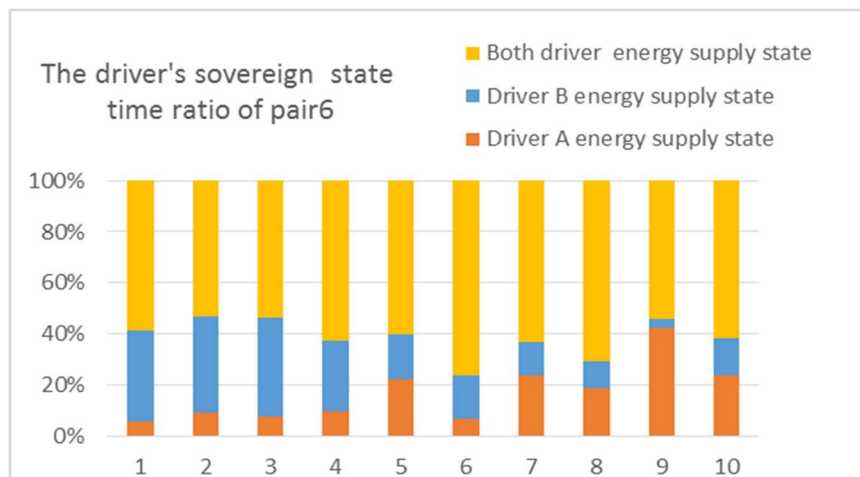


Fig.4.3f The driver's sovereign state time ratio of pair6

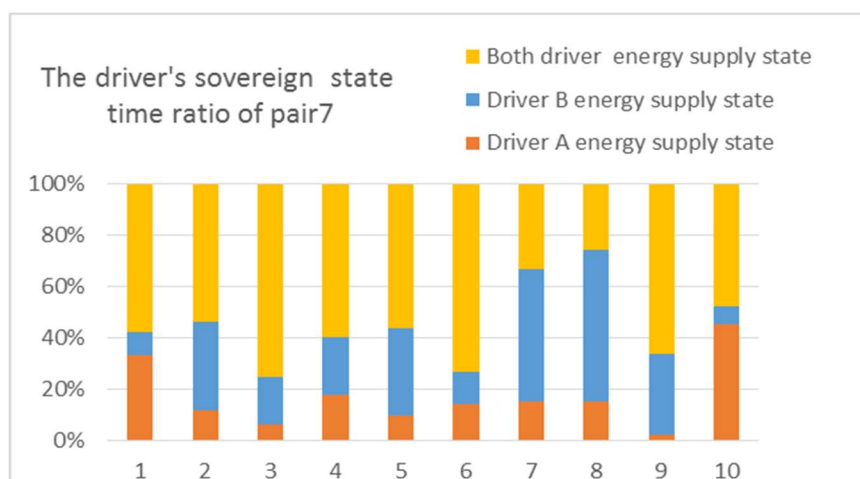


Fig.4.3g The driver's sovereign state time ratio of pair7

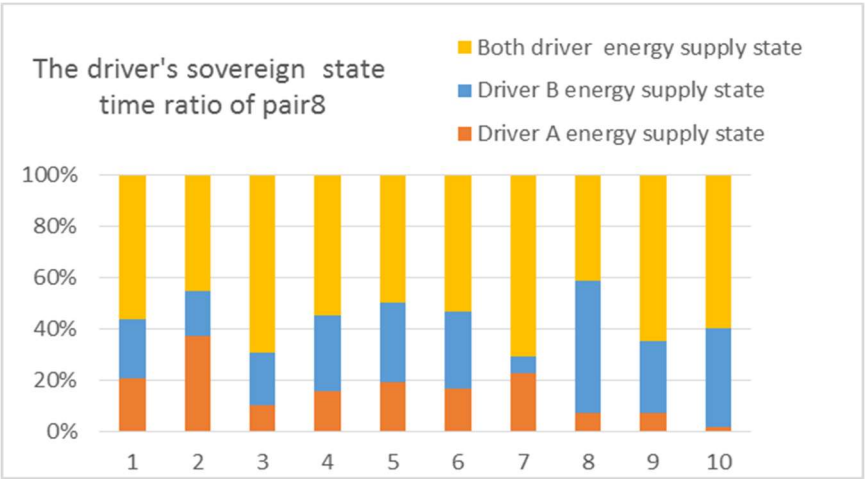


Fig.4.3h The driver's sovereign state time ratio of pair8

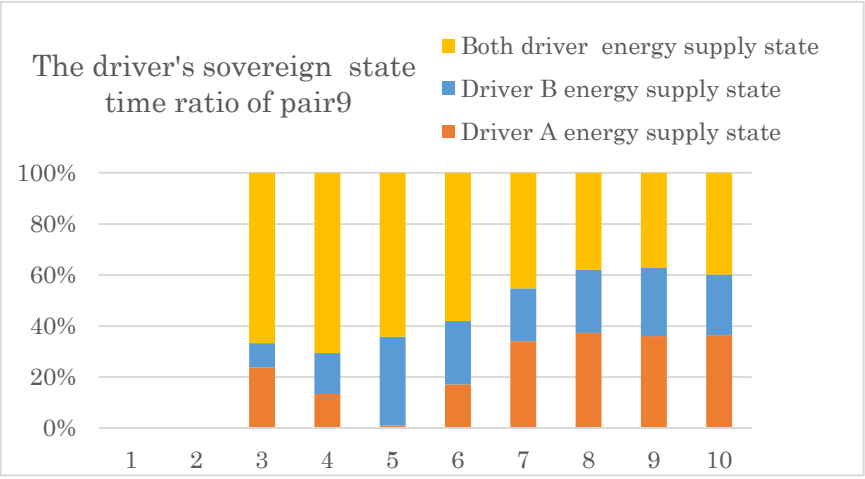


Fig.4.3i The driver's sovereign state time ratio of pair9

Table4.1 Average of the driver's sovereign state time ratio

	Driver A energy supply	Driver B energy supply	Both driver energy supply
Pair1	0.17	0.19	0.64
pair2	0.10	0.38	0.52
Pair3	0.17	0.16	0.67
Pair4	0.19	0.22	0.59
Pair5	0.28	0.46	0.26
Pair6	0.17	0.22	0.61
Pair7	0.17	0.25	0.58
Pair8	0.16	0.28	0.57
Pair9	0.25	0.24	0.51
Average	0.19	0.27	0.55

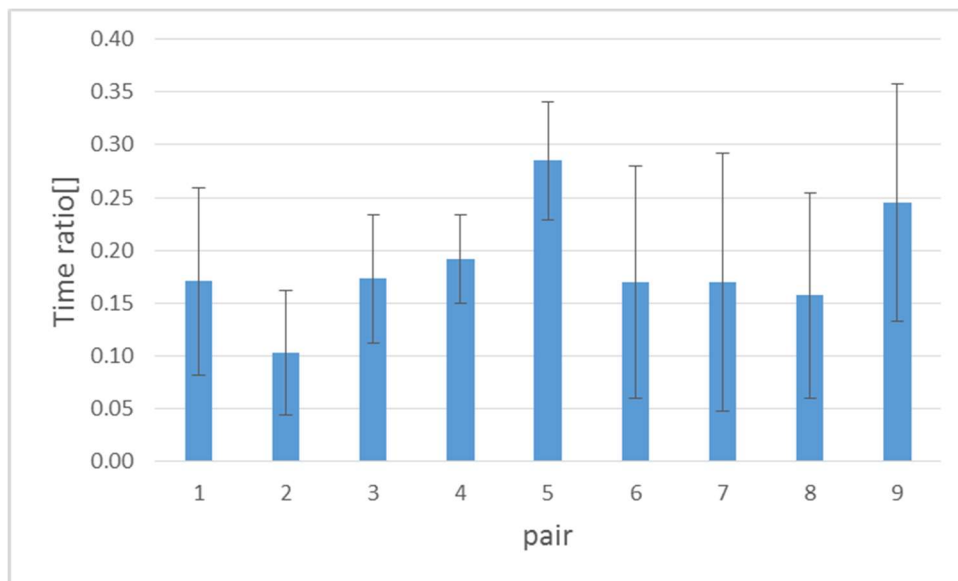


Fig.4.4a Average and standard deviation of driverA energy supply state time ratio

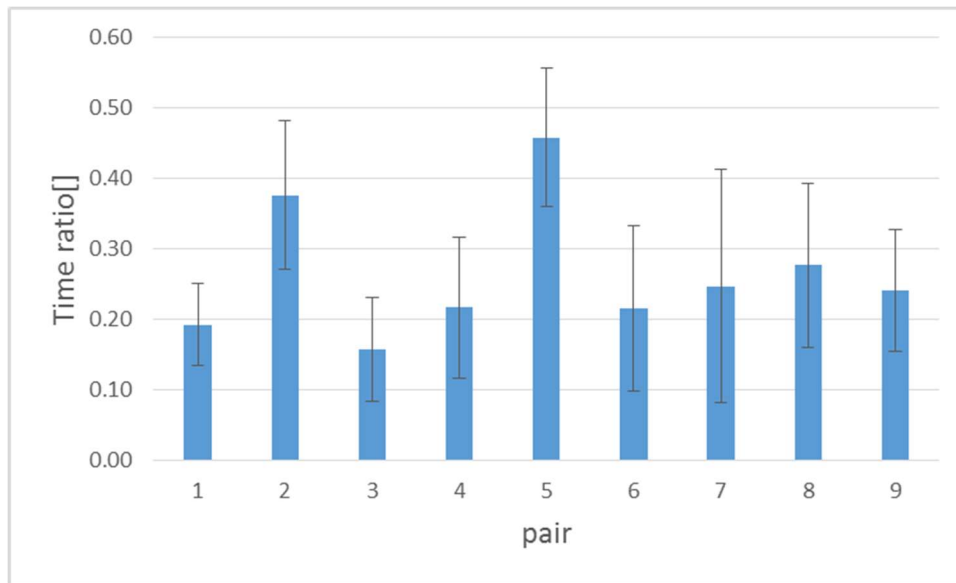


Fig.4.4b Average and standard deviation of driverB energy supply state time ratio

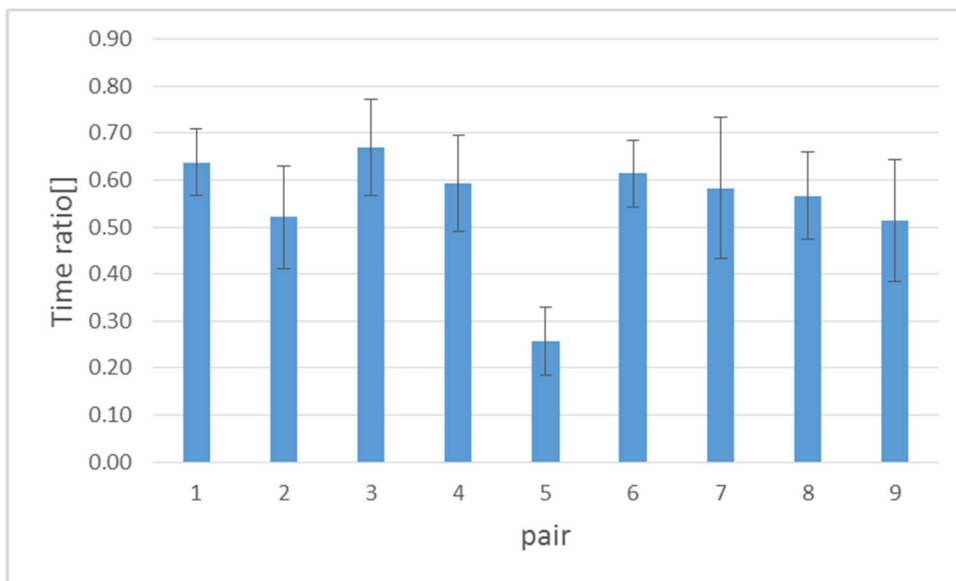


Fig.4.4c Average and standard deviation of both driver energy supply state time ratio

4.1.2 運転状態切り替え回数

人間同士の協調運転中、運転状態は常に一定でなく切り替わりが多く発生する。この状態の切り替わりは互いのステアリング操作が反発しての負荷状態、同方向に協調して操作する状態を繰り返していることになる。この切り替わり回数が少ないほどに車両操作の安定性は増すと考えられ、切り替わり回数が多いほど、協調している状態が少なく互いに反発しあうことで、車両挙動が不安定となると考えられる。 Fig.4.5 と Table4.2 に試行ごとの運転状態の切り替え回数を示す。この運転状態の切り替え回数は多くの組で減少傾向が見られる。人間同士による協調運転は習熟により安定する事がわかる。この習熟した状態での協調運転を用いて運転主権の移行を行うことにより車両軌道の安定化を図る事ができると考えられる。

Table4.2 The number of times of switching driver's sovereign states

試行回数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pair1	6	8	6	4	4	6	6	8	7	7
pair2	6	7	5	5	6	3	7	3	6	3
Pair3	10	7	17	10	7	5	11	8	6	13
Pair4	16	7	13	5	15	14	11	6	6	5
Pair5	7	7	7	8	8	8	8	5	8	8
Pair6	8	7	4	7	9	6	7	4	4	7
Pair7	10	9	5	7	7	8	6	4	5	5
Pair8	7	8	6	5	4	7	7	9	4	2
Pair9	6	9	5	8	8	7	6	6	5	8

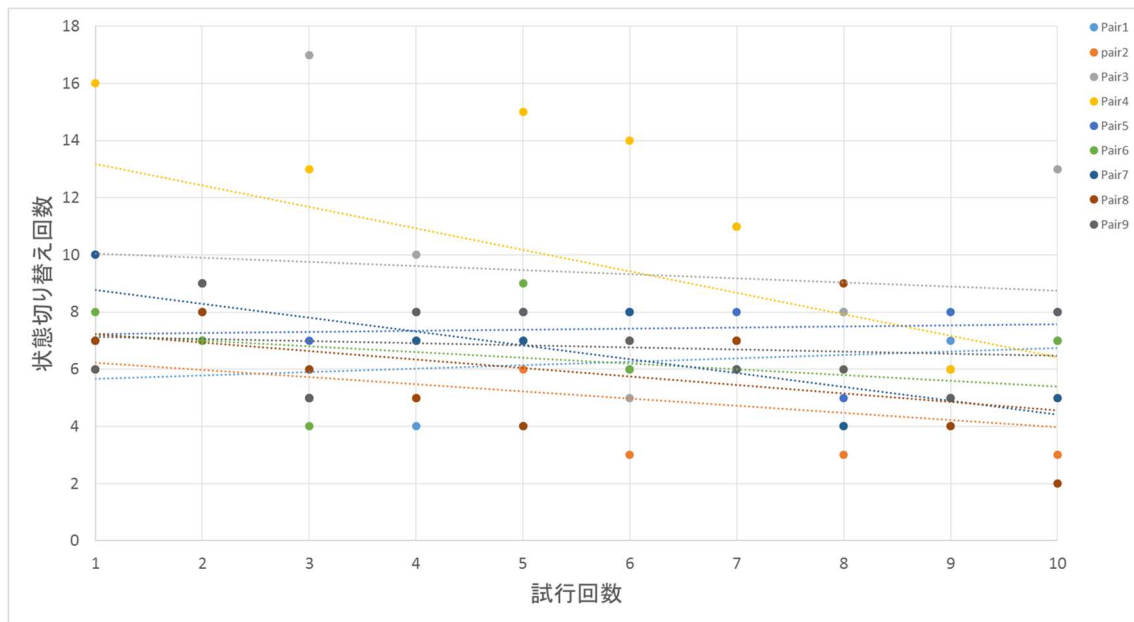


Fig.4.5 The number of times of switching driver's sovereign states

4.2 運転操作仕事量変化

協調運転中はステアリング操作に力を加えすぎると、互いに協調して運転する事が難しくなり、操作安定性、車両安定性が著しく低下する要因となってしまう。そのため各被験者がステアリング操作に用いる仕事量は少ないほうが良いと考えられる。3.3 節で述べたように各実験ペア、試行回ごとにステアリング操作は異なり、協調運転の開始、終了点は任意のため協調運転に要する時間は異なるため各動作の仕事量を単純比較する事ができない。そのため協調運転中に要した仕事量をそれぞれの協調運転時間で割る事により仕事率に準じた値を比較する。各組の仕事量の変化を表したグラフを Fig.4.6 に示す。グラフを見ると多くの組で減少傾向が見られる。

例として Pair8 の1回目と10回目の車線変更中の各被験者の操作トルク、ステアリング角速度のグラフを Fig.4.7 に示す。比較してみると車線変更中1回目では互いに反発した逆方向のトルクを入力しているが、10回目では互いに同方向のトルクを入力しており、トルク量も少ない事が分かる。これは運転動作の習熟により余剰な力をステアリングにかけることなく協調運転が出来るようになったためであると考えられる。

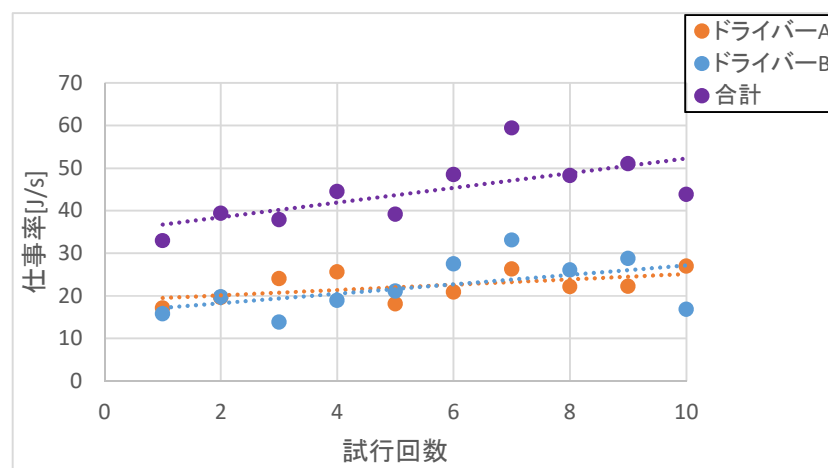


Fig.4.6a Change in work rate of Pair1

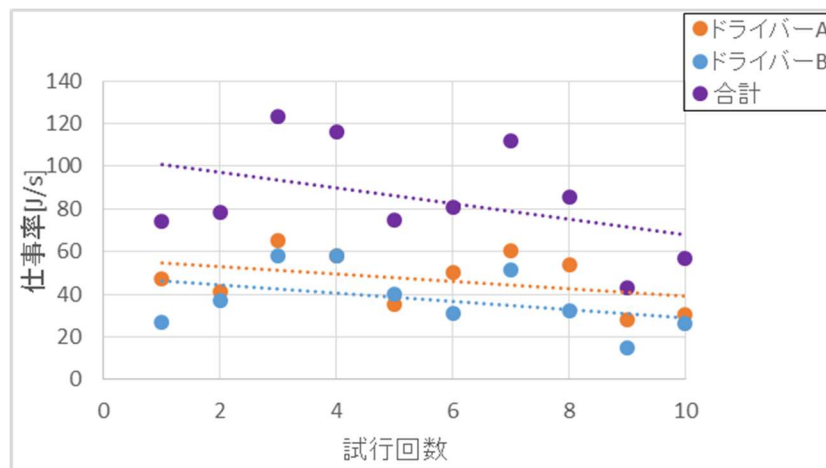


Fig.4.6b Change in work rate of Pair2

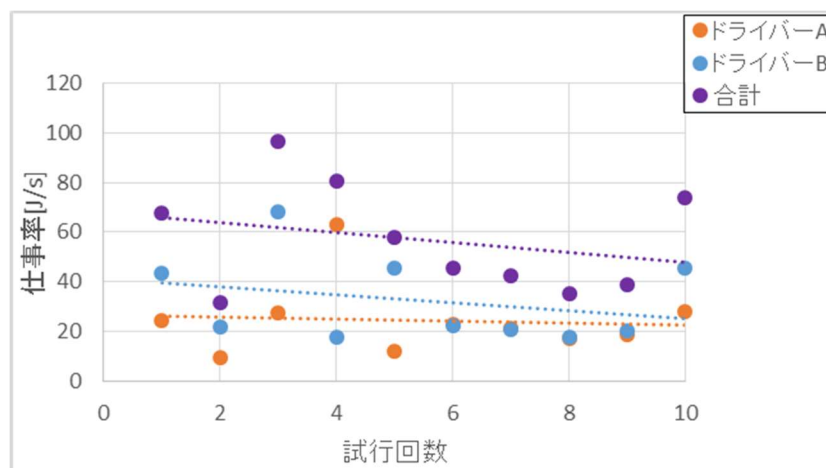


Fig.4.6c Change in work rate of Pair3

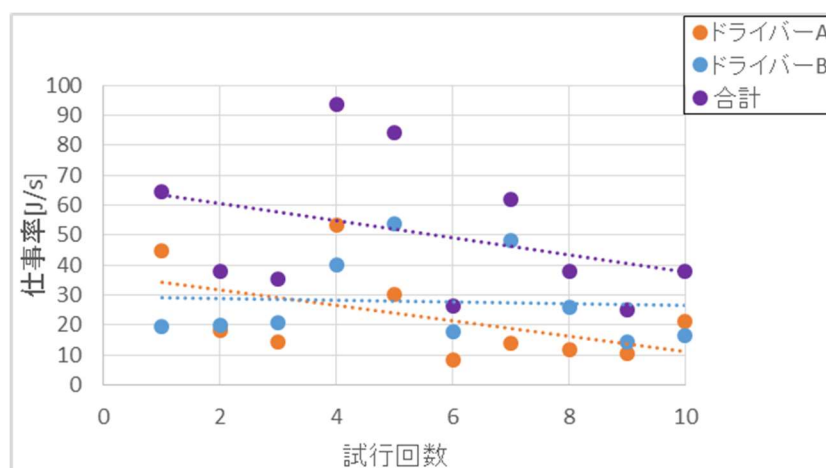


Fig.4.6d Change in work rate of Pair4

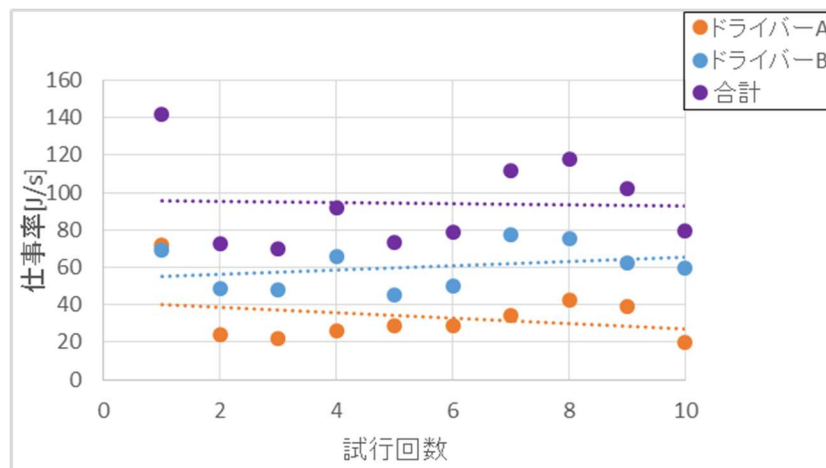


Fig.4.6e Change in work rate of Pair5

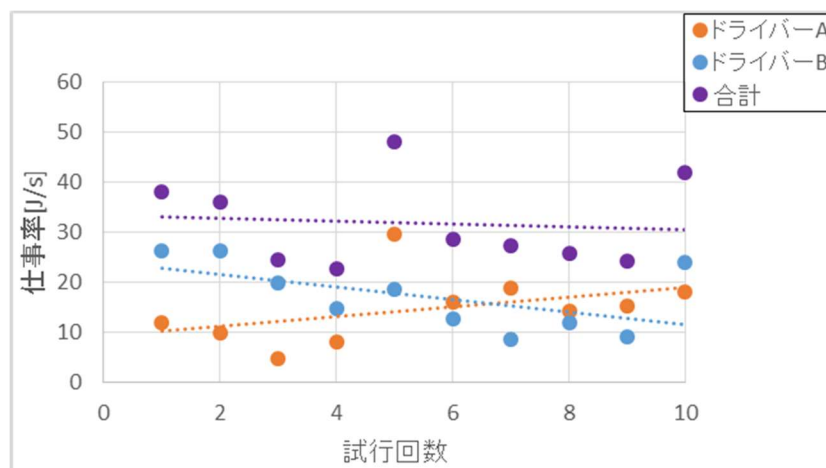


Fig.4.6f Change in work rate of Pair6

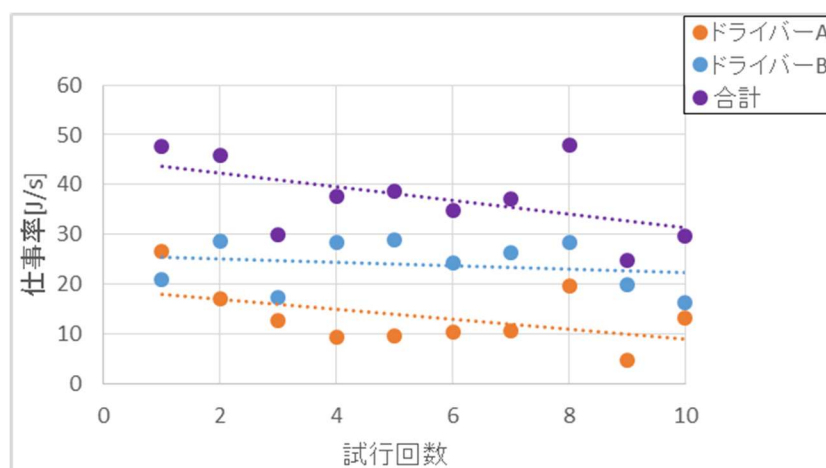


Fig.4.6g Change in work rate of Pair7

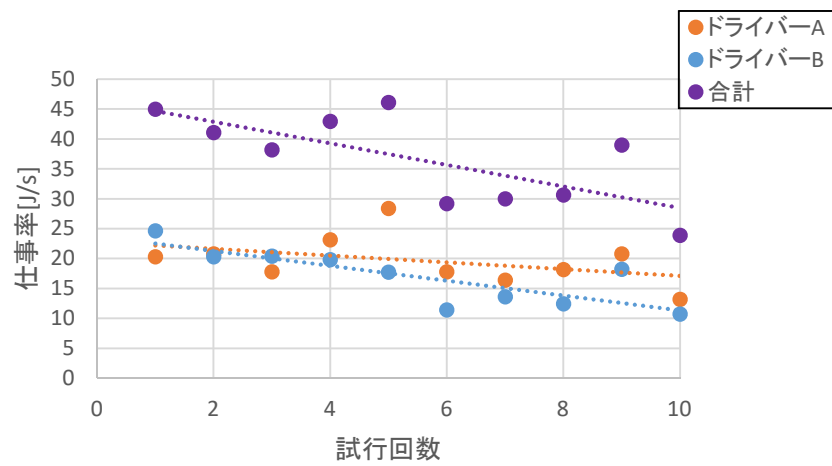


Fig.4.6h Change in work rate of Pair8

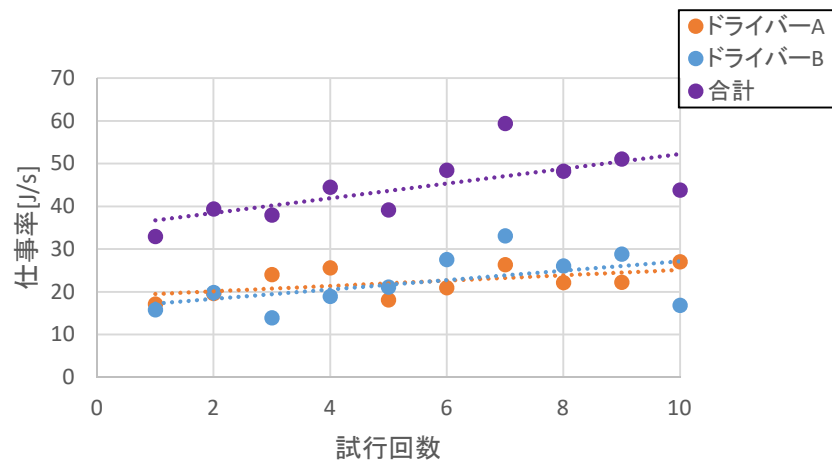


Fig.4.6i Change in work rate of Pair9

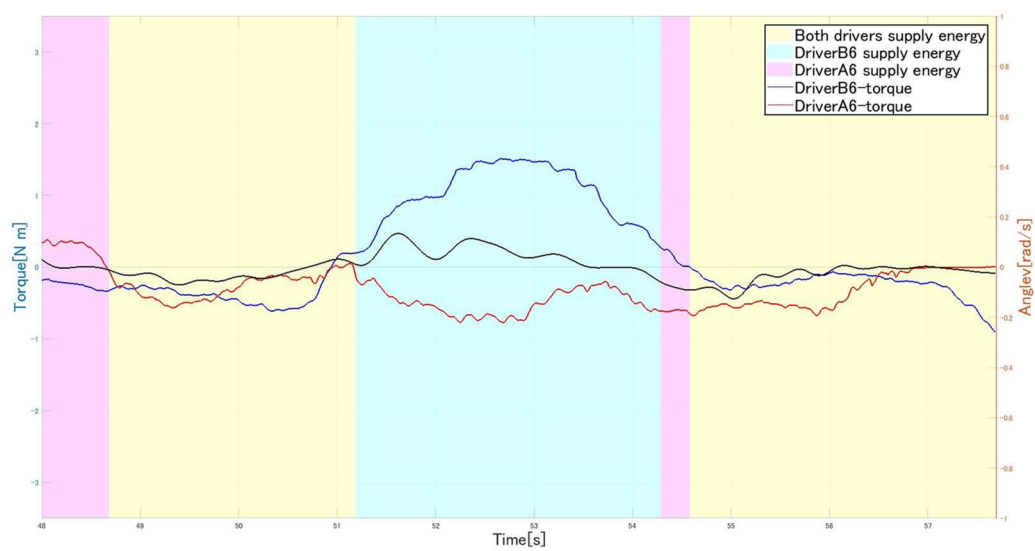


Fig.4.7a Torque and Angular Velocity Graph of pair8 at 1st

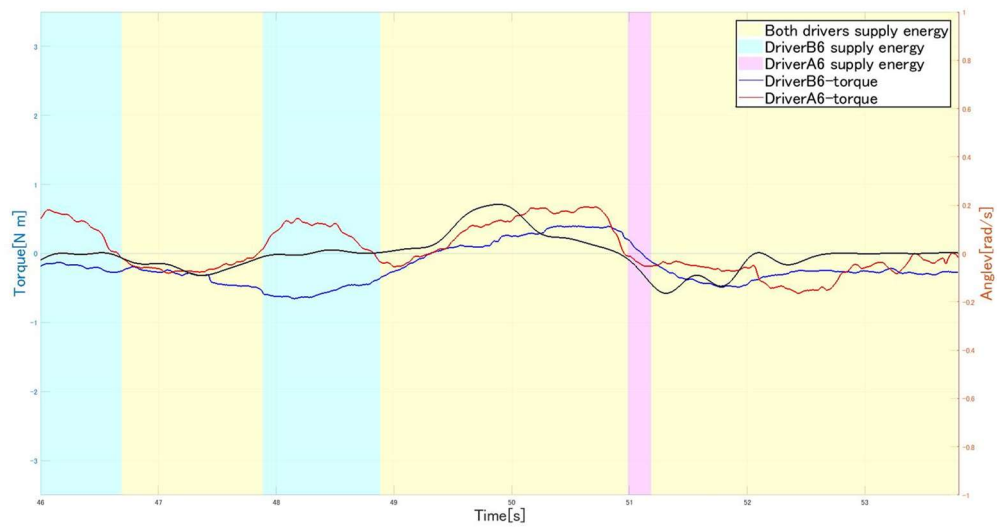


Fig.4.7a Torque and Angular Velocity Graph of pair8 at 10th

4.3 トルク角速度相関と主観評価

安全な運転主権の移行が可能とするために、一律でなくドライバーごとに適応した挙動をとるシステムが有効だと考えられる。そのためドライバー自身がシステムに対してどのように感じたか知る事が、システムを各ドライバーが好む挙動に適応させることに繋がる。本研究では被験者が、自身が主導的もしくは従動的にステアリング操作を行ったか判断基準を探る。協調運転中は先にステアリング操作を行ったことが、自身が主導的であると判断する可能性は高い。3.5節で述べたようにステアリング角速度に着目すると、Fig.3.3 の車線変更の切り始めである①の区間、車体角度を安定させるためのステアリング切り替えしを行い始める③の区間で各被験者の運転操作との相関が関係すると考えられる。

システム側、ドライバー側に分かれた被験者で意識する点がある可能性がある。システム側の被験者は運転主権の移行を行う車線変更まで実験開始地点から運転動作を続けている状態である。車線変更中に運転主権を受け渡すことを考慮すると車線変更の後半は前半と比べ相手に合わせ、操作を行うと考えられる。またドライバー側の被験者は前半のステアリング操作に慣れていなく、主導的に操作しにくく、後半は自身が運転主権を貰い受けるという意識があると考えられる。

主観評価で両被験者が主導的と評価、ドライバーAが主導的かつドライバーBが従動的と評価、ドライバーAが従動的かつドライバーBが主導的、両被験者が従動的と評価した場合の4つに分類する。実験ごとに3.5節で設定した4つの区間ごとに各被験者の入力トルクとステアリング角速度の相関係数を求めた。これを主観評価の分類ごとに分け、強い正の相関(相関係数 0.7 以上)が出た回数、強い負の相関(相関係数-0.7 以下)が出た回数、それぞれの実験全体に対する割合を Table4.3 に示す。ステアリング操作開始点である①、③の区間では強い相関が多く出ているため、ステアリング操作の開始点が協調運転を評価するうえで重要だといえる。また強い相関が出やすい①、③の区間であってもシステム役であるドライバーAはドライバーBと比べ①の区間に強い相関が、ドラ

イバー役のドライバーBはドライバーA と比べ③の区間に強い相関が得られている。システム側，ドライバー側で操作を重要視する区間が異なるといえる。

現実の問題となっているシステムから運転主権を受け取るドライバー自身が主導従導的どちらに感じるか，その要因を考察する。ドライバーA が主導的，ドライバーB が従動的と判断した場合を Table4.4 に，ドライバーA が従動的，ドライバーB が主導的と判断した場合を Table4.5 に示す。本実験のドライバーBは主導的だと判断した場合，3.5 節の①，③の区間の相関が大きく出る。対して従動的だと判断した場合は相関が出にくくなっている。この結果から，ドライバー自身の主従を問う主観評価は，ステアリング操作をどちらが開始するかが要因として挙げられる。

Table4.3a Correlation coefficient ratio of driverA

driverA	区間①	区間②	区間③	区間④
data数	90	90	90	90
正の相関	47	37	55	20
負の相関	3	19	6	45
正相関割合	0.52	0.41	0.61	0.22
負相関割合	0.03	0.21	0.07	0.50

Table4.3b Correlation coefficient ratio of driverB

driverB	区間①	区間②	区間③	区間④
data数	90	90	90	90
正の相関	39	33	68	9
負の相関	17	20	3	47
正相関割合	0.43	0.37	0.76	0.10
負相関割合	0.19	0.22	0.03	0.52

Table.4.4 Correlation coefficient of driverB is following

driverB	区間①	区間②	区間③	区間④
data数	17	17	17	17
正の相関	9	6	11	3
負の相関	0	5	1	7
正相関割合	0.53	0.35	0.65	0.18
負相関割合	0.00	0.29	0.06	0.41

Table.4.5 Correlation coefficient of driverB is leading

driverB	区間①	区間②	区間③	区間④
data数	23	23	23	23
正の相関	15	6	19	2
負の相関	0	8	0	10
正相関割合	0.65	0.26	0.83	0.09
負相関割合	0.00	0.35	0.00	0.43

第 5 章

結論

本研究では自動運転の実用化に向けて問題となる安全な運転主権の移行を実現させるため、2 人の人間で協調運転を行い、人間同士の運転主権の移行プロセスの解析を行った。自動化レベル 3 相当のシステムは限界時、ドライバーへと運転主権の移行を行う必要がある。この移行が上手く行われなかった場合、車両安定性、操作安定性が低下し重大な事故に繋がる可能性がある。この問題を解決するために本研究では人間の持つ応用性、協調性に着目した。人間の動作は他の人間にとっても感応性が高いため、人間同士による移行プロセスを解析、システムに組み込む事で安全な運転主権の移行が実現可能と考えられる。

人間同士で協調運転を行うため専用の実験装置を作成、ドライビングシミュレーター上の高速道路で実験を行った。評価方法として、被験者間でのエネルギーの流れに注目した運転状態判断法、各被験者がステアリングに入力した仕事量、各被験者のステアリング入力に要したトルク量とステアリング角速度の相関、主観評価の 4 つを判断方法とし考察を行った。

実験は 2 人 1 組で 9 組行い、各組 10 回走行した。高速道路のインターチェンジでの走行車線から減速車線への車線変更を想定、その間に運転主権の移行を行い高速道路から降りる運転動作とした。システム役のドライバー A から人間のドライバー役のドライバー B へ運転主権を受け渡す事を想定し、実験開始からドライバー A 単独でインターチェンジ付近まで運転を行う。その後ドライバー B がステアリングを保持、運転に介入し人間同士の協調した共同運転が開始され車線変更を行う。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 のみの運転操作に移る一連の流れを運転主権の移行と設定した。

ステアリング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た運転状態判断方法で各値の正負より「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」、「両ドライバーエネルギーを供給状態」に分類した。「両ド

ライバーエネルギーを供給状態」は互いに同方向にステアリング操作を行っている状態であり、それ以外はどちらか一方がエネルギー的に主導的となり、もう一方がステアリング操作の負荷となっている状態である。人間同士の協調運転は「両ドライバーエネルギー供給状態」の割合が最も多く、各組運転状態の切り替え回数、ステアリング操作に要した仕事量は減少傾向が見られる。つまり互いに協調して運転操作を行っており、習熟により安全かつスムーズな運転主権の移行ができるようになったといえる。また、運転操作から運転主権を判断するため、被験者が自身の運転を主導的もしくは従動的であったか判断する主観評価と、協調運転中の各被験者のステアリング入力トルクとステアリング駆動トルクの相関係数を求めた。結果から、車線変更中にステアリング操作を先に行うと主導的と判断する結果が多い。実際の運転主権の移行ではドライバーの判断基準を判断し、それぞれのドライバーが好むシステムの運転特性を設定することが有効だと考えられる。

本研究では、習熟による運転動作の安定化、ステアリング操作と主従の評価の関係について提案した。これらをドライバーの運転特性を探る上での要因として、ドライバーに適応するシステムを検討可能になることが示唆される。

主観評価による主導的、もしくは従動的に運転操作を行ったか要因としてステアリング入力を挙げたが、全ての運転実験では当てはまらないため他の要因もあると考えられる。被験者間でのコミュニケーションや被験者の性格特性が要因に挙げられるため、今後は診断テスト等により、各被験者の性格を取得、実験中のコミュニケーションと比較する事で、ドライバーの運転特性の取得、人間同士の協調運転特性をより明らかにすることを目指す。

参考文献

- [1] 本田技研工業「ACC（アダプティブ・クルーズ・コントロール） | Honda の安全技術」, <<https://www.honda.co.jp/tech/auto/safety/ACC.html>>(参照 2019-02-05)
- [2] Volvo Group 「Volvo Trucks and FedEx demonstrate Truck Platooning」 , <<https://www.volvogroup.com/en-en/news/2018/jun/news-2971141.html>>(参照 2019-02-05)
- [3] 国土交通省「衝突被害軽減ブレーキについて | 自動車総合安全情報」, <<http://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/esc.html>>(参照 2019-02-05)
- [4] マツダ株式会社「【MAZDA】LAS（レーンキープアシストシステム） | アクティブセーフティ技術」, <http://www.mazda.com/ja/innovation/technology/safety/active_safety/las/>
- [5] SAE, Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, SAEJ3016-201609(2016)
- [6] Audi 「A8」 <<https://www.audi.co.jp/jp/web/ja/models/a8/a8.html> >(参照 2019-02-05)
- [7] Department of Motor Vehicles 「California: report of traffic accident involving an autonomous vehicle」 , <https://www.dmv.ca.gov/portal/wcm/connect/bc21ef62-6e7c-4049-a552-0a7c50d92e86/Cruise_Automation_01.08.16.pdf?MOD=AJPERES> (参照 2019-02-05)
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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

- [11] 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
- [12] 本間 亮平, 若杉 貴志, 小高 賢二, “高度自動運転における権限移譲方法の基礎的検討－自動運転時の覚醒度低下や運転以外の作業と権限委譲時のドライバ対応行動－”, 自動車技術会論文集 / 47 巻 2 号(2016)
- [13] 齋藤昂浩, 和田隆広, 園田耕平, ”Shared control を用いた自動運転から手動運転への切替時の操舵権限共有/委譲手法”, 自動車技術会大会学術講演会講演予稿集 2017 号 春季(2016)
- [14] Shahrman Abu Bakar, Ryojun Ikeura, Yoichiro Handa, Takemi Yano, Kazuki Mizutani and Hideki Sawai “Communication during the cooperative motion in the task of carrying an object between two human”, I Journal of Biomechanical Science and Engineering, vol.5, no.3(2010)
- [15] 服部 智哉, 羽柴 洋太, 長谷部 洋太, 池浦 良淳, 早川 聡一郎, 堤 成可, 沢井 秀樹, “人間同士による自動車の協調運転特性の解析”, 機械学会東海支部第 67 期総会講演会,(2018)

謝辞

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終始多大なる御指導，御鞭撻を親身になって行って頂き，深く感謝致し，厚く御礼申し上げます．また，大変お忙しい中本論文を査読して頂くと共に，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 野村由司彦教授に厚く御礼申し上げます．また，三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 早川聡一郎准教授には研究に関する有益なご助言を頂き，深く感謝致します．

三重大学工学研究科機械工学専攻 堤成可助教授には研究に関する有益な御助言を頂き，親身にご指導を行って頂き深く感謝致し，厚く御礼申しあげます．

さらに，澤井秀樹研究員には実験装置の製作や改良，研究の方向性を決めるにあたり，多大なる親身な御協力，御尽力，アドバイスをくださり，厚く御礼申し上げます．

そして，忙しい中で実験に協力していただいた被験者の方々には貴重な時間を割いていただき，深く感謝いたします．

また，研究グループとして共に実験を行った，長谷部洋太氏，森數大生氏に深く感謝しております．厚く御礼申し上げます．

また，同期の近藤伸也氏，多氣淳史氏，田中捷氏，戸田雄也氏，巴洪強氏には研究に関する助言を頂いたことだけでなく，日々の研究生活を辛い時も楽しく有意義なものとしてくれたことにも厚く御礼申し上げます．

また，研究室での生活を楽しく豊かにしていただいた，修士 1 年生と 4 年生の皆様に感謝し，今後のご活躍を期待しております．

最後に，大学生活をする上で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．