
令和元年度 修士学位論文

可変インピーダンス制御を用いた
操舵介入支援における
ドライバ受容性評価

指導教員 早川 聡一郎 准教授

三重大学大学院
工学研究科機械工学専攻
人間支援システム研究室
平田 拓也

目次

目次.....	1
第1章 序論.....	3
1.1 研究背景.....	3
1.2 研究目的.....	5
1.3 本論文の構成.....	7
第2章 可変インピーダンス制御を用いた操舵支援手法.....	8
2.1 ステアリング操舵支援アルゴリズム.....	8
2.2 可変インピーダンス制御手法の導入.....	9
第3章 実験方法.....	12
3.1 実験装置.....	12
3.2 ステアリングデバイス制御系の構成.....	14
3.3 実験条件.....	16
3.4 操舵介入支援実験のインピーダンスパラメータ設定.....	18
3.5 主観・客観評価項目.....	21
第4章 実験結果および考察.....	22
4.1 操舵支援に関する評価.....	22
4.2 操作性に関する評価.....	25
4.3 車両挙動面での安全性評価.....	32
4.4 受容性の向上する可変インピーダンスパラメータの考察.....	34
第5章 結論.....	37
5.1 結論.....	37

目次

5.2 今後の課題.....	38
参考文献.....	39
謝辞.....	43

第1章

序論

1.1 研究背景

近年、自動車の周辺環境を認識する技術が発達し、交通事故防止やドライバの負担軽減のため様々な先進運転支援システム（Advanced Driving Assistant System :ADAS）が研究・開発されている。例えば、衝突被害軽減ブレーキシステム(Advanced Emergency Braking System :AEBS)、アダプティブクルーズコントロール(Adaptive Cruise Control :ACC)、レーンキープアシスト(Lane Keeping Assist :LKA)などが挙げられる。これらの技術や法改正等により日本の交通事故発生件数は徐々に減少しているが、平成30年の交通事故発生件数は約43万件^[1]と依然として多く (Fig.1.1)、交通事故を無くするためにはADASの性能をさらに発展させていく必要がある。

ADASにはカメラやレーダー、超音波センサーが搭載され、自車周辺の車両・歩行者・道路標識などの検知・認識を行っており、警報により事前にドライバに危険を通知している。通知する技術は一部の高齢ドライバには効果がないことが判明しており^[2]、これから増加の一途をたどる高齢ドライバを考えると警報だけでなく、ステアリング操舵支援を積極的に行っていく必要がある^[3]と考える。しかし、操舵支援を行うADASとドライバの運転操作の干渉により、車両の安全性やドライバの受容性が低下することも問題視されている^[4]。このように、ADASの発展にはカメラ、レーダー、超音波によるセンシング技術の向上だけでなく、人間－機械間の協調性を向上させることも不可欠であると言える^[5]。つまり、より安全な自動車社会を実現するためには、ドライバの受容性にも着目し、安全性と受容性を両立させたADASの研究・開発を推進していく必要がある。そのため、本研究では操舵支援時におけるドライバの受容性向上を研究対象と

して取り上げてきた。

ドライバの受容性を向上させるために、本研究室では、池浦らは腕の機械的インピーダンスを推定し、その際の主観評価との比較から操舵感を定量的に取り扱った^[6]。また、ステアリングの挙動と操作性の関係を評価するものなど多くの研究が行われている^{[7]-[13]}。操作性は人間の感覚に基づくことが多く、操作性を向上させることは受容性の向上に関係すると考えられる。さらに、運転支援システムでは、運転支援時の警報発生タイミング^[14]やステアリング操舵支援時の情報共有がドライバに与える受容性を評価する研究^{[15]-[18]}やドライバとの親和性を高める障害物回避経路が設計されている^{[19][20]}。ドライバの受容性を考慮したステアリング操舵支援を行うため、ドライバの姿勢維持に関わる骨格筋活動、筋活動に着目し、フィーリングの良い操舵トルク量を検証する研究^{[21][22]}や駐車車両回避を正しく誘導できる操舵トルク量を検証する研究^[23]が行われてきた。しかし、操舵トルク指示型の操舵支援では、たとえ緩やかな操舵支援であっても高齢ドライバには負担がかかることが確認されている^[24]。予防安全のレベルをここからもう一段上げるには、積極的な運転支援が必要となり^{[25][26]}、これまで以上にシステムが運転操作に介入することになる。そのため、安全性と受容性を両立させたステアリング操舵支援システムを実現するためには、既存の操舵トルク指示型の操舵支援ではなく、従来と異なる操舵支援手法を導入する必要があると考えた。そこで、本研究室では、有住らは操舵支援にインピーダンス制御を導入することを提案し、駐車車両回避タスクにおいてドライバの受容性が向上することを確認した^[27]。しかし、操舵支援時の操作挙動と通常のドライバ操作挙動を比較すると依然として差異があり、操舵支援時の操作挙動をドライバの操作挙動により近づけることができれば受容性と安全性が向上できると考えられ、改善の余地がある。そのため、より受容性と安全性が向上する新たなインピーダンス制御型の操舵支援手法が必要と考えた。

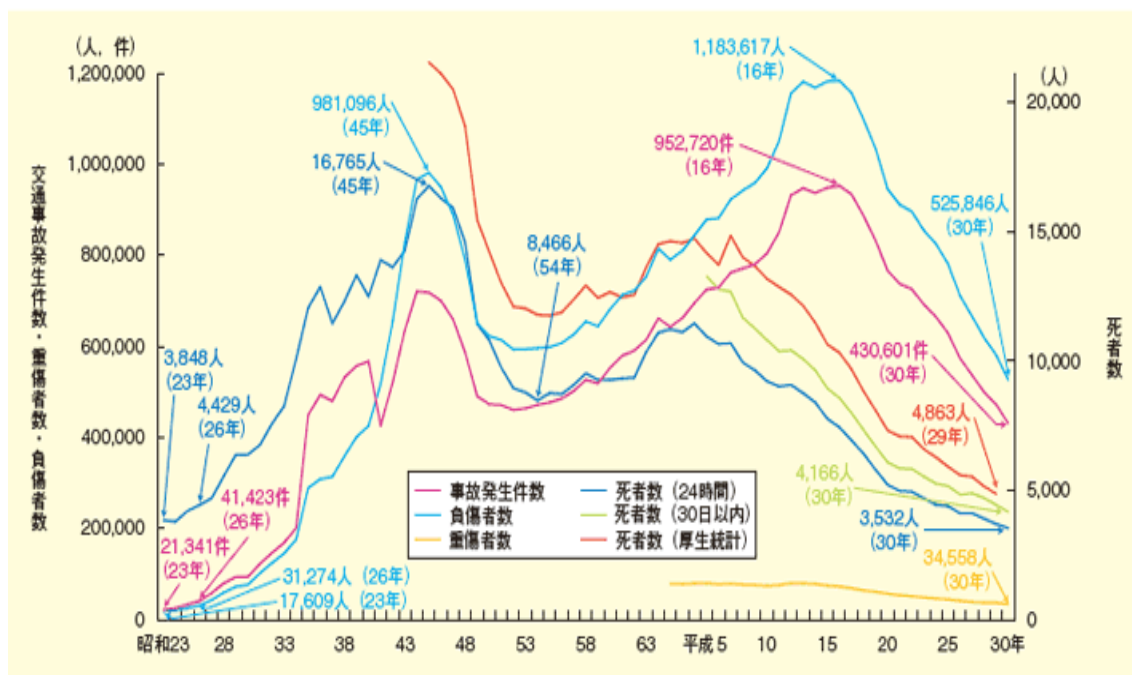


Fig. 1.1 Traffic fatalities

1.2 研究目的

より受容性と安全性が向上する新たなインピーダンス制御型の操舵支援手法については人間のインピーダンス特性について考える必要がある。人間の腕は操作中にインピーダンスを変化させることができるため^[28]，操舵を行っている間，機械側のインピーダンス特性も調整する必要があると考える。水平1自由度における人間とロボットの協調作業に関する研究では，ロボットが接する環境や人間の特性に応じてインピーダンス特性の調整を行う制御法が考案されており^[29]，ロボットと人間が協調して作業を行う場合は操作中に粘性係数を変化させる可変インピーダンス制御を適用することで操作性改善を行うことができたと報告されている^{[30][31]}。操作性は人間の感覚に基づくことが多く，受容性に関係すると考えられるため，可変インピーダンス制御は受容性の向上に有用であると言える。また，本研究室の従来研究では操舵支援中インピーダンスパラメータが一定としており，操舵支援時の操作挙動がドライバの操作挙動から次第に類似しなくなることや，逆に，開始時は操作挙動が類似していないが次第に類似することがあつ

た．そのため，操作挙動が可能な限り類似するようインピーダンスパラメータを変化させる必要がある．操舵支援時のインピーダンスを変化させ，操舵支援中常に操作挙動が類似するような可変インピーダンス制御が実現できれば，ドライバ受容性の向上する操舵支援システムが実現できるため有用であると言える．

このようにロボット分野において人間とロボットが協調して作業する際に人との親和性が高い結果が得られている可変インピーダンス制御を，ドライバと自動車の協調作業とみなせる運転支援システムに導入することでドライバの受容性向上が期待できる．しかし，ロボット分野では水平1自由度における並進系のマス・ダンパ系を対象としていたが，自動車での協調システムはステアリング操作における操舵支援を行うため，回転系システムであり，さらにインピーダンスにばね定数を追加する必要があり，調整する必要のあるパラメータが増加する．さらに，人間－機械協調の分野においては，協調作業をする際には，人間がマスター側となり，ロボットがスレーブ側として機能していた．しかし，操舵支援を行う場合は支援システムがマスター側になり，ドライバがスレーブ側になるため，人間－機械間のマスタースレーブ関係が逆転する．これらのことから，従来の可変インピーダンス制御の成果は活用できるか不明瞭である．

そこで，本研究では，可変インピーダンス制御を操舵支援システムに導入することを提案しその有効性を検証するとともに，受容性向上に寄与できる可変インピーダンスパラメータを明らかにすることを目的とする．ドライビングシュミレータにおいて，可変インピーダンス制御を導入した操舵支援システムを用いて，駐車車両回避タスクにおいて走行実験を行い，受容性と安全性の向上する可変インピーダンス制御手法について検討する．

1.3 本論文の構成

本章では，操舵支援システムの必要性や，問題点などを研究背景として述べ，その後，本研究において可変インピーダンス制御手法を操舵支援システムに導入する目的について述べた．第2章では，可変インピーダンス制御手法を用いた操舵支援手法について説明する．第3章では，本研究の実験装置や実験方法について述べる．実験条件，被験者への操作指示の方法について説明する．第4章では，可変インピーダンス制御を用いた操舵支援を行った際の実験結果を示し，受容性と安全性の評価および考察を行う．第5章では本研究の結論と今後の課題について述べる．

第2章

可変インピーダンス制御を用いた 操舵支援手法

本研究では、提案する可変インピーダンス制御を導入した操舵支援手法における有効性の検証を行い、どのインピーダンスパラメータを調整すればドライバの受容性や安全性向上に寄与するか検証することを目的としている。本章では、インピーダンス制御を実現するためのステアリング操舵支援アルゴリズムや可変インピーダンス制御を用いた操舵支援手法についての説明をする。

2.1 ステアリング操舵支援アルゴリズム

従来研究と同様に本研究の運転支援システムは文献[25]で示される上位のスーパーバイザ型協調制御システムなどから、操舵支援のためのステアリング操舵目標角 θ_t [rad]が与えられることを想定する。そして、これに基づき操舵支援時に操舵支援トルクを、

$$\tau_a = D_a \dot{\theta} + K_a (\theta - \theta_t) \quad (2.1)$$

としてステアリングに印加する操舵支援手法を採用している。ここで、印加粘性係数を D_a [Nm・s/rad]、印加ばね定数を K_a [Nm/rad]、目標ステアリング回転速度を θ_t [rad]とする。また、自動車の通常運転時のステアリングダイナミクスは、

$$J_m \ddot{\theta} + D_m \dot{\theta} + K_m \theta = \tau_h \quad (2.2)$$

と表現する。ここで、ステアリングのイナーシャを J_m [kg・m²]、粘性係数を D_m [Nm・s/rad]、ばね定数を K_m [Nm/rad]、ドライバのステアリングへの印加トルクを τ_h [Nm]とする。通常運転時にはドライバが感じるステアリングトルクは式(2.2)で表される図2.1(a)に示すような自動車ステアリング系のみのダイナミクスになっている。しかし、介入支援トルク τ_a をステアリングに印加することにより、粘性項変化とばね項による平衡点が

追加され図 2.1(b)のようにドライバが感じるダイナミクスが変更される．このようなダイナミクス変化により，操舵介入支援を行うのがインピーダンス制御を用いた操舵介入支援手法である．

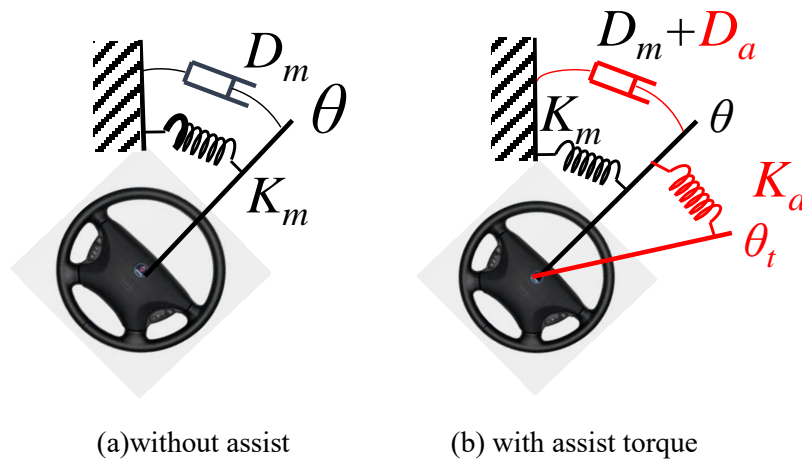


Fig. 2.1 Example of human lifting force

2.2 可変インピーダンス制御手法の導入

本研究室においてこれまで提案してきた従来の手法では，インピーダンスパラメータを常に一定としていたが，本研究ではインピーダンスパラメータを介入支援中に変化させる可変インピーダンス制御手法導入を提案する．調整するインピーダンスパラメータとして文献[28]を参考に，ここでは操舵支援粘性係数 D_a を時間変化させるものとした．従来のロボット分野での変化式を参考に，粘性係数を時間の反比例関係にして変化させ検証を行ったが，予備実験において受容性評価が向上せず操作性も悪かったため本研究では考慮対象外とした．そこで，今回は粘性係数を角速度の比例関係で検討を行い変化式は，

$$D_a(t) = a\omega(t) + D_0 \quad (0 \leq D_a \leq D_{max}) \quad (2.3)$$

と表す．ここで， a はゲインであり， ω [rad/s]はステアリング角速度， D_0 [Nm・s/rad]は操舵支援粘性係数の初期値， D_{max} [Nm・s/rad]は操舵支援粘性係数の変化最大値とする．操舵支援粘性係数 D_a を角速度 ω の比例関係にした狙いは，ステアリングの角速度が大きくなった場合には安全性を考慮する必要があるため，粘性を高くして角速度を抑えるためである．逆に，ステアリングの角速度が小さい時は動かしやすさを優先する必要があると考え，粘性を低く，つまり抵抗を低減して思い通りの操作ができるように設定した．また，操舵支援粘性係数の初期値 D_0 は，支援介入開始時のステアリング挙動を安定させるのに粘性値を初期から与える必要があるため設定し，操舵支援粘性係数 D_{max} は，実験装置の安全と仕様を考慮する必要があるため設定した．また，操舵支援にはインピーダンスにばね定数が存在しており，アシスト力に相当する操舵支援ばね定数 K_a についても時間変化させるものとし，

$$\begin{cases} K_a(t) = K_0 t / T & (0 < t \leq T) \\ K_a(t) = K_0 & (T < t < E) \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\begin{cases} K_a(t) = K_0 & (T < t < E) \end{cases} \quad (2.5)$$

と表す．ここで， t [s]は操舵支援が行われている時間とし， T [s]は支援切替時間とし， E [s]は操舵支援終了時間とする．操舵支援開始時から T 秒間は式(2.4)に従えばね定数 K_a が時間比例で増加していき， T 秒以降は式(2.5)のように一定値 K_0 とした．ここで， T は人間の反応時間に着目し設定する値とする． T 秒以前は操舵支援が動作してもドライバは反応できず，ハンドルがシステム入力に従って動作する状態と考える．実際，従来研究である操舵支援ばね定数 K_a が常に一定値をとっていた場合の結果を見ると，操舵介入支援開始時のステアリング角速度がドライバの操作よりも大きかったことから，受容性改善には人が不快に感じないように緩やかな支援となる必要があると考えた．そのため，反応時間までは支援システムのアシスト力を低減する必要があり，アシスト力に相当するばね定数 K_a を次第に増加する時間比例の関係にした． T 秒以降は人が随意運動でき支援システムに対応できると考えたため，ばね定数は一定値 K_0 とした．また，調整するパラメータとしてこの反応時間 T も考えられるが，本研究では対

象としないことにした。これは、支援中に人は環境に応じてインピーダンスを変化していると考え、受容性と操作性能を両立するためには常にシステムのインピーダンスを調整する必要があると考えたためである。そのため、本研究では、操舵支援粘性係数 D_a と操舵支援ばね定数 K_a を可変にした制御を行うものとした。これにより、操舵支援トルク τ_a は、式 (2.1) より以下の

$$\tau_a = D_a(t) \dot{\theta} + K_a(t) (\theta - \theta_t) \quad (2.6)$$

へと変更される。この提案手法を用いた操舵支援で走行実験を行い、有効性の検証を行う。

第3章

実験方法

本実験ではドライビングシミュレータ(以下 DS と略す)を用いて駐車車両回避タスクを対象とした走行実験を行った。本章では、実験装置や実験条件、インピーダンスパラメータ設定、評価項目について説明をする。

3.1 実験装置

実験に使用した DS の構成を図 3.1 に示す。また、その外観を図 3.2 に示す。本 DS は3つの映像表示ディスプレイを備えており、DD モータに直結した EPS を模擬したステアリングデバイスとサーボパック、アクセル、ブレーキ、運転席、PC とサブモニタから構成されている。また、PC はドライバの車両操作情報に基づいて車両ダイナミクスを計算し、その結果に基づき運転映像の表示や効果音出力を行っている。また、後述のインピーダンス制御により算出されるトルク指令値をサーボパックへ送り、DD モータを制御周期 3ms で制御している。本ステアリングデバイスで使用している DD モータは定格トルク 5Nm(最大 15Nm)、エンコーダ分解能は 18bit である。

ステアリング装置は図 3.3 に示すようにアルミニウム製の土台にダイレクトドライブモータ（安川電機株式会社 SGMCS-05CD11）（以下 DD モータと略す）を締結し、ステアリングホイールをシャフトにより直結させている。また、軸系を支持している矩形の部品にはラジアル軸受を取り付けており、上部のボルトの締めつけにより摩擦力を調整できる機構となっている。本実験では減衰率を 0.01 となるように締め付けトルクを 5Nm としている。

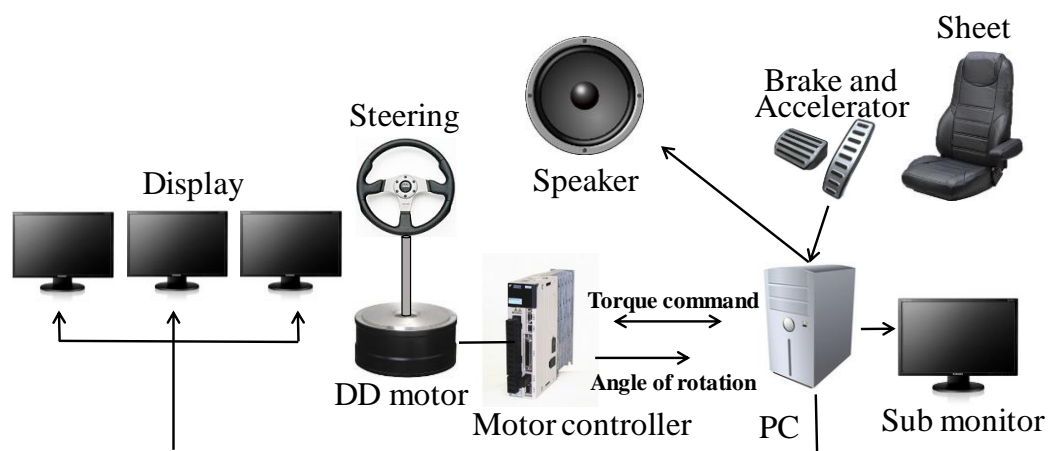


Fig. 3.1 Configuration of DS

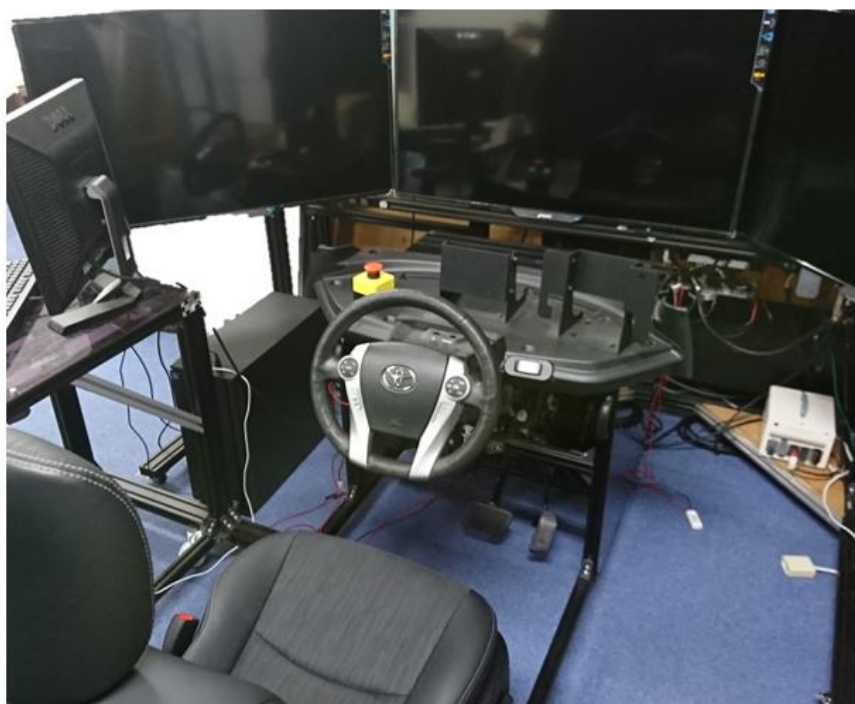


Fig. 3.2 Appearance of the device



Fig. 3.3 Steering device

3.2 ステアリングデバイス制御系の構成

ダイレクトドライブモータを用いたステアリングデバイスは自動車のステアリングダイナミクスを再現するため、支援時だけでなく通常時よりインピーダンス制御を採用する。構築したステアリングデバイスのダイナミクスを近似表現すると、

$$J\ddot{\theta} + D\dot{\theta} = \tau_h - \tau_m \quad (3.1)$$

と表せる。ここで、ステアリング回転角度を θ [rad]、装置のイナーシャを J [kg・m²]、装置の粘性係数を D [Nm・s/rad]、モータの指令トルクを τ_m [Nm] とする。ドライバが操作した際に、ドライバに感じさせたい想定する自動車の通常のスアリングダイナミクスは(2.2)式であり、(2.2)式と(3.1)式から τ_h を消去することで、

$$\tau_m = (J_m - J)\ddot{\theta} + (D_m - D)\dot{\theta} + K_m \theta \quad (3.2)$$

が導出される。この(3.2)式により求めた τ_m をモータの指令トルクとして制御することで、DS において自動車のステアリングダイナミクスを再現している。本実験で使用するインピーダンスパラメータの一覧を Table 3.1 に示す。なお、本実験用の DS の場合には式

(3.1)を,

$$J\ddot{\theta} + D\dot{\theta} = \tau_h - (\tau_m + \tau_a) \quad (3.3)$$

と修正することで操作介入支援時の、操舵支援トルク項 τ_a が追加される形となり、 τ_m と τ_a の和がモータへの指令トルクとなる。この制御系を有する実験装置を用いて実験を行い、可変インピーダンス制御を導入した操舵支援手法の安全性とドライバ受容性について評価を行う。

Table 3.1 List of system parameters

θ [rad]	Steering rotation angle
J [kg·m ²]	Inertia of the device
D [Nm·s/rad]	Coefficient of viscosity of the device
τ_h [Nm]	Driver input torque
τ_m [Nm]	Output torque of motor
J_m [kg·m ²]	Steering inertia
D_m [Nm·s/rad]	Steering coefficient of viscosity
K_m [Nm/rad]	Steering torsional spring constant
D_a [Nm·s/rad]	Steering assist coefficient of viscosity
K_a [Nm/rad]	Steering assist torsional spring constant

3.3 実験条件

本実験は可変インピーダンス制御を導入した操舵支援システムを用いて、従来研究であるインピーダンス一定の操舵支援システムに対し、提案手法である可変インピーダンス制御を用いた操舵支援手法の有効性を検証するとともに、ドライバ受容性向上に寄与できる可変インピーダンスパラメータを明らかにする目的で行った。

本実験は図 3.4 に示すような道路環境を用意し、駐車車両回避タスクを対象として実験を行った。また、この DS における仮想走行環境は、一方通行の道路幅 7.0m の市街地直線道路を想定しており、走行開始地点から 120m 先に、全長 4.69m、全幅 1.69m の車両が停車している。また、この道路の左右は壁となっている。なお、この走行環境を用いた実験は緊急時のステアリング支援ではない。緊急時であればドライバの受容性を考慮するのではなく、安全を第一に考える必要がある。つまり、車両の安全をより早く確保するための運転支援であり、ドライバの受容性が重要視される先読み運転支援を対象とし、停止車両回避行動時の介入支援制御を想定タスクとしている。この実際の走行中の画面を図 3.5 に示す。被験者は駐車車両のある狭い道路の左端を直進し、先読み運転型操舵支援が介入すると同時に停止車両の回避操作を行う。その際、速度変化により上位のスーパーバイザ型協調制御アルゴリズムのパラメータが変化することや、セルフアライニングトルクなど操舵系の非線形特性影響を考慮し、走行速度は 30 km/h に一定とした。また、本実験では操舵支援を全ての被験者に同条件で稼働させるため、操舵支援が発生する状況に関して被験者に説明し、事前の減速や回避行動は行わないよう指示した。また、被験者は実験中には両手でステアリングを把持し、手をステアリングから離さないよう指示している。実験は 20 代の男性 8 名を被験者として行った。

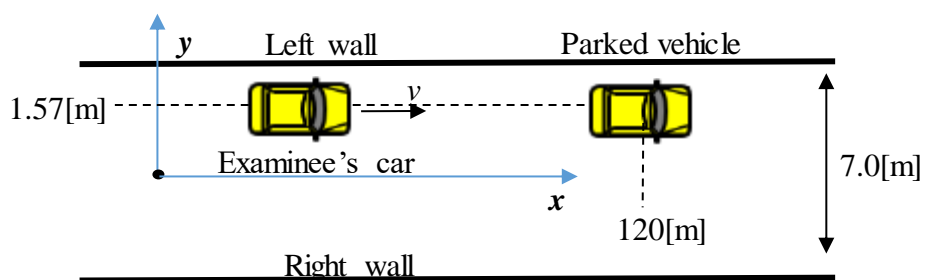


Fig. 3.4 Experimental environment in DS



Fig. 3.5 Road environment view

3.4 操舵介入支援実験のインピーダンスパラメータ設定

通常状態でのステアリング系のインピーダンスパラメータを表 3.2 に示す値に設定した。次に、第2章で提案した粘性係数とばね定数の変化式中の各種パラメータについて述べる。操舵支援粘性係数 D_a の変化式は(2.3)式で表した。ここで、ゲイン a は事前の予備実験により操舵支援時のステアリング角速度の挙動が人の操作挙動と近くなる値として 30 と設定した。また、操舵支援粘性係数の初期値 D_0 は $17.92 \text{ Nm}\cdot\text{s}/\text{rad}$ とした。これは、従来研究で用いられていたドライバ受容性の高い値である。粘性係数の上限値 D_{max} は $30.07 \text{ Nm}\cdot\text{s}/\text{rad}$ とした。これは実験装置の安全性と仕様を考慮し定めた。次に、提案する印加ばね定数 K_a の変化式は(2.4)式で表した。ばね定数 K_0 は $11.5 \text{ Nm}/\text{rad}$ とし、従来研究で用いられていたドライバ受容性の高い値を設定した。また、支援切替時間 T は 0.3 s とした。これらをまとめたものを表 3.3 に示す。

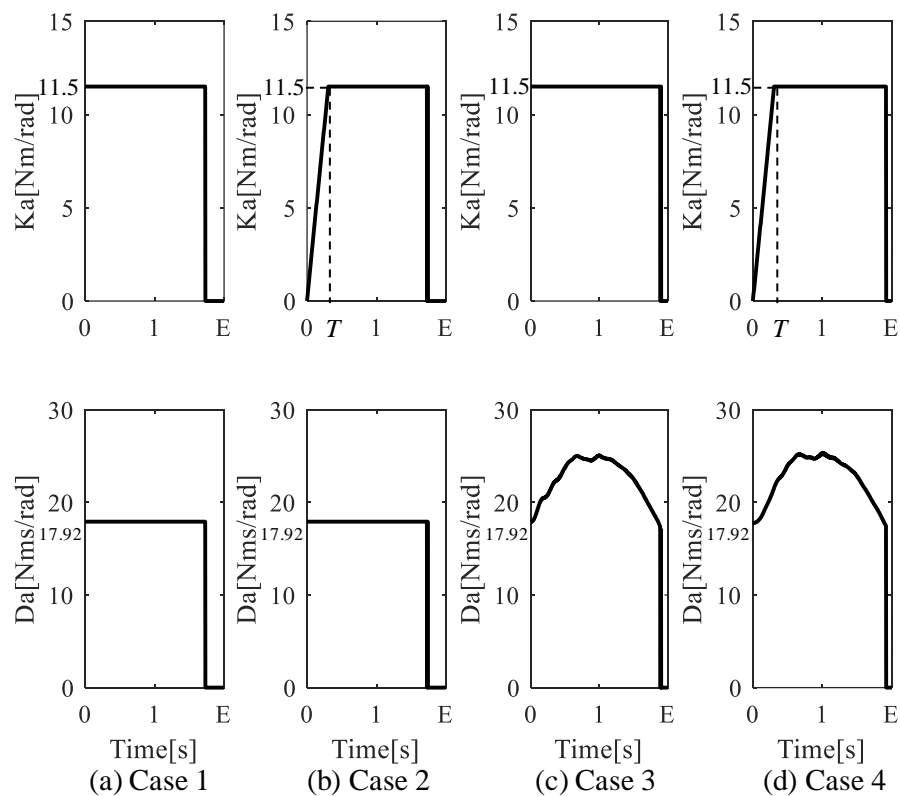
実験で用いる操舵支援ばね定数 K_a および操舵支援粘性係数 D_a の組み合わせは図 3.6 に示す 4 パターン用意した。グラフの縦軸はそれぞればね定数、粘性係数を、横軸は操舵支援時間を示しており、E は操舵支援終了時間を示している。グラフはばね定数および粘性変化の一例を示している。Case1 はばね定数 K_a と操舵支援粘性係数 D_a は共に一定値である。Case2 はばね定数 K_a 可変値と操舵支援粘性係数 D_a 一定値とした。Case3 はばね定数 K_a 一定値と操舵支援粘性係数 D_a 可変値である。Case4 はばね定数 K_a 可変値と操舵支援粘性係数 D_a 可変値の計 4 条件とした。これらをまとめたものを表 3.4 に示す。

Table 3.2 Impedance parameters

J	$0.03[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$
D	$0.01[\text{Nm} \cdot \text{s}/\text{rad}]$
J_m	$J+0.001[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$
D_m	$D+0.3[\text{Nm} \cdot \text{s} / \text{rad}]$
K_m	$0.45[\text{Nm}/\text{rad}]$

Table 3.3 Parameters of eq.(2.3) , eq.(2.4) and eq.(2.5)

a	$30[-]$
D_0	$17.92[\text{Nm} \cdot \text{s} / \text{rad}]$
D_{max}	$30.07[\text{Nm} \cdot \text{s} / \text{rad}]$
K_0	$11.5[\text{Nm} / \text{rad}]$
T	$0.3[\text{s}]$

Fig. 3.6 Four time trajectories of spring term K_a and damping D_a Table 3.4 Combination of K_a and D_a

$D_a \backslash K_a$	Constant 11.5Nm/rad	Variable eq.(2.4)&(2.5)
Constant 17.92Nm·s/rad	Case 1	Case 2
Variable eq.(2.3)	Case 3	Case 4

3.5 主観・客観評価項目

本実験では、1回の回避操作を行う度に、被験者には以下の主観評価項目について回答を行ってもらった。主観評価項目は以下の評価項目中の A から E の 5 項目である。評価項目 A から D は絶対評価で、評点 3 を中心とする 5 段階(1, 2, 3, 4, 5)で回答を行ってもらい、評価項目 E は相対評価であり、評点 2 を中心とする 3 段階(1, 2, 3)で回答を行ってもらった。また、実験を行う順番により起こる順序効果を考慮し実験を行う順番を 2 種類用意し、被験者には 2 種類の内どちらかの順番で実験を行ってもらった。また、評価 F, G, H は客観評価項目であり、実験時の運転操舵データに基づき評価した。

Table 3.5 Evaluation items

A	操舵支援開始時のステアリング角速度は自分の操作と比べどう感じたか
B	操舵支援中のトルクへの不快感
C	ステアリングの操作は行いやすいか
D	この操舵支援を良いと思うか
E	操舵支援の良し悪しの比較
F	操舵支援時のステアリング角速度の操作挙動
G	操舵支援時のステアリング角速度の最大値
H	車両の走行軌跡

第4章

実験結果および考察

本章では実験結果を示し、提案する可変インピーダンス制御手法が従来手法に対して受容性および安全性がどのように変化するかについて述べ、受容性向上に寄与できる可変インピーダンスパラメータについて考察する。

4.1 操舵支援に関する評価

評価項目 A である操舵支援開始時のステアリング角速度を自分の操作と比べてどのように感じたかに関する評価結果を表 4.1 に示す。評価は 1 がかなり遅い、2 が遅い、3 が同じ、4 が速い、5 がかなり速いとなっている。また、本研究の実験での評点の平均値を示している。この表は 8 名の被験者が各実験条件で 4 試行ずつ行った計 32 ポイントの結果を示している。さらに、評点の平均と分散のグラフを図 4.1 に示す。実験結果を見てみると Case 4 においてステアリング角速度が自分の操作と同じと感じた回答数が最も多いが、全体的に同じと評価した回答数が多いことが確認できる。また、粘性係数一定である Case1 と Case2 において速く感じている結果となっており、操作が速いと安全性が低下すると考えられるため安全性が懸念である。

次に、評価項目 B である操舵支援中のトルクへの不快感に関する評価結果を表 4.2 に示す。評価は 1 が全く不快と思わない、2 が不快と思わない、3 がどちらとも思わない、4 が不快と思う、5 がかなり不快と思うとなっている。また、評点の平均を図 4.2 に示す。評点の平均が小さいほど受容性の高い操舵支援手法である。さらに、従来手法である Case1 に対する増減の割合を百分率に換算したものを表 4.3 に示す。負の数値は減少を、正の数値は増加を示している。これらの結果を見ると、ばね定数 K_a が一定の支援手法である Case 1 と Case 3 においてかなり不快に感じた被験者が存在しており、評

点の平均値も高いため評価が良くないことが確認できる。反対に、ばね定数 K_a が可変の支援手法である Case 2 と Case 4 においては不快と感じなかった回答数が多く、従来手法に対してそれぞれ 9.7%, 11.8% の受容性評価の向上が確認できる。これらのことからばね定数 K_a を可変にすることで受容性が向上することを確認できた。

Table 4.1 Steering angle velocity compared with own driving

Evaluation	1	2	3	4	5	Ave.
Case 1	1	6	13	11	1	3.16
Case 2	0	3	16	13	0	3.31
Case 3	5	7	15	5	0	2.63
Case 4	6	2	17	7	0	2.78

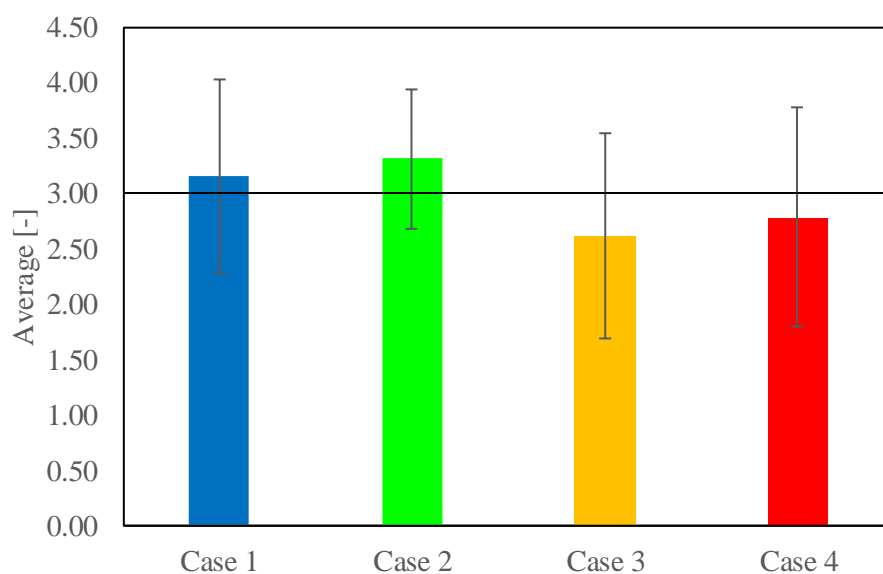


Fig. 4.1 Steering angle velocity compared with own driving (average)

Table 4.2 Discomfort about steering assist torque

Evaluation	1	2	3	4	5	Ave.
Case 1	0	12	12	7	1	2.91
Case 2	4	12	8	8	0	2.63
Case 3	0	9	10	11	2	3.19
Case 4	7	8	9	8	0	2.56

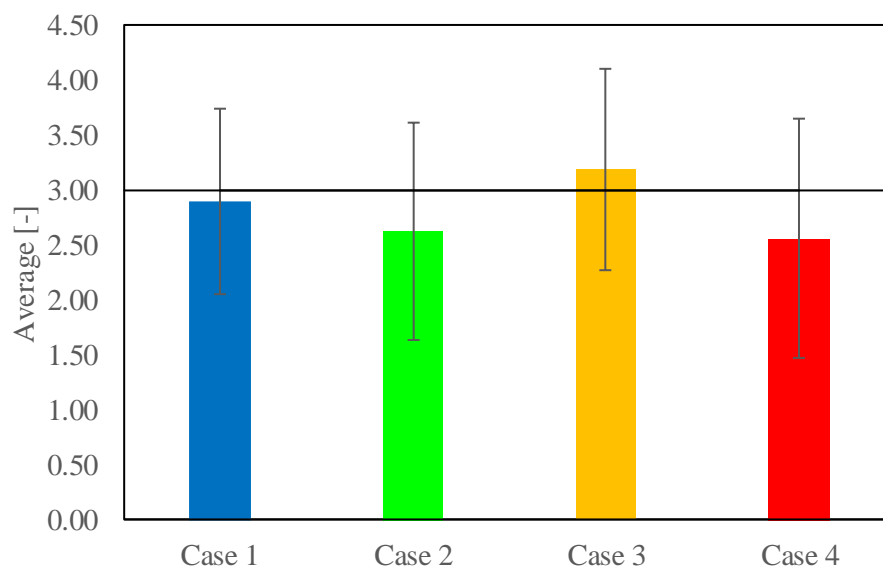


Fig. 4.2 Discomfort about steering assist torque (average)

Table 4.3 The Change percentage of Case1 (Evaluation item B)

	Case 2	Case 3	Case 4
Percentage	-9.7	9.7	-11.8

4.2 操作性に関する評価

ステアリングの操作性に関する評価項目 C の結果を表 4.4 に示す. 評価は 1 がかなり操作しにくい, 2 が操作しにくい, 3 が普通, 4 が操作しやすい, 5 がかなり操作しやすいとなっている. また, 評点の平均のグラフを図 4.3 に示す. 評点の平均が大きいほど操作性が良い操舵支援手法である. さらに, 従来手法である Case1 に対する増減の割合を百分率に換算したものを表 4.5 に示す. 負の数値は減少を, 正の数値は増加を示している. 結果を見ると, ばね定数 K_a が可変である Case 2 と Case 4 において操作性評価が Case 1 に対してそれぞれ 4.1%, 9.2% 向上することが確認できた.

ここで, 操舵支援の操作性が向上した要因をステアリング角速度から考察する. Case1 から 4 の操舵支援時のばね定数 K_a と粘性係数 D_a およびステアリングの角速度を示したグラフを図 4.4 から 4.7 に示す. 図 4.4 から 4.7 の縦軸は上から操舵支援ばね定数, 操舵支援粘性係数, ステアリング角速度を示しており, 横軸は支援時間を示している. これらのグラフを見ると, 粘性係数 D_a を可変にした Case 3 と Case 4 において緩やかな挙動を取り角速度の値が小さいことが確認でき, 安定した運転ができていると考えられる. また, ステアリング角速度を 1 つにまとめたものを図 4.8 に示す. 図 4.8 の Normal とは支援システムの介入なく, 回避操作をドライバのみで行った際のステアリング操作を示している. また, 赤い四角で囲んだ範囲を拡大したものを図 4.9 に示す. この結果を見ると, ばね定数 K_a が可変である Case 2 と Case 4 では回避操作開始時の挙動が通常運転に近い挙動を示していることが確認でき, 主観評価結果で操作性が向上したことにつながると思われる. 反対に, ばね定数 K_a が一定である Case 1 と Case 3 では回避操作開始時の挙動が通常運転よりも大きいため, 操作性が向上しなかったと考えられる.

Table 4.4 Whether easy to operate the steering

Evaluation	1	2	3	4	5	Ave.
Case 1	1	5	17	9	0	3.06
Case 2	2	7	7	15	1	3.19
Case 3	2	11	11	6	2	2.84
Case 4	1	8	9	7	7	3.34

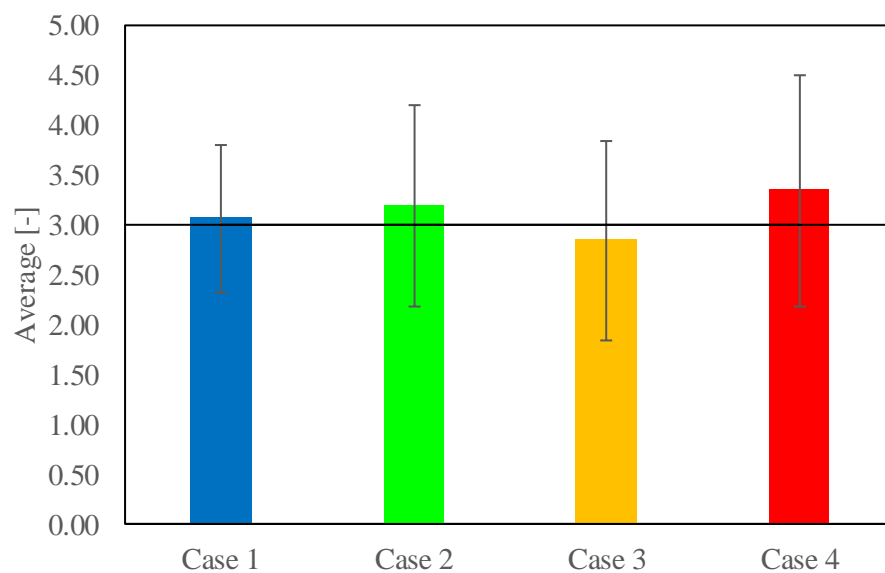


Fig. 4.3 Whether easy to operate the steering (average)

Table 4.5 The Change percentage of Case1 (Evaluation item C)

	Case 2	Case 3	Case 4
Percentage	4.1	-7.1	9.2

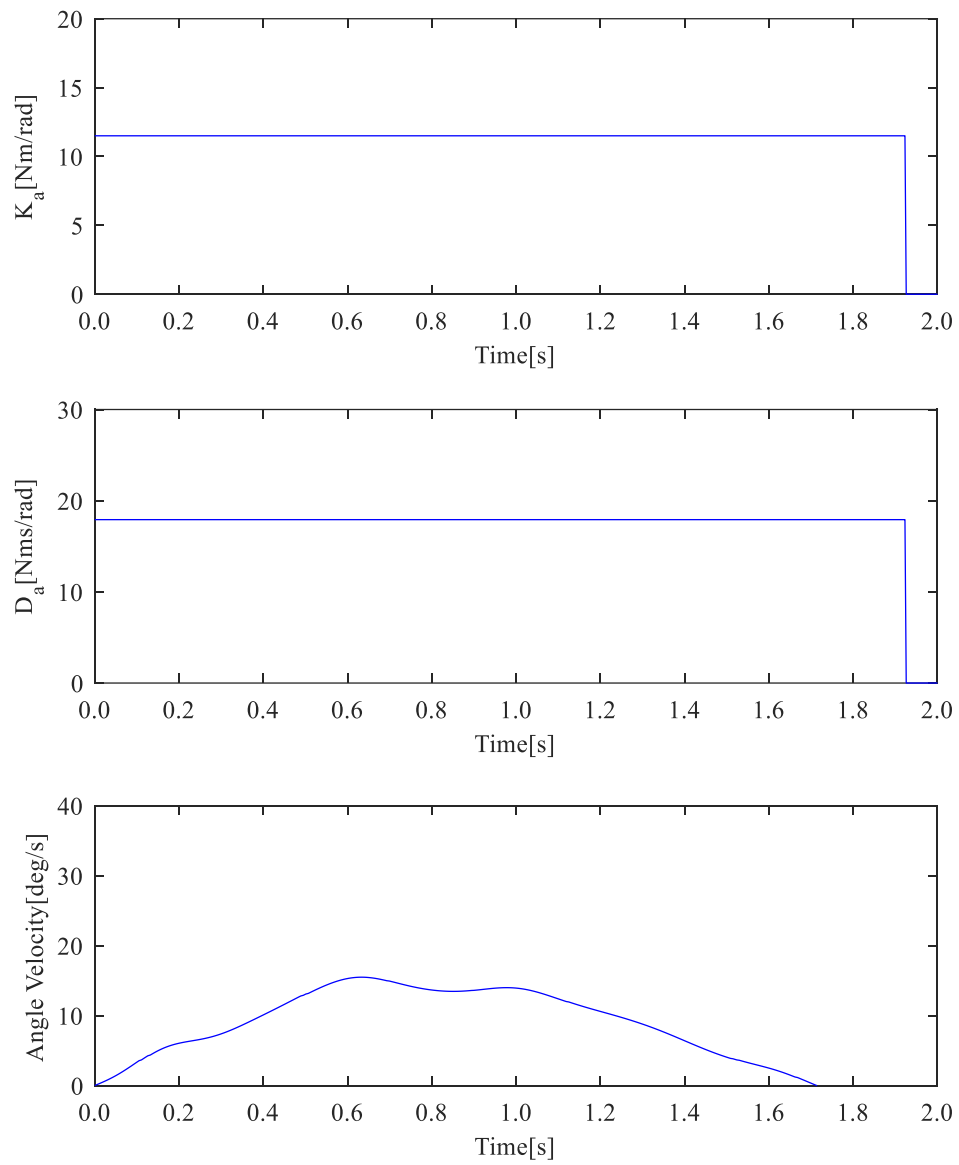


Fig. 4.4 Steering angle velocity (Case 1)

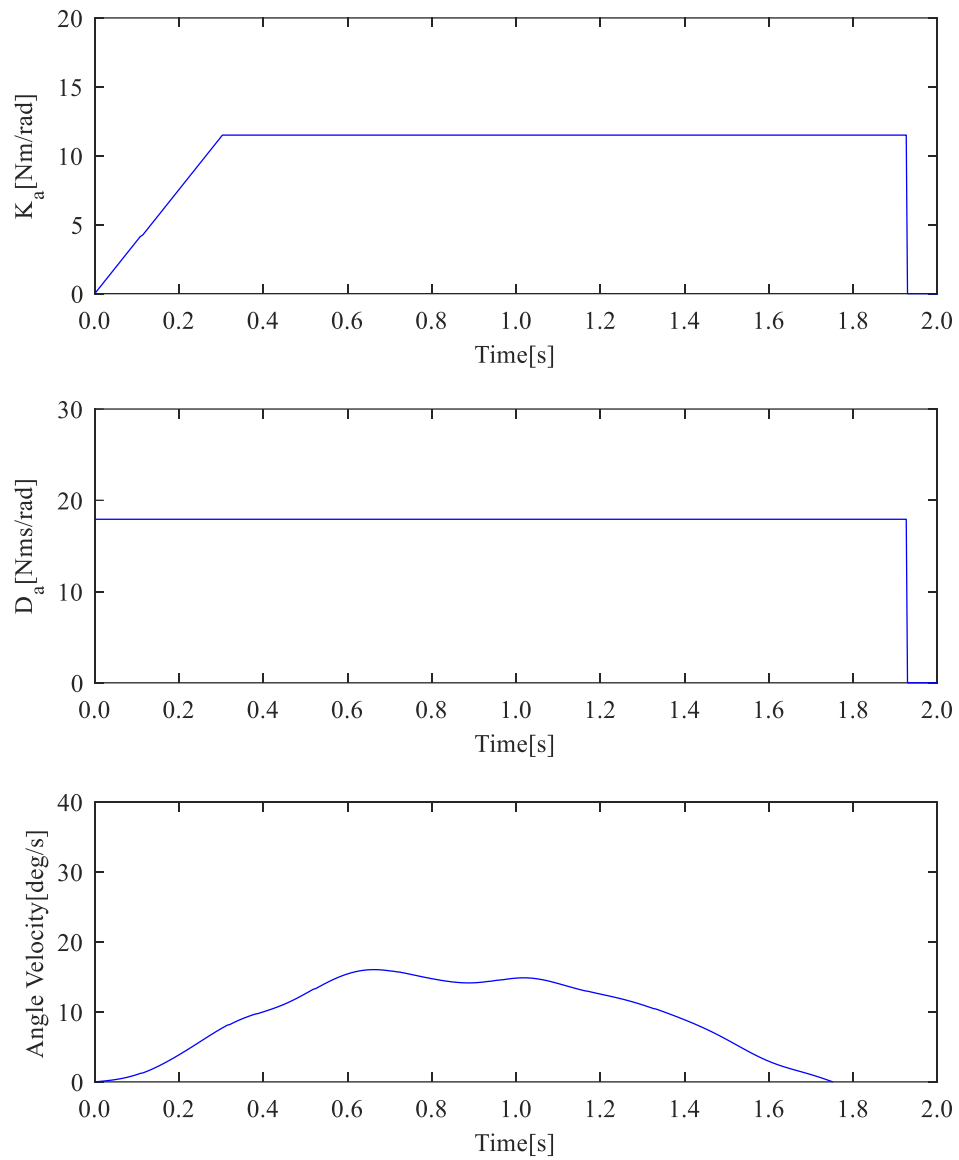


Fig. 4.5 Steering angle velocity (Case 2)

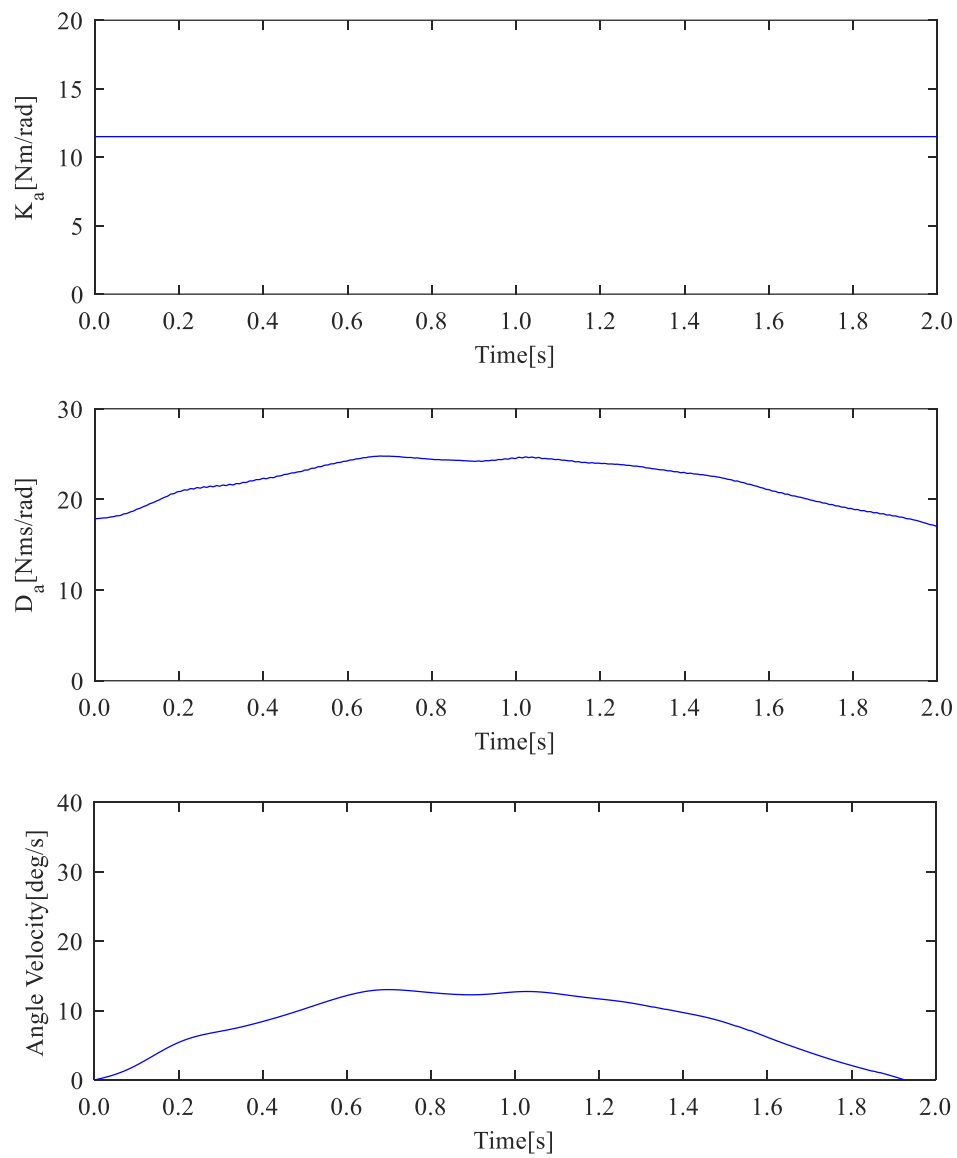


Fig. 4.6 Steering angle velocity (Case 3)

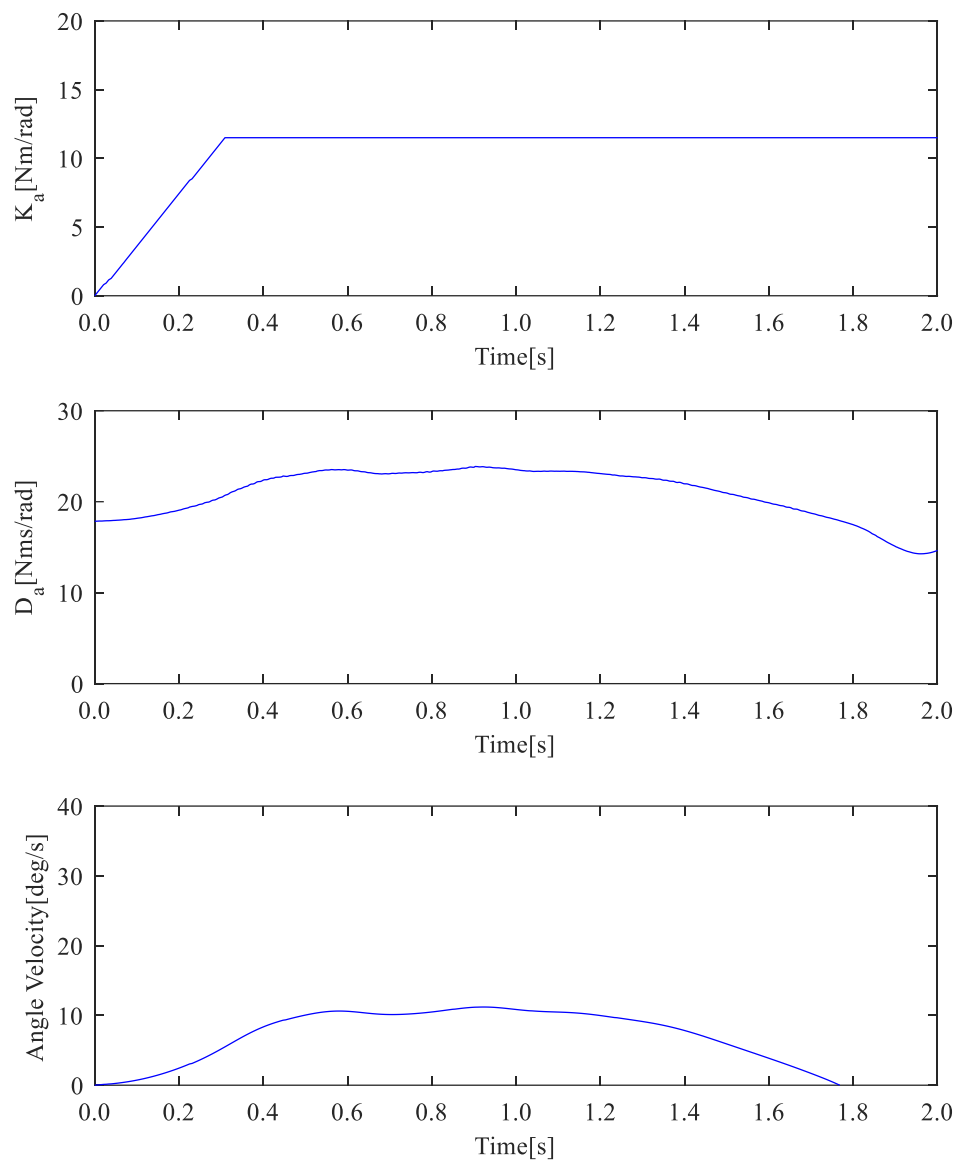


Fig. 4.7 Steering angle velocity (Case 4)

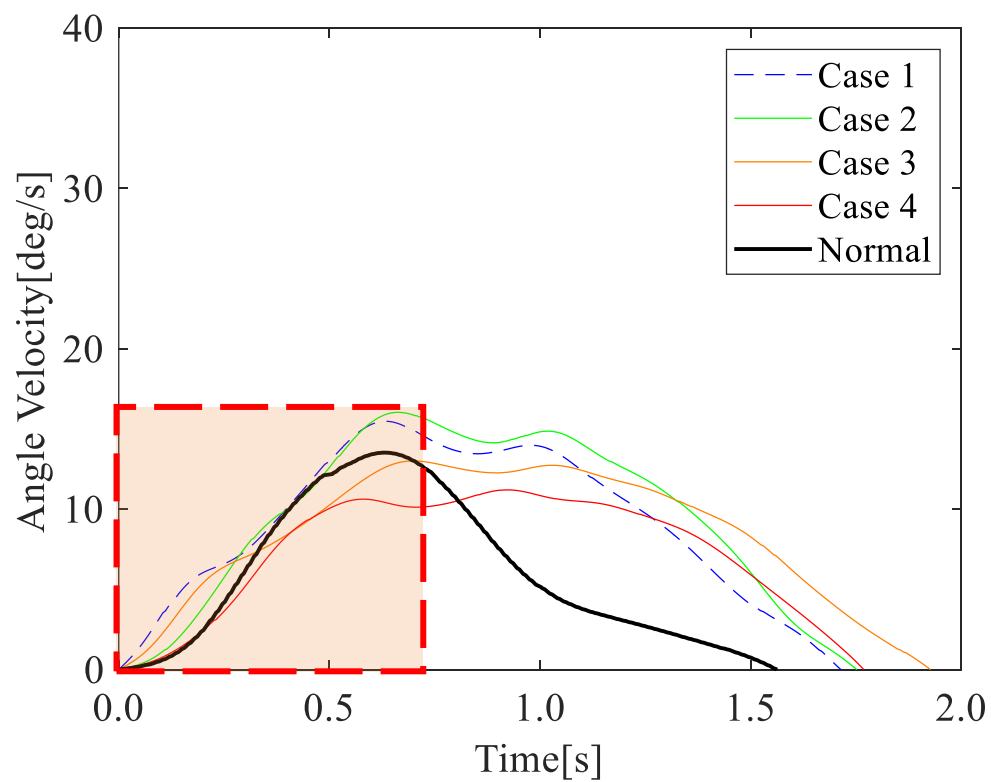


Fig. 4.8 Steering angle velocity

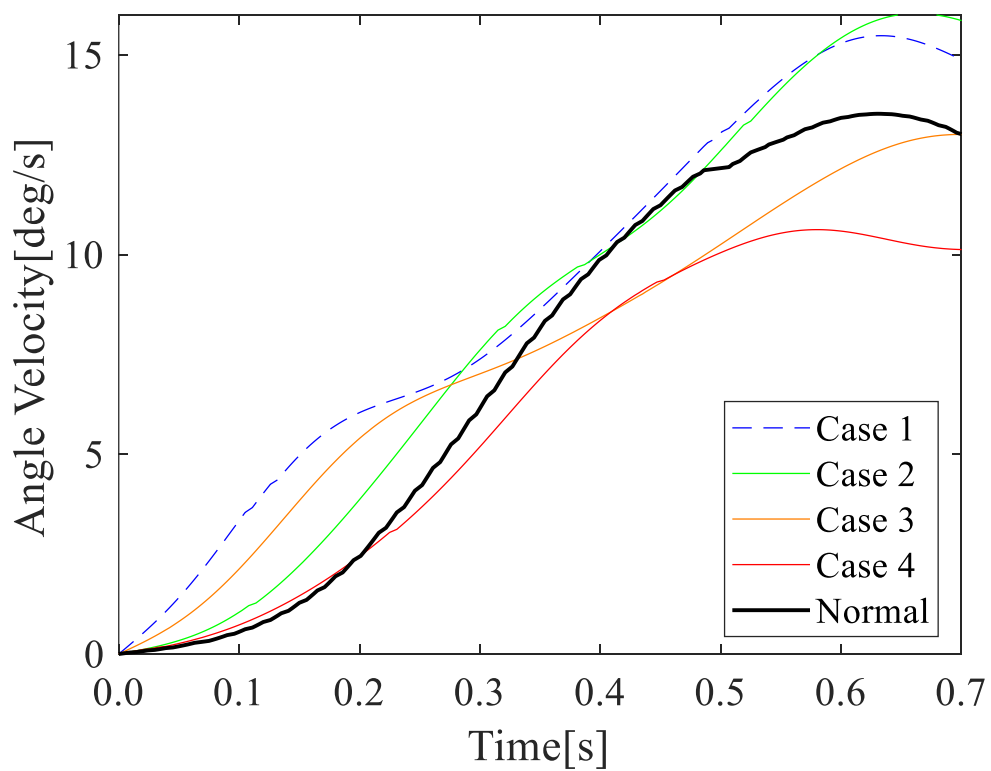


Fig. 4.9 Steering angle velocity (Enlarged view)

4.3 車両挙動面での安全性評価

操舵支援により、急激なステアリング操作となる危険性を考慮し、ステアリング角速度の値を評価する。操舵支援によるステアリング操作が通常運転時のステアリング操作速度と同じか、それより遅ければ安全に運転できると考えられる。ここで評価項目 G であるステアリング角速度の最大値のグラフを図 4.10 に示す。縦軸はステアリング角速度の最大値を示している。さらに、通常運転に対する増減の割合を百分率に換算したものを表 4.6 に示す。負の数値は減少を、正の数値は増加を示している。結果を見ると、どの結果においても Normal で示されるドライバの通常操作時よりもほぼ同じか遅くなることが確認でき、安全な運転ができています。さらに、評価項目 H である車両の走行軌跡を図 4.11 に示す。縦軸が車両横方向変位距離を、横軸が進行方向距離を示している。結果をみると、どの手法においても走行軌跡が近似した挙動をとっていることが確認でき、車両回避において同等の安全性が保たれているといえる。

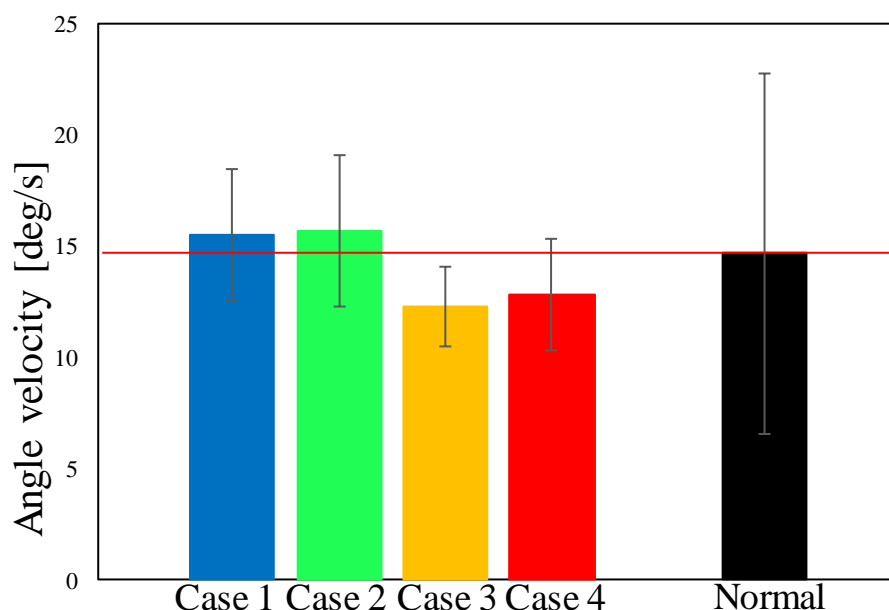


Fig. 4.10 Maximum of the angle velocity

Table 4.6 The Change percentage of Normal (Maximum of the angle velocity)

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Percentage	5.7	6.8	-16.2	-12.6

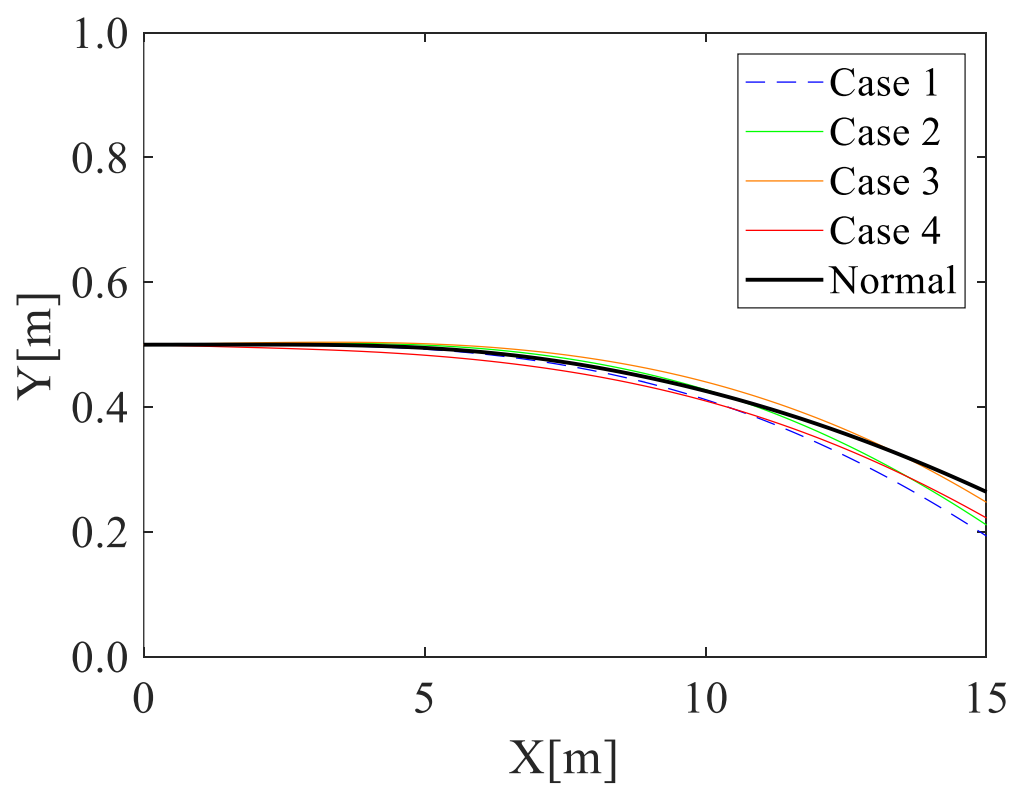


Fig. 4.11 Trajectory of the vehicle

4.4 受容性の向上する可変インピーダンスパラメータの考察

操舵支援に対する評価においては、ばね定数 K_a を可変にした支援手法で受容性が高い結果を示した。また、操作性に関する評価においては、ばね定数 K_a と粘性係数 D_a が可変である支援手法において操作性が向上し、支援開始時において通常運転と同じようなステアリング操作が行えるため、操作性が向上し、受容性が高い結果を示した。さらに、車両挙動面による安全性評価においては、どの手法においても同等の安全性を保つことができる結果を示した。以上より、提案手法における有効性を示し、受容性を向上させるにはばね定数 K_a を可変にする必要があるといえる。ここで、評価項目 D である操舵支援そのものの主観評価結果を表 4.7 に示す。評価は 1 が全く良いと思わない、2 が良いと思わない、3 がどちらとも思わない、4 が良いと思う、5 がかなり良いと思うとなっている。また、評点の平均のグラフを図 4.12 に示す。評点の平均が高いほど良い操舵支援であることを示している。さらに、従来手法である Case1 に対する増減の割合を百分率に換算したものを表 4.8 に示す。負の数値は減少を、正の数値は増加を示している。これらの結果を見ると、ばね定数 K_a が可変である Case 2 と Case 4 において評点の平均が従来手法である Case 1 に対してそれぞれ 7.8%、5.9% 高い値となり、総合的な主観評価もこれまでの評価結果と傾向が一致する結果となった。これは、ばね定数 K_a を時間比例にして支援介入開始時のトルクを抑制し、ドライバの通常運転時と類似した緩やかな操作挙動を実現できることによりドライバが安心して操作できるのではないかと考えた。さらに、本実験で用いた中で最も受容性の高い支援手法について評価するため、評価項目 E である操舵支援の良し悪しの相対評価結果を図 4.13 に示す。実験で用いた実験パターンにおいてそれぞれ比較を行った結果を示している。評価はひとつ前の支援に比べ、1.悪くなった、2.変わらない、3.良くなったで回答を行ってもらった。ここで、「悪くなった」の回答はひとつ前の支援の方が良い支援であると考え、ひとつ前の支援に「良くなった」の回答数を加算した。また、変わらないは加えないものとし、グラフを作成した。グラフは縦軸が「良くなった」の回答数を示している。ばね定数

K_a が可変である Case2 と Case4 において評価が高いことが確認でき、ばね定数を可変にすることで受容性が向上することが確認できた。そのため、従来のロボット分野での結果と異なることがわかった。以上より、提案手法である可変インピーダンス制御の有効性を確認し、受容性向上に寄与できる可変インピーダンスパラメータはばね定数 K_a であるといえる。

Table 4.7 Whether steering assist is good or bad

Evaluation	1	2	3	4	5	Ave.
Case 1	2	5	10	15	0	3.19
Case 2	1	6	6	16	3	3.44
Case 3	2	10	11	9	0	2.84
Case 4	1	7	8	11	5	3.38

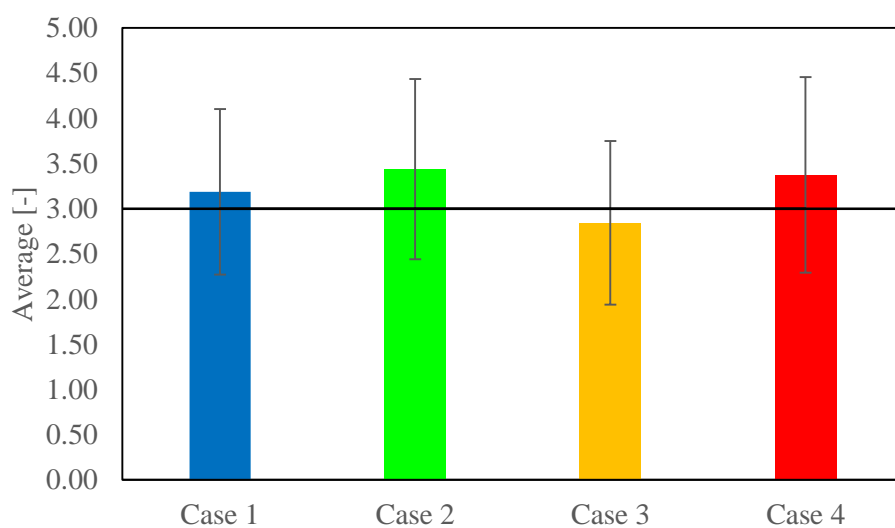


Fig. 4.12 Whether steering assist is good or bad (average)

Table 4.8 The Change percentage of Case1 (Evaluation item D)

	Case 2	Case 3	Case 4
Percentage	7.8	-10.8	5.9

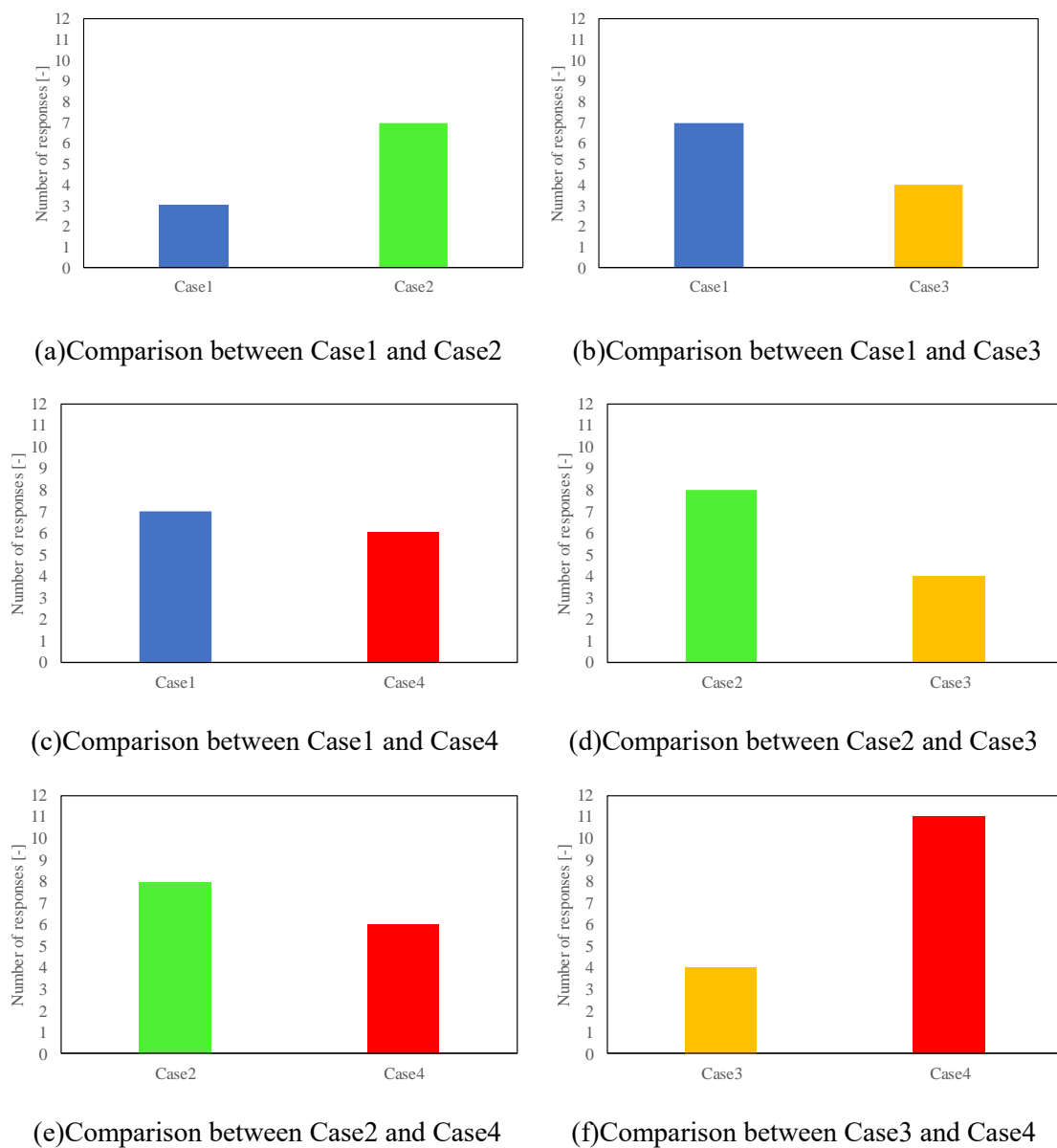


Fig. 4.13 Comparison between Cases

第 5 章

結論

5.1 結論

人が操作しやすい操舵支援システムを実現するために、本研究ではロボット分野において人間とロボットが協調して作業する際に人との親和性が高い可変インピーダンス制御を、ドライバと自動車の協調作業とみなせる運転支援システムに用いることを提案し、受容性と安全性の向上を試みた。しかし、従来のロボット分野の知見が活用できるか不明瞭であり、受容性と安全性の向上する操舵支援実現のためには明らかにする必要があった。ゆえに、本研究では、提案手法の有効性を検証するとともに受容性向上に寄与できる可変インピーダンスパラメータを明らかにすることを目的とした。

本研究では、調整するインピーダンスパラメータは操舵支援ばね定数 K_a と粘性係数 D_a の 2 種類でありパラメータ一定と可変の 2 種類の組み合わせで計 4 条件用意し、駐車車両回避タスクにおいて実験を行った。実験の結果、操舵支援ばね定数 K_a を可変にすることで受容性が向上することが確認でき、回避操作開始時のステアリングの挙動が通常運転に近い挙動をとるようになり人に近い操舵支援ができるようになった。また、車両挙動面による安全性評価においては、どの手法においても同等の安全性を保つことができる結果を示した。以上より、提案手法の有効性を確認し、ドライバの受容性向上に有効な可変インピーダンスパラメータはばね定数 K_a であるとの結論を得た。また、ばね項が存在する操舵支援システムは従来のロボット分野の可変インピーダンス制御における結果とは異なることが確認できた。

5.2 今後の課題

本研究の先にある最終目標は、「ドライバ受容性と安全性の両立する操舵支援手法」である。しかし、本研究では、受容性と安全性の向上に寄与できる可変インピーダンスパラメータを模索したが、調整方法においては不十分であり、依然として人間の操作全体に類似する最適な支援手法には至っていない。そのため、本研究で成しえなかったインピーダンスパラメータの詳細な調整方法について今後模索して確立していくのが今後の課題である。

参考文献

- [1] “道路交通事故の動向”，内閣府「令和元年交通安全白書（全文）」(参照日 2019/12/10)
[Online]https://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/r01kou_haku/zenbun/genkyo/h1/h1b1s1_1.html
- [2] 里見洋平，村野隆彦，阿賀正己，米川隆：「ドライビングシミュレータを用いた追突警報時のドライバの特徴分析」，第 18 回日本機械学会交通・物流 部門大会講演論文集，Vol.18，pp.283-286 (2009)
- [3] 永井正夫，井上秀雄，鎌田実，大桑政幸：「高齢者の自立を支援し安全安心社会を実現する自律運転支援システム」，LIFE2013，特別オーガナイズドセッション「高齢社会を豊かにする科学・技術・システムの創成」講演資料，Vol.81，pp.26-29 (2013)
- [4] Braeuchle, C.: 「Driver influence on active pedestrian protection systems with combined braking and steering」，Proceedings of 2nd International Symposium on Future Active Safety Technology towards Zero-Traffic Accident(FAST-zero'13)TS1-1-6, No.JSAE20134608，pp.1-6 (2013)
- [5] 斉藤裕一：「人と協調する運転支援技術(交通システムの安全性・信頼性)」，REAJ 誌 Vol.37，No. 5，pp.242-249 (2015)
- [6] 池浦良淳，星野広行，横井大介，兼原洋治，星野光弘，水谷一樹，澤井秀樹：「腕のインピーダンスに基づく操舵感の評価方法について」，自動車技術会論文集 37(4)，pp.33-38 (2006)
- [7] 長秀樹，大塚雄太，立和名慎一，和田隆広：「ドライバ特性を考慮した操舵支援制御下における，操作性向上に関する研究」，日本機械学会 交通・物流部門大会講演論文集，pp.175-178 (2011)
- [8] 竹村和紘，山田直樹，新部忠幸，岸篤秀，西川一男，農沢隆秀，栗田雄一，

- 辻敏夫：「主観的力知覚空間におけるステアリングホイール操作特性の感性評価と設計への応用」，日本機械学会論文集，Vol.81，No.822，p.14-00463 (2015)
- [9] 西川一男，古川浩二，河手功，宮崎透，農沢隆秀，辻敏夫：「人間の上肢力学特性に基づく自動車ステアリングホイールの操作性解析」，日本機械学会論文集，Vol.81，No.831，p.15-00023 (2015)
- [10] 山本敬一，西村秀和：「操舵感と操縦性を考慮した電動パワーステアリングの制御」，第 53 回自動制御連合講演会，No.10-253，pp.854-859 (2010)
- [11] 中村弘毅，中野公彦，方芳，鄭仁成，大堀真敬，川原禎弘，高木隆史：「ドライビングシミュレータへの力覚支援操舵システムの導入」，日本機械学会第 20 回交通物流部門大会講演論文集，pp.269-272 (2011)
- [12] 名切末晴：「緊急時におけるドライバ運転挙動解析」，豊田中央研究所 R&D レビュー，Vol.30，No.3，pp.67-78 (1995)
- [13] 小野英一，村岸裕治，畔柳洋，山田大介，久代育生，佐藤伸介：「車両運動に関するドライバの期待と運動感受特性の研究」，日本機械学会第 16 回交通・物流部門大会講演論文集，pp.179-182 (2007)
- [14] 鈴木桂輔・若杉貴志・相場仁：「車線逸脱警報装置の設計における時間基準の警報発生タイミングの策定手法」，計測自動制御学論，Vol.38，No.6，pp. 567-573 (2002-6)
- [15] 大野宏司，山本有造，坂部匡彦，渡邊一矢：「ドライバの危険感に基づく危険度表示システムの開発」，日本機械学会論文集 (C 編)，Vol.67，No.663，pp.212-218 (2001)
- [16] 佐藤稔久，川嶋弘尚，大門樹，池田敦，木下昌裕：「狭路走行支援システム使用時における高齢ドライバ特性に関する研究」，人間工学，Vol.40，No.1，pp.1-11 (2004)
- [17] 伊藤太久磨，志野達弥，鎌田実：「予見的制動介入時の情報共有が高齢ドライバの受容性に与える効果の検証」，学術講演会前刷集，pp.1-4 (2014)
- [18] 志野達弥，伊藤太久磨，鎌田実：「予見的操舵介入時の動作状態と走行経路に関する

- る情報共有が受容性に与える効果の検証」, 学術講演会前刷集, pp.5-8 (2014)
- [19] 西羅光, 高木良貴, 出口欣高:「ドライバーとの協調制御のための回避経路算出手法の研究」, 第 10 回計測自動制御学会制御部門大会予稿集, 164-2-1 (2010)
- [20] 能登紀泰, 奥田裕之, 田崎勇一, 鈴木達也:「個人適合型ポテンシャル法に基づく障害物回避アシスト制御」, 自動車技術会秋季大会学術講演会前刷集, pp.11-14 (2011)
- [21] 菅野崇, 楠本信平, 高橋英輝, 中畑洋一郎, 山本康典, 谷田晴紀:「筋骨格系の特性を考慮した運転支援技術の開発」, マツダ技報, No.32, pp.240-245 (2015)
- [22] 高橋英輝, 菅野崇, 岡崎俊実:「ドライバの筋活動に基づく車線維持操舵支援制御の研究」, マツダ技報, No.31, pp.131-136 (2013)
- [23] 井上慎太郎, 相川弘幸, 井上秀雄, Pongsathorn Raksincharoensak:「DYC と操舵支援による人間機械協調型運転支援システムに関する研究 (第 2 報)」, 自動車技術会 2016 年春季大会学術講演会講演予稿集, pp.1621-1626 (2016)
- [24] 志野達弥, 伊藤太久磨, 鎌田実:「予見的制御介入に関する高齢ドライバの受容性の検討」, 学術講演会前刷集, pp.17-20 (2014)
- [25] 山口拓真, 奥田裕之, 鈴木達也, 早川聡一郎, 池浦良淳, 武藤健二, 伊藤隆文:「スーパーバイザ型協調制御の提案とその評価」, 自動車技術会 2016 年春季大会学術講演会講演予稿集, pp.1593-1598 (2016)
- [26] 神谷貴文, 山口拓真;奥田裕之, 鈴木達也;松林翔太, 三輪和久, 武藤健二, 伊藤隆文:「スーパーバイザ型協調制御の実験的検証」, 自動車技術会 2016 年春季大会学術講演会講演予稿集, pp.1599-1604 (2016)
- [27] 有住卓郎, 早川聡一郎, 山口拓真, 池浦良淳, 鈴木 達也:「インピーダンス制御を用いたステアリング介入 支援におけるドライバ受容性評価」, 自動車技術会 2016 年秋季大会学術講演会講演予稿集, pp.86-90 (2016)
- [28] 池浦良淳:「人間とロボットによる協調作業」, 人間中心型ロボティクス総合特集号, Vol.44, No.12, pp. 682-687 (2000)

- [29] R. Ikeura and H. Inooka, "Variable Impedance Control of a Robot for Cooperation with a Human", IEEE international Conference on Robotics and Automation, 3097-3102 (1995)
- [30] 辻敏夫, 島崎知之, 金子真 : 「ロボットインピーダンスに対する人間の知覚能力の解析」, 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 2, pp. 180-186 (2002)
- [31] N.Hogan : 「Impedance Control: An Approach to Manipulation:Part1-Part3」, Trans.ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.107, pp.1-24 (1985)

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ご助言を頂き，深く感謝致します．厚く御礼申し上げます．

また，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 矢野賢一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 2 年間研究の方針など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，三重大学工学研究科機械工学専攻 堤成可助教には研究に関する有益な御助言を頂き，ご指導を親身になって行って頂き，深く感謝致し，厚く御礼申しあげます．

また，澤井秀樹研究員には実験装置の製作や改良にあたり，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．

また，藤原明子秘書には事務手続きを始め，研究しやすい環境をおつくり頂き，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．

本研究にあたり，ともに実験を行った，土居雅歩氏に深く感謝しております．厚く御礼申し上げます．

また，同期の浅野克啓氏，芹川聡氏，中西圭汰氏，西川貴大氏，長谷部洋太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めない援助を送ってくださった家族のおかげ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。

