

博士学位論文

車両のアクティブ制御技術を用いた
シェアード・コントロール型運転支援システム
に関する研究

Shared Control Based Driver Assistance Systems
Using Active Chassis Control Systems

国立大学法人 東京農工大学大学院

工学府 機械システム工学専攻

井上 慎太郎

Shintaro Inoue

2017年3月

論文要旨

本論文では、予防安全技術のさらなる進化を目指し、車両のアクティブ制御技術を用いたドライバと制御システムのシェアード・コントロール(以下、Shared control とする)型の運転支援システムを提案することを目的とする。本研究における Shared control の設計概念は、ドライバが主体的に運転をおこなっている状態を前提とする。制御システムは外界環境認識に基づきそのシーンにおける潜在リスクに応じた規範運転を演算し、その規範運転をステアリングの能動的な反力トルクとしてドライバに教示する。ドライバはこの能動的な反力トルクを使って運転操作を変容させる。この変容の仕組みによって、ドライバの運転操作がより安全で滑らかなものに導かれることが本システムの狙いである。

規範教示のための操舵トルク支援制御の課題の一つは、ドライバと制御システムのステアリングまわりの強いトルク干渉である。軌跡追従性能を上げるためにトルク支援の制御ゲインを大きく設定すると、トルク干渉が増大してしまう課題がある。そこで本論文では、軌跡追従性能とトルク干渉のトレードオフの関係を打開し、より高い協調特性を得るために、操舵トルク支援制御に直接ヨーモーメント制御(以下、DYC とする)を組み合わせ、新しい制御系を設計提案する。

提案する Shared control システムの有効性を検証するために、13名の高齢ドライバによる駐車車両回避のドライビングシミュレータ実験をおこなった。また、システムの真の有効性を示すために、市販車改造実験車を構築し、被験者 10 名による実環境での検討をおこなった。実験結果からは、操舵トルク支援制御によって、ドライバの運転行動が規範運転に近づくことが確認された。また DYC を組み合わせることで、規範運転への軌跡追従性能は維持されながら、同時にステアリングのトルク干渉が低減されることが確認された。これらは、制御設計の狙いに基づいた結果であることから、提案する Shared control システムの有効性が実車環境でも示された。

Abstract

This Paper proposes and investigates a new shared control system which combines a new concept of haptic steering control together with Direct Yaw-Moment Control (DYC) in order to enhance path tracking performance and achieve good human-machine cooperative characteristics. The aim of the haptic steering control is to indicate the maneuver of the reference driver. When a driver can understand the maneuver of the reference driver, and modify the one's behavior, the accident risk can be potentially reduced as the human-machine cooperative system. One of the significant issues is a drawback in causing interference between the steering torque from a driver and the steering assistance systems when a large steering assistance level is set. From this issue, DYC control is combined with the haptic steering control. The proposed system can potentially solve the interference problem, as DYC is used as an independent control input.

The experiment is conducted by using the driving simulator to verify the effectiveness of DYC on path tracking performance as well as the cooperative steering characteristics between a human driver and the steering assistance system. From the experimental results, it is confirmed that the driver torque is obviously improved to be smoother, and the trajectory is came close to the reference trajectory of expert driver model in the condition of haptic steering control. It is also confirmed that this tendency is enhanced when DYC is combined.

The experiment using the test vehicle based on the commercial vehicle is conducted to demonstrate the effectiveness of the proposed system. To evaluate the shared control characteristics in a quantitative way, the relationship between path tracking performance and torque interference is investigated by using the time integral values of torque and trajectory. From these results, it is confirmed that the proposed shared control system which is steering shared control combined with DYC performs better path tracking performance with lower degree torque interference. Since this performance is confirmed in real environment, it is verified that the proposed system will result in better shared control characteristics.

目次

第1章 序論	1-28
1.1 予防安全技術の歴史.....	1
1.2 自動運転.....	5
1.3 ドライバ人口の構造変化と交通事故問題.....	9
1.4 ステアリング制御に関する従来の研究.....	16
1.5 直接ヨーモーメント制御に関する従来の研究.....	20
1.6 問題提起.....	21
1.7 本論文の構成.....	25
第2章 経路追従時のシェアード・コントロールの設計と理論解析	29-50
2.1 はじめに.....	29
2.2 Shared Control システムの理論設計.....	32
2.2.1 制御システムの全体構成.....	32
2.2.2 操舵反力制御の設計.....	33
2.2.3 DYC 設計.....	34
2.3 人間機械系の開ループ解析.....	35
2.4 人間機械系の閉ループ解析.....	40
2.5 人間機械系のシングルレーンチェンジシミュレーション.....	45
2.6 まとめ.....	49
第3章 経路追従時のシェアード・コントロールの実験的検討	51-98
3.1 はじめに.....	51
3.2 農工大ドライビングシミュレータ.....	52
3.2.1 全体構成・主計算機.....	52
3.2.2 動揺装置.....	53
3.2.3 ステアリングシステム.....	54

3.2.4	その他の構成要素	55
3.3	実験概要	58
3.3.1	実験場面	58
3.3.2	実験条件・手順	59
3.3.3	ドライバの操舵トルクの推定方法	61
3.4	実験結果	63
3.4.1	若年ドライバの実験結果	63
3.4.2	高齢ドライバの実験結果	74
3.4.3	実験結果の解析	84
3.5	まとめ	96
第4章	潜在リスク予測型シェアード・コントロールの設計と理論解析	99-116
4.1	はじめに	99
4.2	ポテンシャルに基づく横運動計画	100
4.3	操舵反力設計部の設計	107
4.4	DYC 制御部の設計	107
4.5	シミュレーションによる制御設計の有効性評価	109
4.5.1	シミュレーション条件	109
4.5.2	シミュレーション結果	112
4.6	まとめ	114
第5章	潜在リスク予測型シェアード・コントロールの実験的検討	117-154
5.1	はじめに	117
5.2	実験概要	119
5.2.1	実験場面	119
5.2.2	実験条件・手順	120
5.3	実験結果	122

5.3.1	時刻歴応答	122
5.3.2	実験結果の解析.....	136
5.4	反力制御トルクゲインまたはDYCゲインの物理的解釈	138
5.5	制御システムの軌跡追従性能に対してDYCが及ぼす影響解析.....	142
5.6	ドライバモデルのパラメータ同定による操舵特性変化の考察	149
5.7	まとめ.....	153
第6章 実験車両を用いた有効性検証.....		155-190
6.1	はじめに.....	155
6.2	超小型電気実験車を用いたレーンチェンジ実験	156
6.2.1	超小型電気実験車.....	156
6.2.2	規範ドライバモデルの実装法の一考案	158
6.2.3	ドライバの操舵トルクの推定方法.....	161
6.2.4	実験条件	163
6.2.5	実験結果	164
6.3	市販車改造実験車を用いたレーンチェンジ実験.....	168
6.3.1	市販車改造実験車.....	168
6.3.2	実験条件	173
6.3.3	実験結果	175
6.4	まとめ.....	188
第7章 結 論.....		191-194
参考文献.....		195-204
研究業績.....		205-206
謝辞.....		207-208

第 1 章

序 論

1.1 予防安全技術の歴史

1769 年，フランスで自動車は誕生した．ニコラ・ジョセフ・キュニョーによる蒸気で走る自動車がその始まりである[1]．この車は同時に世界初の交通事故を起こした自動車という記録も残している．走行実験中にハンドルを切り損ねて壁に激突してしまったのである．これ以降，自動車には動力

性能や乗り心地といった走りの質の向上と同時に，安全・安心という究極の課題が課せられることになった．

安全・安心の追求は，自動車構造を大きく進化させる原動力となってきた．1972 年には，メルセデス・ベンツ S クラスより，現在はほとんどの車に装備されているアンチロック・ブレーキ・システム(ABS)が実用的なシステムとして市販された(図 1.2)[2]．また 1986 年には，ABS で培った技術を生かし，トラクション・コントロール・システム(TCS)が生まれた．さらに 1995 年には横滑りを防止する技術であるエレクトロニック・スタビリティ・コントロール(ESC)が市場に送り出されている．



図 1.1 ニコラ・ジョセフ・キュニョーの蒸気自動車



図 1.2 ABS の効果実験

2000年代には、ミリ波レーダ、ステレオカメラ、レーザーレーダなどの外界環境を認識する技術が大きく進化し、これらのセンシング技術を応用した安全技術が数多く開発された。例えば、レーダークルーズコントロールは、外界環境認識センサとしてミリ波レーダを用いて、設定した速度内で適切な車間距離を保ちながら追従走行するシステムである(図 1.3)[3] [4]。また同年、プリクラッシュセーフティシステムと呼ばれる追突軽減ブレーキが発表される[5]。これは、ミリ波レーダで前方の障害物との衝突の危険を感知すると、ブレーキの油圧を立ち上げておき、ドライバのブレーキ操作きっかけにフルブレーキ状態になる仕組みである。その発展形式が自動緊急ブレーキ(AEB)である。これは、他の車や歩行者に衝突する危険性を検知すると、システム側が自動的にブレーキをかけるシステムである。2008年にはボルボがこのシステムを市販車に搭載し[6]、また2009年にはスバルがアイサイト(ver.2)という商品名で、このシステムを搭載した車両を上市している(図 1.4)。本システムの予防安全性能は非常に高く、アイサイト(ver.2)を搭載した車両は、非搭載車両に比べ約6割の交通事故を減らす効果があることが報告されている(図 1.5) [7]。車線維持をアシストするレーンキープアシスト(LKA)も特筆すべき機能の一つである[8]。これは直線または曲線などの道路形状をカメラが認識し、車の走行状態に応じて電動パワーステアリング(EPS)を

制御するシステムである。車線維持支援機能に加えて、警報音やステアリングを振動させるなどして、ドライバに車線逸脱を警報させる機能も兼ね備える。



図 1.3 レーダークルーズコントロール



図 1.4 自動緊急ブレーキ

単位:台

	2010~2014年度 販売台数	事故総件数	対歩行者		対車両、その他	
			対歩行者	対車両、その他	追突(内数)	
アイサイト(ver2)搭載車	246,139	1,493	176	1,317	223	
A:1万台当たり発生件数		61	7	54	9	
アイサイト(ver2)非搭載車	48,085	741	67	674	269	
B:1万台当たり発生件数		154	14	140	56	
搭載車-非搭載車=(A-B)/B		-61%	-49%	-62%	-84%	

図 1.5 自動緊急ブレーキの効果

車と交通インフラが情報を相互に通信することで、安全で安心な交通システムを実現する取り組みも積極的に進められてきた[9] [10]。いわゆる高度道路交通システム(Intelligent Transport Systems, ITS)は、1970年代前半から研究開発が始まっている。1994年にはパリで第1回ITS世界会議が開催され、それ以降、産学官が協業領域を設けながら技術革新が続けられてきた。高速道路でのETC利用は、ITSの最たる革新技術の一つである。2001年に一般利用が始まり、2015年にはその利用率は全国で90%を超えている[11]。また2002年には、道路交通情報通信システム(VICS)が全国の高速道路および一般道路でのサービスを開始された。これにより、利用者はカーナビ等から、渋滞情報や事故情報を容易に取得できるようになった。2009年からはITSスポットサービスが運用開始され、VICS、カーナビ、ETCのサービスだけではなく、広域な道路交通情報や地域観光情報が同時に取得できる仕組みが普及し始めている。さらに、道路と車、または車と車がリアルタイムに双方向通信することで、車に搭載されたセンサーでは捉えることが出来ない道路状況を検知する仕組みも開発が進められている。例えば右折時衝突防止支援システムなどがこれにあたる(図1.6)[12]。これは、対向車や歩行者など右折時に見落とし易い対象物を、道路インフラがリアルタイムに検知し、ITS専用通信周波数帯を用いてその情報をドライバーに伝える仕組みであり、これまで以上に大きな事故低減効果が期待される。

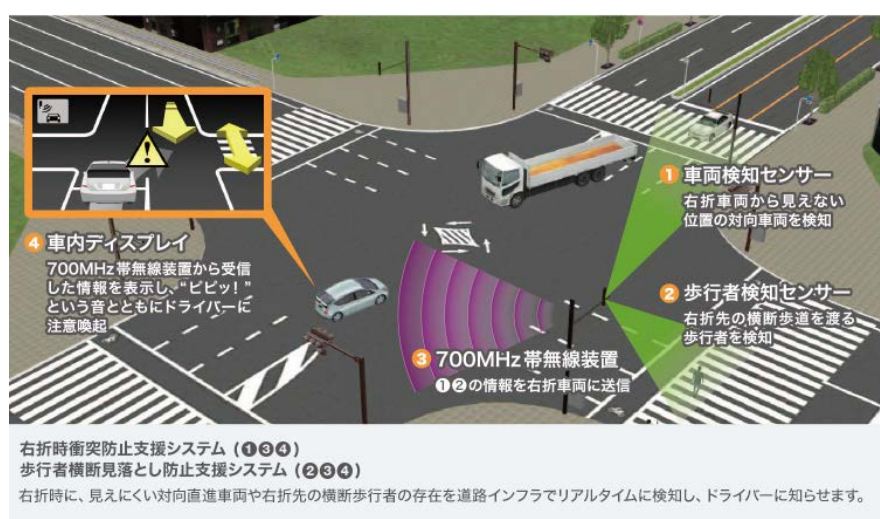


図 1.6 右折時衝突防止支援システム

ドライバや歩行者などに対する交通安全啓蒙活動も積極的に行われてきた。具体的には、講習会や体験型の交通安全イベントなど、安全への意識を高める取り組みが進められている。また毎年、春と秋には、全国交通安全運動が内閣府主導で行われ、交通ルールの遵守と、正しい交通マナーの実践を習慣付ける運動が展開されている。さらには、幼児向けに交通安全教材が作成されるなど、幅広い年齢層を対象とした啓蒙活動も継続されている。以上のように、安全・安心に対する取り組みは、自動車構造の進化に留まらず、人、車、交通環境の三位一体で続けられている。

1.2 自動運転

安全・安心に関わる自動車の予防安全技術は、2030年に向かって次の転換期を迎えようとしている。それは「自動運転」である。自動運転に対する研究開発は、実は歴史が長い。黎明期には1950年代後半にかけて、アメリカやイギリスなどでおこなわれた誘導ケーブルを用いた操舵制御がある[13]。1970年には、機械技術研究所(現在の産業技術総合研究所)が、車両前方の情報をコンピュータビジョンによって認識・処理して走る自動運転システムを実走行させている(図1.7)[14]。



図 1.7 知能自動車

その後、様々な技術開発が行われてきたが、現在の激しい自動運転の開発競争の引き金となったのは、アメリカの国防高度研究計画局(DARPA)が 2007 年に行った DARPA アーバンチャレンジである (図 1.8) [15]. このチャレンジは、閉鎖された空軍基地に市街地を想定した総延長約 96km のコースを 6 時間以内に完走するという、無人ロボットカーのレースであった。完走したのは 11 台中わずか 6 台であり、非常に厳しいレースであった。このレースを発端として、自動車メーカーのみならず、他業種メーカーまでもが参入する形で、自動運転の技術開発が加速されていった。例えばベントンは、自動運転の実験車を用いて約 100km のルートを走破している[16]。2016 年には製品化技術の一つとして、アウトバーン・パイロットと呼ぶ自動運転システムを上市している。これはドライバのウインカー操作に応じて、システムが自動で車線変更する機能である。類似のシステムは、アメリカのテスラなどからも発表されている。トヨタ自動車は、2015 年に首都高速道路での合流、車線維持、レーンチェンジ、分流を自動運転で行うデモンストレーションを実施している(図 1.9) [17]。Google は、Self-Driving Car の実験車を内製で仕立て、市街地を含む公道コースでのテスト走行を重ねている。その総走行距離は、2016 年の 3 月に 240 万キロを超えたことが発表されている(図 1.10) [18].



図 1.8 DARPA アーバンチャレンジ



図 1.9 首都高速道路での自動運転デモンストレーション



図 1.10 Google Self-Driving Car

このような技術開発の加速の流れを受け、自動運転のレベルを制御システムの介入量で整理しようとする取り組みが各国の国際機関で行われている。例えば、米国運輸省道路交通安全局(NHTSA)は、2013年5月に自動運転に関する方針を発表した[19]。図 1.11 はそれを整理した表である[20]。この自動運転レベルの定義によれば、自動運転はレベル 0 からレベル 4 までの 5 つに分けられる。レベル 0 はいわゆるマニュアル運転である。レベル 1 以降は、制御システムの介入量がレベルに応じて増えていく。レベル 2 では複数の操作を制御システムがおこない、レベル 3 ではドライバは 2 次タスク(例えば本を読む等)が許容される。レベル 4 では加速、操舵、制動をすべて制御システムがおこなうため、ドライバはタクシーの乗客のような感覚で移動を行うことができる。

一方で、人と機械の協調形態を用いて自動化レベルを定義したものもある。この定義は 1992 年に Sheridan によって初めて定義され[21]，1998 年には稲垣らによって、自動化レベル 6.5 が追加され 11 段階に再定義されている(図 1.12)[22]。この定義は、操作の実行を人間とコンピュータのどちらが最終的な主権を有するかという観点で纏められており、自動化レベル 6.5 以上は、人間の主権は補償されていない。

	操縦	具体例	交通監視	安全運転責任
レベル0	加速, 操舵, 減速を常にドライバーが行う。	警報のみのシステム	ドライバー (常時)	ドライバー
レベル1	加速, 操舵, 制動のいずれかの操作を自動車が 行う。 (ドライバーが運転から解放されることはない。)	ACC, LKSなどの 機能が単独で 作動	ドライバー (常時)	ドライバー
レベル2	特定の条件下で加速, 操舵, 減速のうち複数 の操作を自動車が 行う。 [自動運転モードで, ドライバーは運転から物理的に解放される (ハンドルから手を, ペダルから足を同時に離すことができる。)] ※緊急時対応はドライバー	ACCとLKSの 組み合わせなど	ドライバー (常時)	ドライバー
レベル3	特定の条件下で加速, 操舵, 減速のすべてを 自動車が 行う。 ※緊急時対応はドライバー	高速道・自動車 専用道の限定区 間での自動運転	システム (特定の条件下)	システム (システムが自動運転を維持 できないと判断した場合は, 適切な余裕を持ってドライバー に運転を戻す。)
レベル4	加速, 操舵, 制動をすべて自動車が 行う。		システム	システム

注：略語説明 ACC(Adaptive Cruise Control), LKS(Lane Keeping System)

図 1.11 自動運転のレベル(NHTSA)

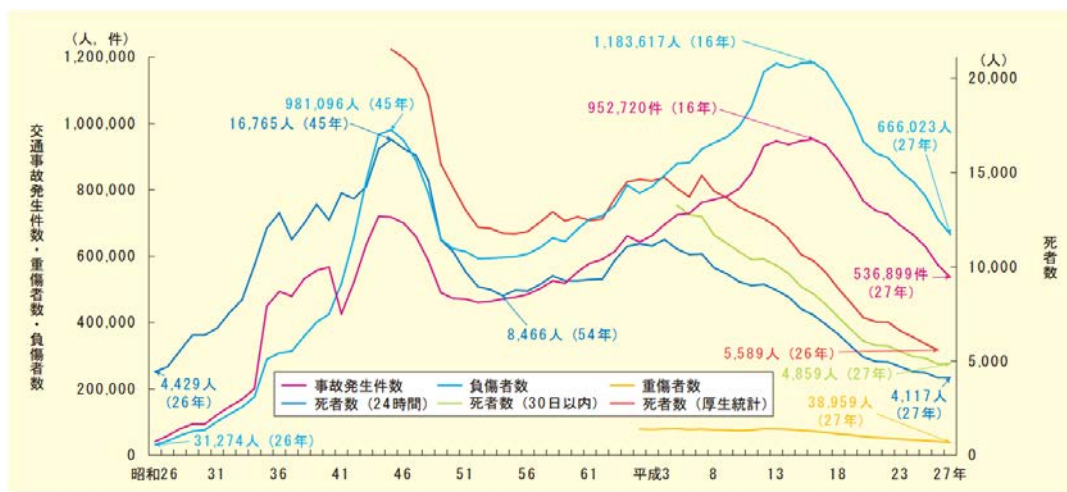
レベル	定義
1	システムの支援なしに、すべてを人が決定・実行。
2	システムはすべての選択肢を提示し、人はそのうちのひとつを選択して実行。
3	システムは可能な選択肢をすべて人に提示するとともに、ひとつを選んで提案。それを実行するか否かは、人が決定。
4	システムは可能な選択肢の中からひとつを選び、それを人に提案。それを実行するか否かは、人が決定。
5	システムはひとつの案を人に提示。人が了承すれば、システムが実行。
6	システムはひとつの案を人に提示。人が一定時間内に実行中止を指令しない限り、システムはその案を実行。
6.5	システムはひとつの案を人に提示すると同時に、その案を実行。
7	システムがすべてを行い、何を実行したか人に報告。
8	システムがすべてを決定・実行。人に問われれば、何を 実行したかを報告。
9	システムがすべてを決定・実行。何を 実行したかを人に報告するのは、報告の必要性をシステムが認めたときのみ。
10	システムがすべてを決定し、実行。

図 1.12 自動化のレベル(Sheridan, Inagaki ら)

1.3 ドライバ人口の構造変化と交通事故問題

現代社会において、自動車の存在はなくてはならないものになったが、自動車の存在はその弊害として交通事故をもたらしている。日本の交通事故の発生件数の推移を図 1.13 に示す[23]。交通事故における死傷者数は近年減少傾向にあるが、依然として年間 4000 人以上が交通事故の犠牲となっている。交通事故の要因を人的要因，車両的要因，環境的要因の 3 つに大別すると，人的要因による交通事故は全体の 85% 以上に占めるとされる。人的要因，すなわち認知・判断・操作に関わるヒューマンエラーの低減は，自動車の予防安全技術の大きな使命と言える。

わが国は高齢化社会を迎えており，自動車を運転する「ドライバ」の高齢化については特筆が必要である。図 1.14 に，高齢者人口の割合の推移を示す[24]。65 歳以上の高齢者の人口割合は，2013 年(平成 25 年)に 25% を超えており，2030 年(平成 42 年)には，その割合は 30% を超えると推計されている。すなわち日本人の 3 人に 1 人は高齢者という時代が想定されている。このような高齢化社会への人口構造の変化は，日本に限らない。例えば，ヨーロッパにおいても 2060 年頃には 65 歳以上の高齢者割合が 30% に達することが予想されている[25]。



- 注 1 警察庁資料による。
 2 昭和41年以降の件数には，物損事故を含まない。また，昭和46年までは，沖縄県を含まない。
 3 「死者数(24時間)」とは，交通事故によって，発生から24時間以内に死亡したものをいう。
 4 「死者数(30日以内)」とは，交通事故によって，発生から30日以内(交通事故発生日を初日とする。)に死亡したものをいう。
 5 「死者数(厚生統計)」は，警察庁が厚生労働省統計資料「人口動態統計」に基づき作成したものであり，当該年に死亡した者のうち原因が交通事故によるもの(事故発生後1年を超えて死亡した者及び後遺症により死亡した者を除く。)をいう。なお，平成6年までは，自動車事故とされた者を，平成7年以降は，陸上の交通事故とされた者から道路上の交通事故ではないと判断される者を除いた数を計上している。

図 1.13 日本の交通事故の発生件数

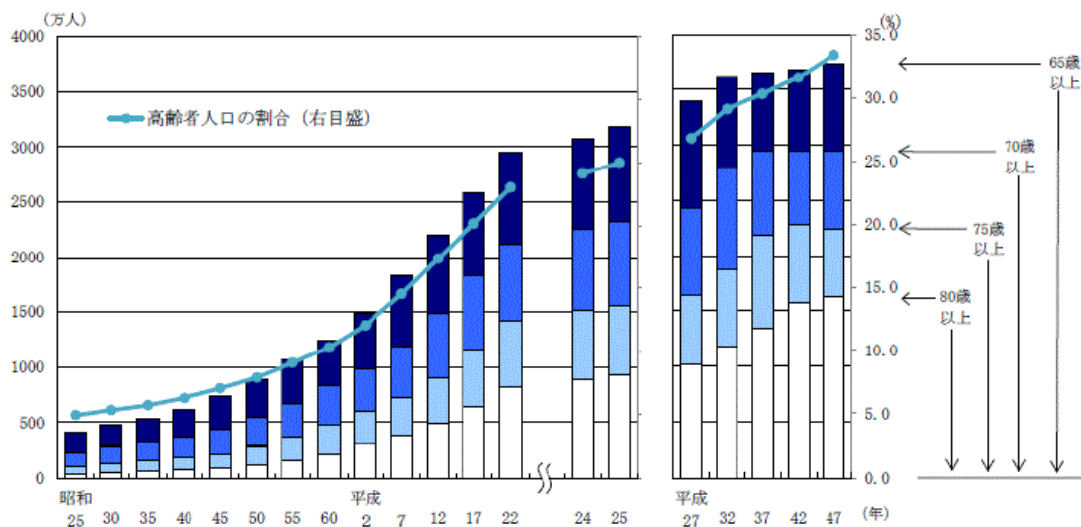


図 1.14 高齢者人口の割合の推移

日本の免許保有者における 65 歳以上の高齢者の総数とその割合を図 1.15 に示す [26]. 図 1.15 からは, 高齢ドライバーの人口は増加傾向にあり, 免許保有者数における割合は近年特に増加していることがわかる.

次に高齢ドライバーに関わる交通事故問題を述べる. 図 1.16 は, 原付以上運転者(第 1 当事者)の交通事故件数に対し, 65 歳以上の高齢ドライバーが起こした事故件数の割合である. 本図からは, 交通事故件数は年々減少傾向にあるのに対し, 高齢ドライバーが原因となる交通事故の割合は増加傾向にあることが確認できる. 図 1.17 は交通事故のうち, 操作不適事故の割合を年齢層別に比較したものである [27]. 操作不適事故全体を見ると, 若年ドライバーまたは高齢ドライバーが, 他の年齢層よりも操作不適事故を起こしやすいことがわかる. また操作不適の形態別に見ると, ハンドル操作不適事故は若年ドライバーまたは高齢ドライバーの場合に増加していることがわかる. 図 1.18 は, 操作不適事故に占める死亡事故の割合を操作不適の形態別をみたものである. 図 1.18 からは, ハンドル操作不適事故の死亡事故割合は 4.3%と, 他の形態と比べて死亡事故に至る可能性が非常に高く, ハンドル操作不適は重大な事故につながりやすいことが確認できる.

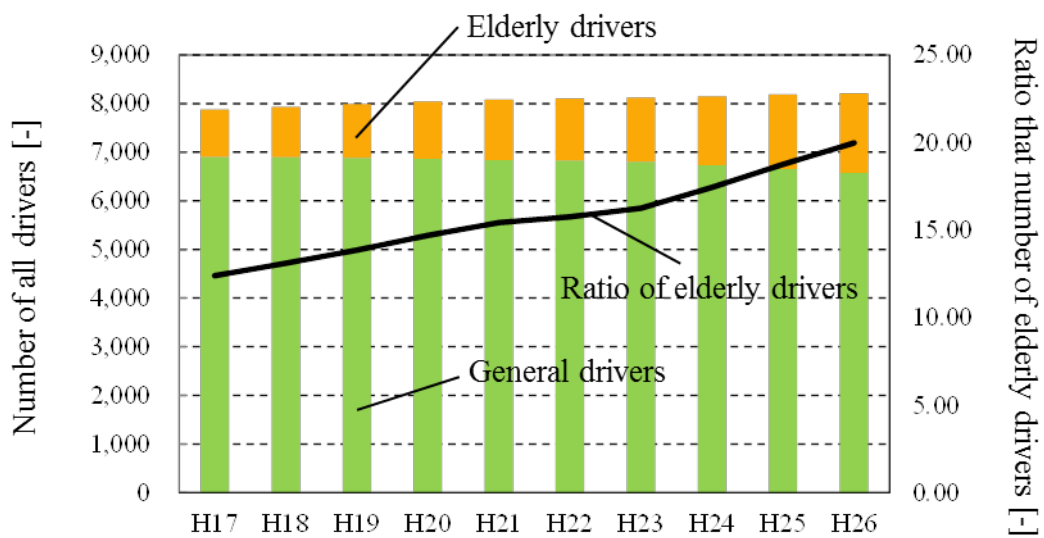


図 1.15 免許保有者における 65 歳以上の高齢者の総数とその割合

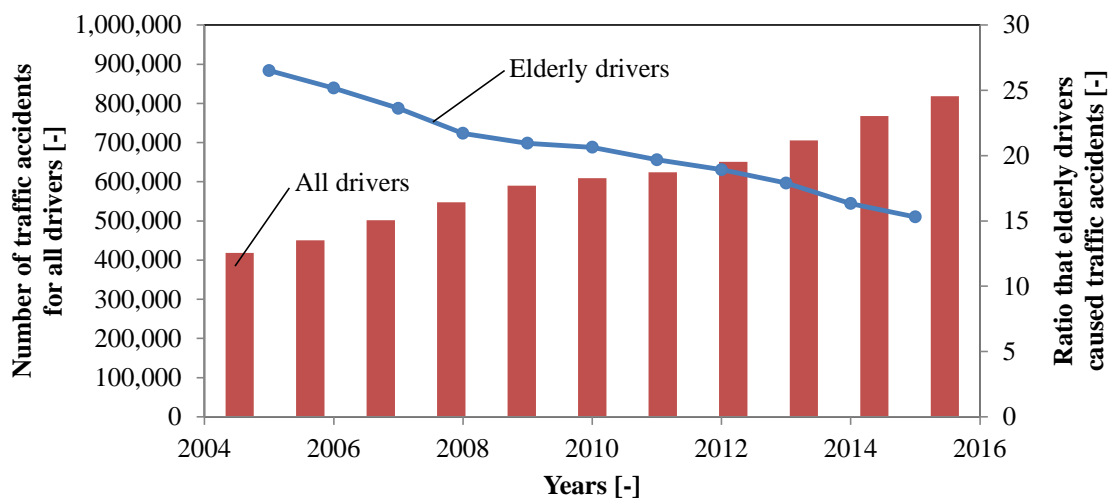


図 1.16 事故発生件数の総数と高齢者が引き起こした割合

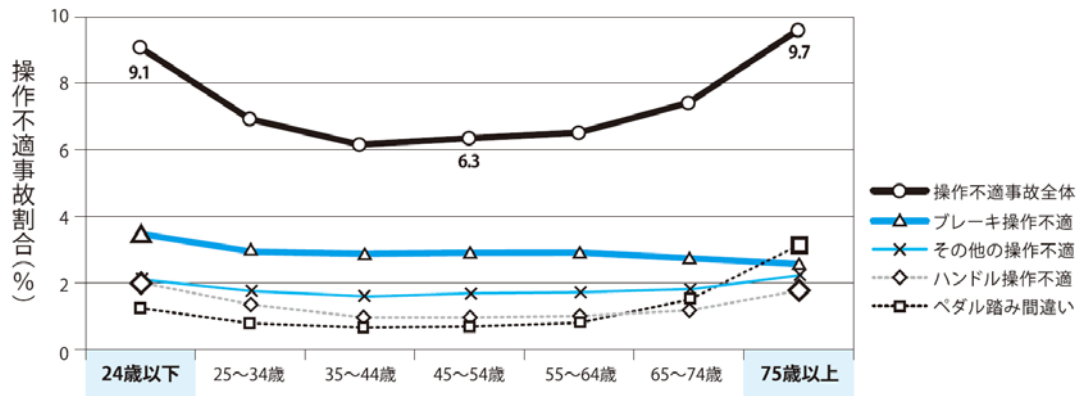


図 1.17 操作不適事故に対する年齢層別の比較

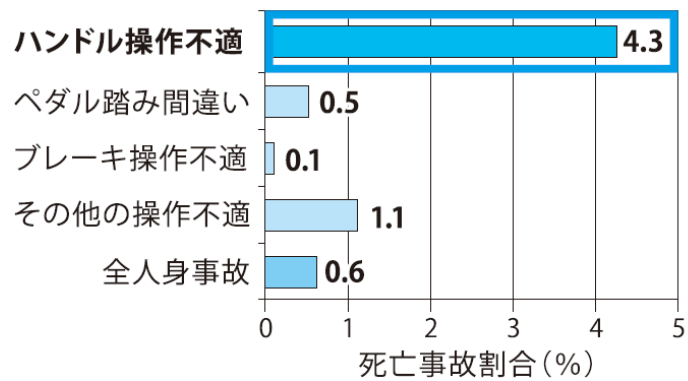


図 1.18 操作不適事故に対する形態別の比較

このように、高齢ドライバーの人口が増加し、またそれに纏わる交通事故問題が顕在化している。一方で、高齢ドライバーは、運転したいというモチベーションを非常に高く有しているが明らかになっている。2009年に知事連合がおこなった高齢ドライバー1万人を対象としたアンケート調査によれば、多くの高齢ドライバーは、運転したいモチベーションを持っており、車を使った移動を高く希望していることが明らかになっている(図 1.19) [28]。また、U'eyes Design 社が国内 720 名の運転免許所有者を対象にしたアンケート調査によれば、高齢者は自分に代わって運転してくれる自動運転車よりも、自分の運転に欠けている点を部分的に支援してくれる機能に利用の意欲が高い結果が得られたことが報告されている(図 1.20。図中のパーセントは、各種の運転支援機能について、それぞれがどんな支援をしてくれるのかを説明した上で、「ぜひ、利用したい/既に利用している」と答えた回答者の割合。自動運転車よりもその他の運転支援システムへの利用期待が高いことが確認できる)[29]。

一方で上記のアンケートでは、高齢ドライバーは身体能力の衰えにより運転に不安を感じていることも明らかにされている。一般的に、加齢とともに認知のための視野角は狭くなり、また判断、操作のための反応時間は長くなるといわれている。身体能力の衰えと運転能力の関係については、多くの研究論文が報告されており[30] [31]、例えば図 1.21 は年齢と視力・視野の関係を実験的に行った結果の一例である[32]。個人差はあるとは考えられるが、本図からは、加齢とともに動体視力および周辺視機能が低下する傾向があることが確認できる。

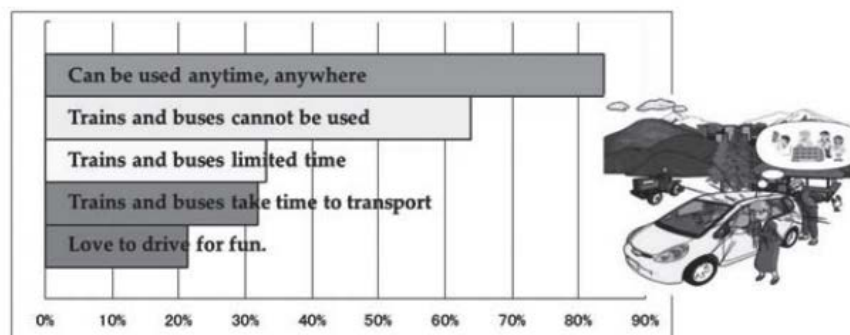


図 1.19 知事連合の調査による高齢者 1 万人アンケート結果(一部)

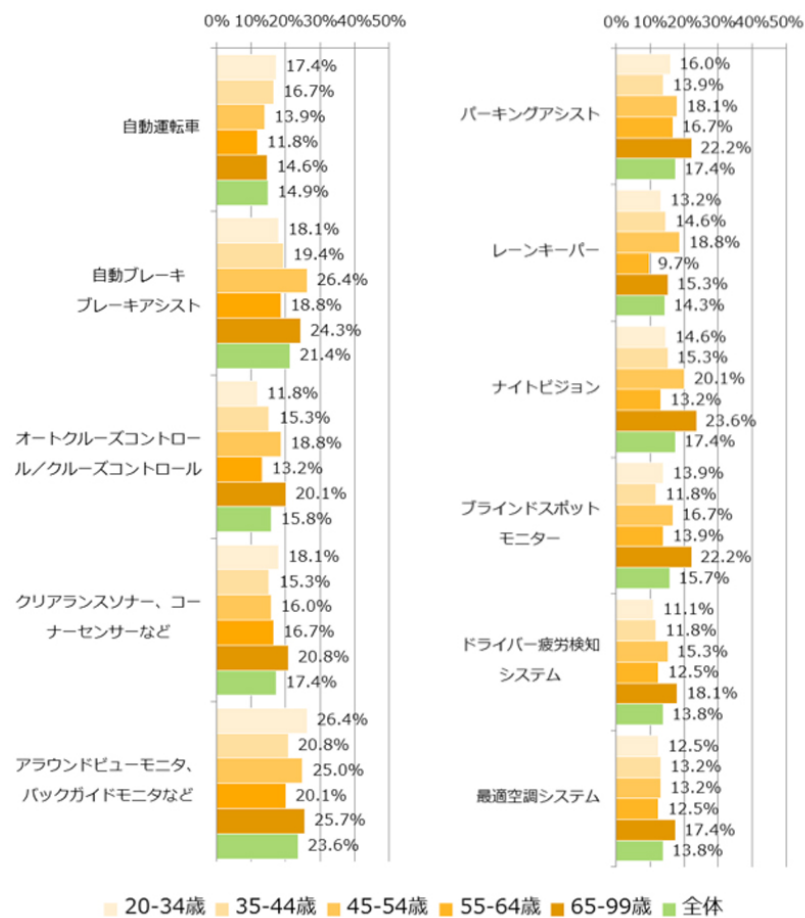


図 1.20 各種運転支援機能に対する利用の意欲

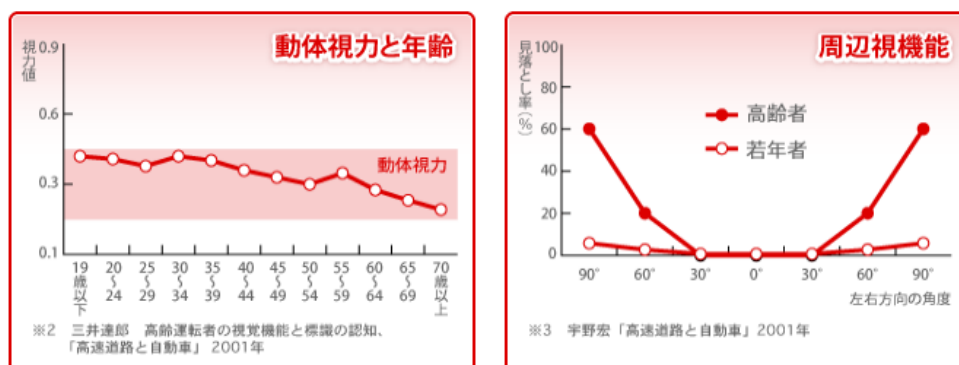


図 1.21 年齢と視力・視野の関係例

以上より，認知遅れや操作遅れを補償するような，高齢ドライバーのための運転支援システムを構築することは，安全で安心な交通社会をより高いレベルで実現することに大きく貢献するすると考えられる．またその支援形態は，第 1.2 節で示した自動化レベルのレベル 3 やレベル 4 のような完全自動運転ではなく，高齢ドライバー自身が自動車を運転しながら運転支援によって安全で安心な運転操作が実現される，いわゆるドライバーと機械の協調型の形態が強く望まれていると考えられる．

1.4 ステアリング制御に関する従来の研究

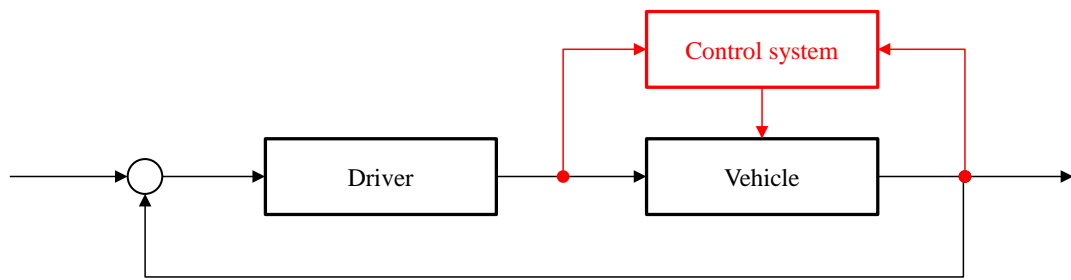
第 1.2 節または第 1.3 節で述べた安全で安心な車両システムを実現するために、自動車の運転・運動性能を向上させるためのシャシー技術の研究開発は古くからおこなわれてきた。本節では、本論文に大きく関わるステアリングの制御に注目し、この分野の従来研究を概説する。

1988 年に軽自動車に初めて電動パワーステアリング(EPS)が採用されて以来、従来の油圧パワーステアリングに比べて燃費改善が図れることや、電流指令でモータを直接制御できる等の利点から、電動パワーステアリングの搭載が急速に拡大していった。2014 年における電動パワーステアリングの装着率は、グローバル車両総数に対して 60%を超えている[33]。この電動パワーステアリングの搭載拡大によって、ステアリングの制御は大きく進化していった。

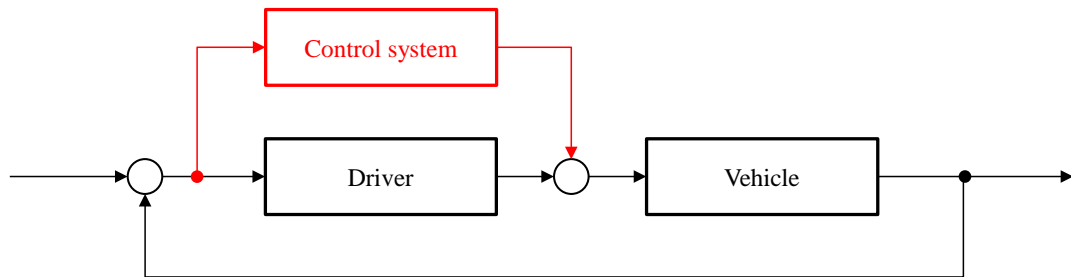
ドライバの操舵入力に対する車両応答の研究はいわゆる操舵特性、操舵感と呼ばれ、多くの研究者がその解析を行っている。例えば岡田らは、操縦性・安定性に関する基礎的な理論解析をおこなっている[34]。また Kojo らは、ステアリング操作の微分動作に着目した研究をおこない、この微分操作が車両の安定性に大きな影響を及ぼすことを明らかにしている[35]。上記は、舵角入力またはトルク入力という 2 種類あるステアリング操舵入力法のうち、主に舵角入力に注目した研究であるが、トルク入力に注目した研究も多くおこなわれている。例えば中村らは、トルク入力に対するその基本特性を考察している[36]。酒井らはトルク入力法におけるスタビリティファクタを理論的に定式化している[37]。また、電動パワーステアリングの制御方法に関する研究も多い。例えば久生らは、車両運動が操舵トルクに及ぼす影響を補償するようなパワーステアリングの制御則を考案している[38]。車両特性の影響を EPS で補償しようとする同様のアプローチは、他にも遠藤らの研究等がある[39]。ステアリングを操作するドライバ側に注目した研究も数多く発表されている。例えば堀口ら、山田らは、ステアリング特性を変えた複数の車両をドライビングシミュレータ上に準備し、その特性違いがドライバの運転行動に与える影響度合いを評価している[40] [41]。また、青木ら、安部は、ドライバモデルを具体的に定義し、得られた実験結果からその内部パ

ラメータを同定している[42] [43]. これらの研究では, これまで官能評価に頼っていた運転のし易さという性能を, 内部パラメータの変化量から定量化しようとする試みである. その他, 操舵時の筋肉活動に注目した渡邊らの研究や[44], 運転姿勢やシート形状に注目した山口らの研究など, ドライバに関わる応用研究も数多く報告されている[45]. その他, 車両側についても, 後輪操舵を兼備した四輪操舵(4WS)に関する研究や[46] [47], 可変ギヤ比機構を有するステアリング制御に関する研究など[48], 制御自由度を上げた場合の操舵制御に対する研究も多く成されている.

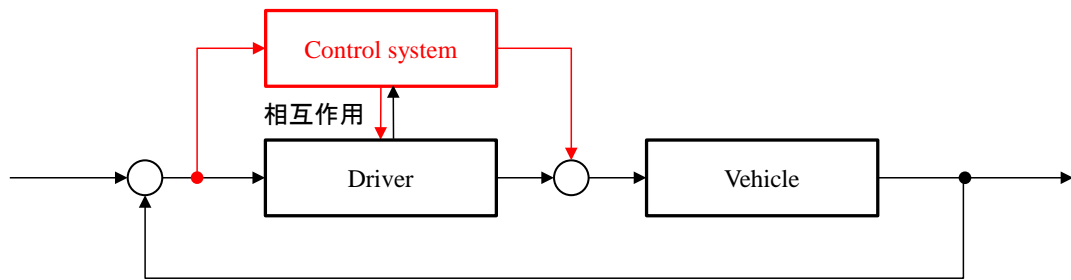
ここで, ドライバと制御システムの関係を図 1.22 に模式的にあらわす. ここまでに述べた従来研究は, ドライバの操舵入力に対する車両応答の評価であることから, これらの研究は(a)の形式として整理することができる. この形式の研究の視点は, ドライバの操舵入力に対して忠実にかつ安定的な車両が得られるための制御システムの構築方法といえる. 第 1.1 節で述べたように, 外界環境認識技術が発達してくると, (b)の形式に関する研究が注目されてきた. すなわち, 制御システムが直接道路状況を認知・判断し, ドライバの操舵入力に対して制御介入をおこなうという形式である. たとえば Shimakage らは, トルク入力方式を用いた車線追従制御設計を提案している[49]. 毛利らは, 車線追従制御におけるステアリング制御について, 舵角制御方式とトルク制御方式を比較している[50]. この比較結果からは, トルク制御方式の方がドライバの介入親和性が高いことが示されている. 障害物回避に関する研究も数多く報告されている. 例えば Soudakhksh らは, いくつかの限界条件を考慮した最適化計算から目標軌跡を演算し, これに追従するようにステアリング制御を行うことで, 緊急操舵時の最大横加速度の発生を抑制されることを報告している[51]. David らは, ファジー制御理論を用いた歩行者回避の制御手法を提案し, 実車実験でその有用性を実証している[52]. その他, モデル予測制御と呼ばれる現代制御を応用した研究も報告されている. 例えば Ercan らは, レーンチェンジにおける衝突回避操作のステアリング支援を, モデル予測制御を用いて構築している[53]. さらには, 車速制御との統合制御に関係する研究も報告されており, 例えば Hartmann らの研究等を挙げるができる[54].



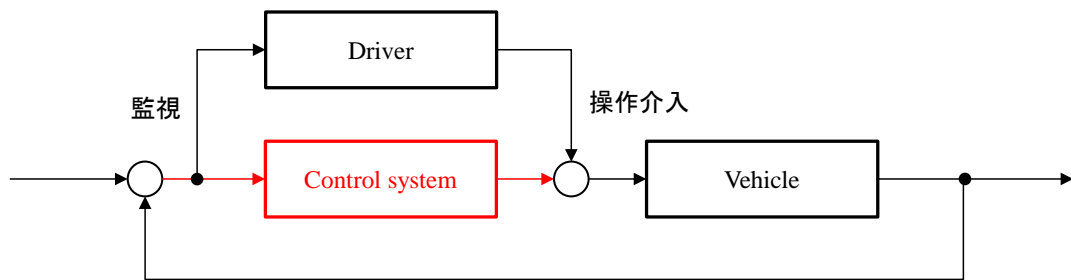
(a) 車両性能向上



(b) 制御システムの操作介入



(c) Shared Control



(d) 完全自動運転

図 1.22 ドライバと制御システムの関係

近年、(a)や(b)を応用させた(c)の形式に分類されるステアリング制御が注目されている。この形式は、シェアード・コントロール(以下、**Shared control** とする)と呼ばれる。これは、ステアリング制御で生じる舵角変動やトルク変動、または車両の姿勢変化等をドライバに積極的に示すことで、車両側の性能向上だけではなくドライバの運転操作の変容をも促そうとする形式である。つまり、制御システムの制御対象は車両とドライバの両方となり、ドライバとの協調特性はより高いレベルが求められる。この形式では、ドライバは常に運転操作の中心に存在することから、(d)の完全自動運転の形式とはドライバと制御システムの関係が大きく異なる。**Shared control** に関する基礎的な既往研究としては、Yuhara らの研究を挙げることができる[55]。この研究では、**Active kinesthetic feedback torque** と呼ばれる能動的なステアリングトルクを発生させて、ステアリングを切る方向をドライバに知らせる手法を提案している。提案するシステムをドライビングシミュレータで評価したところ、**Active kinesthetic feedback torque** によって、操舵特性の向上とドライバの操舵負荷は同時に低減することが確認されている。また永井らは、横風安定性を題材に操舵支援の協調特性について研究をおこなっている[56]。Griffiths らは、連続したコース内に幾つか視覚情報を遮る箇所を設けた実験をおこなっている[57]。シミュレータを用いた実験からは、視覚情報を遮った箇所に力覚教示を与えることで、ドライバはその教示を利用し適切に経路を追従できるようになることを確認している。

Shared control の支援形態を比較検討した研究も多い。例えば Navarro らは、警報音のみの支援、単純なステアリング振動の支援、切るべき方向を示す支援の3種類の形式について、ドライバ支援の比較実験をおこなっている[58]。ドライビングシミュレータを使って車線逸脱量を評価したところ、切るべき方向を示す支援が最も性能が高いことが明らかにされている。Petermeijer らは、**continuous guidance**(連続的な支援)と **binary feedback**(離散的な支援)の2種類の **Shared control** 形態について、詳細な比較検討を行っている[59]。その他、より高いレベルでの協調性能を実現するために、制御則を詳細に検討した研究も幾つか報告されている。例えば Abbink らは、ステアリングの反力ゲインの大きさを変えた詳細な実験をおこなっている[60]。また

Katzourakis らは、道路形状や車速に応じて反力トルクの絶対値および不感帯を可変にする制御則を検討している[61]. さらに Iwano らは、ステアバイワイヤシステムを用いた支援システムを設計し、緊急回避場面を題材に人間と機械の協調特性について評価をおこなっている[62]. 上記以外にも、fuzzy 制御や MPC 制御など、現代制御を応用した制御検討も研究例として挙げることができる[63] [64].

また Shared control の考え方は、駐車時の運転支援にも応用されている. この例としては、例えば Hiraoka らの研究や[65], Tada らの研究を挙げることができる[66]. 一方で、人間工学の観点からの Shared control 研究もある. これは、ドライバと制御システムの相互関係に対して権限の持ち方などを考察したものであり[67] [68] [69], 例えば Flemisch は、Shared control の考え方を人と馬の関係になぞらえて、Horse Metaphor (人馬一体) という概念を提案している[70].

1.5 直接ヨーモーメント制御に関する従来の研究

ステアリングに依らない横運動制御の別の方法として、左右の制動力差、駆動力差を積極的に作り出すことで、車両に直接的にヨーモーメントを発生させる Direct Yaw-moment Control(DYC)と呼ばれる制御手法がある. DYC は、1992 年に開催された AVEC'92 で多くの発表がなされた. 例えば Shibahara ら、または島田らは、旋回中における車両の安定性について、 β 線図と呼ぶ解析手法を提案し DYC の効果を検証している[71] [72]. 大久保らは、DYC を用いた様々な制御則を提案し、その長短を整理している[73]. 小竹らは、規範車両モデルに追従させることを目的としたモデルマッチング制御を提案し、DYC とアクティブステア制御を統合することの効果を検証している[74]. また Pongsathorn らは、DYC を用いた車線追従制御を提案しその有効性を小型電気自動車で実証している[75]. 横山らは車線維持支援制御を題材に、DYC を作動させた場合の車両挙動の変化をその他の横方向制御と比較する形で詳細に解析している[76]. 例えばセルフアライニングトルクの変化量に着目した解析では、DYC はその変化量が小さく、他の横方向制御と比べてドライバへの違和感が小さいことを明らかにしている. さらに Takahashi らは、G-Vectoring 制御と呼ばれる加減速制御と

DYC の統合制御を提案しており、G-Vecotoring 制御による加減速制御と ESC によるスピン抑制を効果的に組み合わせることを研究している[77]. ここで G-Vectoring 制御とは、Yamakado らが提唱した制御であり、滑らかで心地の良い車両挙動を実現するために、前後の速度制御を横加加速度の一次遅れ量で決定し熟練ドライバのような車両挙動を実現しようとするものである[78]. 本制御は、2016年にマツダから市販化され、G-Vectoring 制御は人間—機械の閉ループ系で車両の安定性に大きく寄与することが報告されている[79]. その他のDYCの応用研究例としては、衝突回避にDYCを用いた Jongsang らの研究や[80], 横運動とヨーレイトの安定性を検討した Rahimi らの研究を挙げることができる[81]. さらに、近年の自動車への省エネルギー要求を背景として、旋回時の車両姿勢を最適にすることで旋回時の低消費電力化を図る研究や、前後輪のタイヤ横力負荷を最適にすることで航続力を伸ばす研究など、エネルギーに着目した研究も盛んに行われている[82] [83] [84].

1.6 問題提起

第 1.1 節で述べたように、予防安全技術はたゆまぬ努力と挑戦の中で進化を続けてきた。また、第 1.2 節の自動運転技術が次の時代を担う真の進化を遂げれば、自動車は高度な知能を持つことになり、予防安全技術は、進化の階段をまた一段上ることになるだろう。ここで、1.3 節で示した人口構造の変化や交通事故問題等を鑑みれば、その高度な知能が高齢ドライバを支援するためのものとして用いられることは、重要な意義を持つと考えられる。またこの場合に高齢ドライバのニーズを読み解けば、その形式は図 1.22 に示す(d)の完全自動運転ではなく、ドライバと制御システムが協調して安全運転を実現する(c)の Shared control の形式が有用であると考えられる。本研究で目指す Shared control の概念図を図 1.23 に示す。その概念は、ドライバと制御システムが適切な相互作用を働かせることで、ドライバの運転行動をより高みに導くことである。稲垣らは、このことを、「人と機械が同じサブタスクを担当しながら、人が機械に、あるいは機械が人の力を貸すことでたがいの行為の質を高める「能力進展」

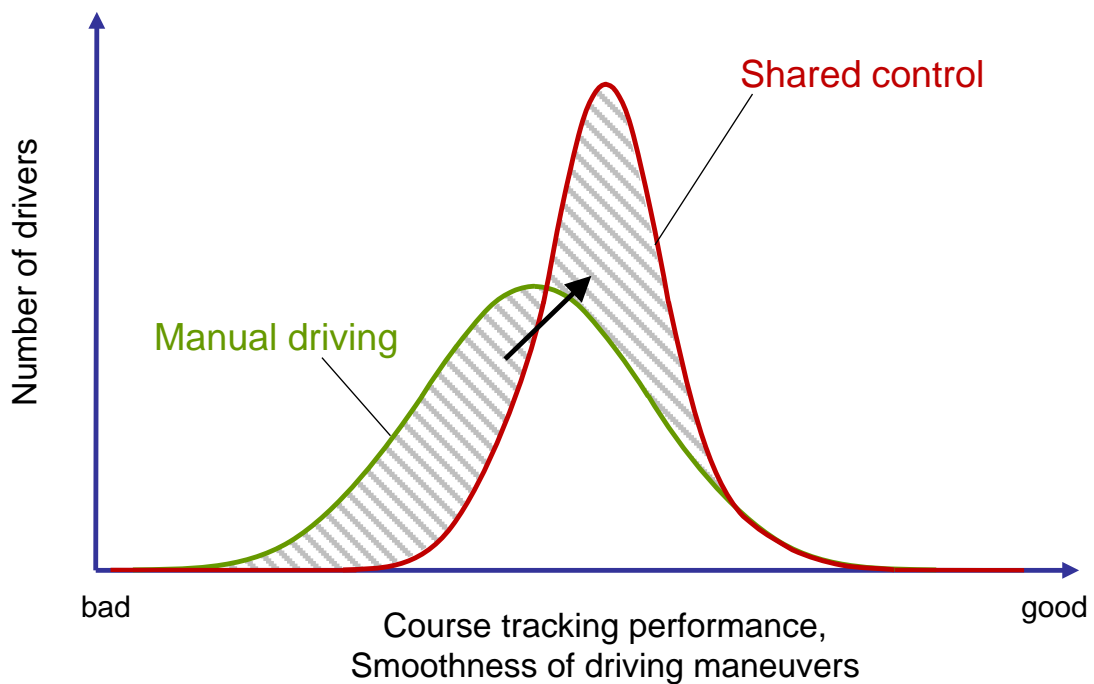


図 1.23 Shared control の概念

の可能性」と表現している[85]。ドライバ入力と制御システム入力をうまく協調することができれば、完全自動運転ではなく、ドライバの主体的な運転行動と制御システムによる運転アシストが両立された、新しい運転技術が提案できると考えられる。

本研究で提案する Shared control システムの位置づけを、運転状態の階層構造を用いて整理したい。図 1.24 は事故発生に至るまでの運転状態を、衝突余裕時間 TTC (Time To Collision) で階層化し、また既存の運転支援技術を各階層に対して整理したものである。ここで、運転状態は大きく通常運転領域(Normal driving)、緊急回避運転領域(Emergency driving)、そして遷移領域に位置付けられる潜在リスク予測運転領域(Risk predictive driving)の 3 層で定義することが出来ると考えられる。まず通常運転領域に対する運転支援技術は、通常時の支援であることから、快適性向上のための支援であると説明することが出来る。この領域のための支援技術には、例えばアダプティブ・クルーズ・コントロール(ACC)やレーンキープアシスト(LKA)がこれに該当し、既に実用化されている。同様に、緊急回避運転領域のための運転支援技術についても既に実用化された技術は多く、例えば自動緊急ブレーキ(AEB)やエレクトロニック・スタ



図 1.24 運転状態の階層構造と既存の運転支援技術の整理

ビリティ・コントロール(ESC)などは、広く一般的に知られる支援技術である。一方で、潜在リスク予測運転領域、すなわち、かもしれない運転のためのリスク回避支援技術については、現状は未確立である。もし潜在リスク予測運転領域に適用可能なリスク回避のための支援技術を構築することが出来れば、快適性向上のための支援技術から緊急回避のための支援技術までを、シームレスにつなぐことができる。ここで、Shared control の設計概念は、このリスク回避支援技術に対して非常に有効であると考えられる。その理由は、制御システムが規範ドライバのように潜在リスクを正しく読み、それに応じた規範操作を適切にドライバに教示することができれば、また、ドライバがその教示を適切に運転操作に反映することができれば、より安全でかつ滑らかな運転が、人間機械の閉ループ系で実現できると考えられるためである。

以上の研究背景から、本研究ではリスク回避支援技術の一形態として、シェアード・コントロール型の運転支援システムを設計提案し、また、その有効性を実証することを目指す。特に Shared control に関する従来研究の課題を鑑み、次の 3 項目を明らかにすることを目的とする。

第 1 の目的は、運転と運動のダイナミクスを同時に取り扱ったステアリングの

Shared control の設計をおこない、その協調特性を理論的に定式化することである。Shared control では、ドライバと制御システムが Co-pilot として運転をおこなう形態が取られる。その運転行動の結果は、自動車の運動のダイナミクスを生み、Co-pilot はその運動のダイナミクスを再び感知または検知し、次の運転行動を決定していると考えられる。このように運転と運動のダイナミクスは切り離せない深い関係があるといえる。しかしながら Shared control に関わる従来研究の多くは、ステアリングまわりの力のつり合いや車両が有する動特性など、運動のダイナミクスの内部状態は丁寧には扱われておらず、その運動の結果のみが評価されていることが多い。運動のダイナミクスを十分に考慮した Shared control を設計することが出来れば、運転と運動のダイナミクスの関係が定量化され、ドライバと制御システムの高い協調特性が得られると考えられる。

第2の目的は、ステアリング制御と DYC を組み合わせた 2 入力系の Shared control システムを設計することである。Shared control の課題の一つは、目標軌跡追従性能を高めようとした場合に、ドライバと制御システムの操舵が干渉してしまう課題である。この問題は、Yuhara ら[55]、永井ら[56]、Petermeijer ら[59]、Iwano ら[62]等の従来研究によって報告されている。また操舵支援の強さの感じ方が、個人によって大きく異なることも報告されている。このように、軌跡追従性能を高めながら、同時に強い操舵干渉を低減することは、従来の支援システムの形式では困難であるといえる。そこで、本研究ではこのトレードオフの関係を打開するために、ステアリング制御とは別の制御入力が可能な DYC を組み合わせた Shared control システムを提案し、その原理および有効性を評価する。

第3の目的は、提案システムの有効性を実車実験で示すことである。Shared control に関わる従来研究の多くは、シミュレーションやドライビングシミュレータなどを用いた評価が多い。この研究が真の有用性を示し、さらに実用化たるものであることを証明するためには、実車でその効果が検証される必要があると考えられる。そこで本研究では、提案システムを実車に実装し、実車実験の検討から提案システムの有用性を評価する。

1.7 本論文の構成

本論文では、予防安全技術のさらなる進化を目指し、車両のアクティブ制御技術を用いた新しい Shared control システムを提案することを目的とする。1.1 節では予防安全技術の発展の歴史を整理した。また 1.2 節では、現在最も注目されている自動運転の歴史および開発動向を述べた。さらに 1.3 節では、高齢ドライバーの増加およびそれに伴う安全にかかわる課題を明らかにするとともに、高齢ドライバーが運転に高いモチベーションを有していることを示した。1.4 節および 1.5 節では、車両のアクティブ制御技術の中で、本研究との関連が深いステアリング制御技術と直接ヨーモーメント制御技術の従来研究を整理した。1.6 節では、本研究の問題提起と目的を明確にした。以下第 2 章からの構成概要は次の通りである。

第2章 経路追従時のシェアード・コントロールの設計と理論解析

はじめに、Shared control の考え方に基づいたアクティブステアリング制御と、人間と機械の協調特性をさらに向上させるための DYC 制御を組み合わせた、Shared control システムの全体構成を示す。ここでの Shared control の考え方とは、規範ドライバーと実ドライバーの運転操作の差に応じて、能動的なステアリング反力(Haptic)を作用させ、実ドライバーの運転行動の変容を促すというものである。また DYC の制御則については、その基礎検討の第一歩として、ステアリング舵角比例制御を採用する。次に、DYC が操舵支援に与える影響を、車両のダイナミクスのアプローチから理論的に解析する。解析の結果からは、DYC を組み合わせることで、同じ操舵支援のゲインでも制御システムの経路追従性が向上すること、またドライバーは運転しやすい車両が得られることを示す。最後にシミュレーション検討結果を示し、上記の効果によって、提案するシステムが強い操舵干渉を減らしながら同時に高い軌跡追従性を実現できることを明らかにする。

第3章 経路追従時のシェアード・コントロールの実験的検討

第2章で構築した Shared control の制御設計の有効性を評価するために、ドライビングシミュレータを用いた実験検討を示す。具体的には、若年ドライバ 10 名と、高齢ドライバ 8 名を被験者としたシングルレーンチェンジの実験をおこなう。時刻歴応答を示し、操舵反力制御によって、さらには DYC という別の制御入力組み合わせられた場合に、時刻歴応答がどのように変化するかを丁寧に考察する。また、若年ドライバと高齢ドライバの運転操作の変容度合いを比較し、提案する Shared control システムの効果が高齢ドライバの方により顕著な効果を有することを示す。最後に、ドライバトルクに対する横加速度のリサージュ波形を示し、ドライバと制御システムは同調関係を有していること、また互いが協調することで人間-機械の閉ループ系で安定的な車両挙動が実現されることを明らかにする。

第4章 潜在リスク予測型シェアード・コントロールの設計と理論解析

提案する Shared control システムを潜在リスク予測運転シーンに拡張応用させる。駐車車両回避のシーンを題材に制御系設計をおこない、駐車車両を安定的に回避し、かつ側方間隔を正しく取るように誘導するための機能として、Shared control システムを構築する。はじめに、ポテンシャルに基づく運動計画法とその設計方針を示す。次に DYC 制御則の最適化について述べる。ここでは、第3章で得られた知見を踏まえ、ステアリング舵角比例制御に対してヨーレイト偏差フィードバック制御を組み合わせることを提案する。この狙いは、ヨーレイト偏差フィードバック制御を加えることで、人間機械の協調度合いを安定化させることである。最後にシミュレーション検討を示し、ポテンシャルに基づく運動計画法が規範ドライバモデルとして動作することを示す。また、ドライバと制御システムの相互作用に対して、ヨーレイト偏差フィードバック制御が安定化作用を及ぼしていることを確認する。

第5章 潜在リスク予測型シェアード・コントロールの実験的検討

第4章で示した制御設計の有効性を評価するために、ドライビングシミュレータを使った実験検討を示す。後述する通り、第3章で示す実験結果からは、高齢ドライバの方が提案システムの支援効果が顕著であることが明らかとなる。そこで本章では高齢ドライバを対象とした実験をおこない、高齢ドライバの運転行動の変化に対してより詳細な評価をおこなう。

提案システムの協調特性は操舵支援ゲインの大きさと強い関係性があると考えられる。そこで、車両の運動のダイナミクスを考慮した理論解析をおこない、操舵支援ゲインの大きさについて物理的な意味づけをおこなう。具体的には、規範ヨーレイト追従制御における人間—機械のシェアード・コントロール比率を理論的に導くことで、実験で設定した操舵支援ゲインと協調特性の関係を解明する。

提案する Shared control システムの作用原理を正しく理解するためには、どのようなメカニズムでドライバの運転行動変容が起きているのかを明らかにしなければならない。そこで本章では最後に、上記の実験で得られた実測値を使って、ドライバモデルの内部パラメータを同定する。同定結果を制御有無の違いで比較、評価することで、ドライバの運転操作の変容メカニズムを定量的に整理する。

第6章 実験車両を用いた有効性検証

これまで確認した提案システムの有効性を、実車で確認することを目的とする。実車評価によって、ドライビングシミュレータでは再現が難しい車両の加速度感や繊細な操舵感を含めた検証を行い、真の有用性を示すことが目的である。またシステムの製品化の観点からは、提案する Shared control が現在の世にある車両のアクティブ制御技術で作動が可能であることを示すことも意義が大きいと考えられる。具体的には、小型電気実験車と市販車改造実験車2種類の実車実験結果をしめす。市販車改造実験車を用いた実験では、詳細な被験者実験をおこない、経路追従性能とステアリングのトルク干渉の関係を定量的に解析する。また被験者から得られた主観評価を纏め、官能評価の観点から提案システムの有効性に加え、今後取り組むべき応用課題について

整理する.

第7章 結論

第1章で掲げた3つの目的に対し, 各章から得られた知見を纏める. 本論文の最終的な研究成果として, ドライバの運転行動をより高みに導くための支援システムの一形態として, 操舵反力制御とDYCを用いたシェアード・コントロール型運転支援システムの実現が示され, 予防安全技術のさらなる進化が可能であるとした.

第 2 章

経路追従時のシェアード・コントロールの 設計と理論解析

2.1 はじめに

本研究で対象とする Shared control システムを有した自律運転知能システムの全体構造を図 2.1 に示す[86]. その全体構造は, 大きく 3 つの技術領域から構成される. 1 つめは走行環境認識部である. 地図, カメラ・ヨーレイトセンサなどの自律センサ, 取得した信号をフュージョンする構造部等からなる. ここからは自車が走行している現在位置や前方の道路環境情報等が出力される. 2 つめは, 規範ドライバモデル部である. 熟練ドライバが行う先読み運転や危険予知などを内包したモデルであり, ここからは規範操作量が算出される. 3 つめは, Shared control 部である. ドライバの操作と制御システムの操作を協調させることが目的であり, 本研究が対象とする領域である.

Shared control の基本原理を図 2.2 に示す. その特徴は, 1. 実ドライバと制御システムが同時に運転操作を行う, 2. 規範ドライバモデル部が演算する規範操作と, 実ドライバがおこなう実操作との差をステアリングの能動的な反力(Haptic)として返すという 2 つの仕組みである. 実ドライバには, ステアリングという触覚的なインターフェースを通して, 規範運転が時々刻々教示される. 実ドライバは, この反力によってそのシーンにおける規範運転を理解することができる. このように, 実ドライバの運転操作の変容を促し規範運転に導くことで, 実ドライバの運転行動をより高みに導くことが, 提案するシステムの狙いである.

Shared control には幾つかの課題があることが既往研究から報告されている. 第一の課題は, 高い経路追従性能を要求した場合に, ドライバと制御システムの間で強い操舵干渉が発生する問題である. 例えば永井らは, 横風安定性を題材に, 一般ドライ

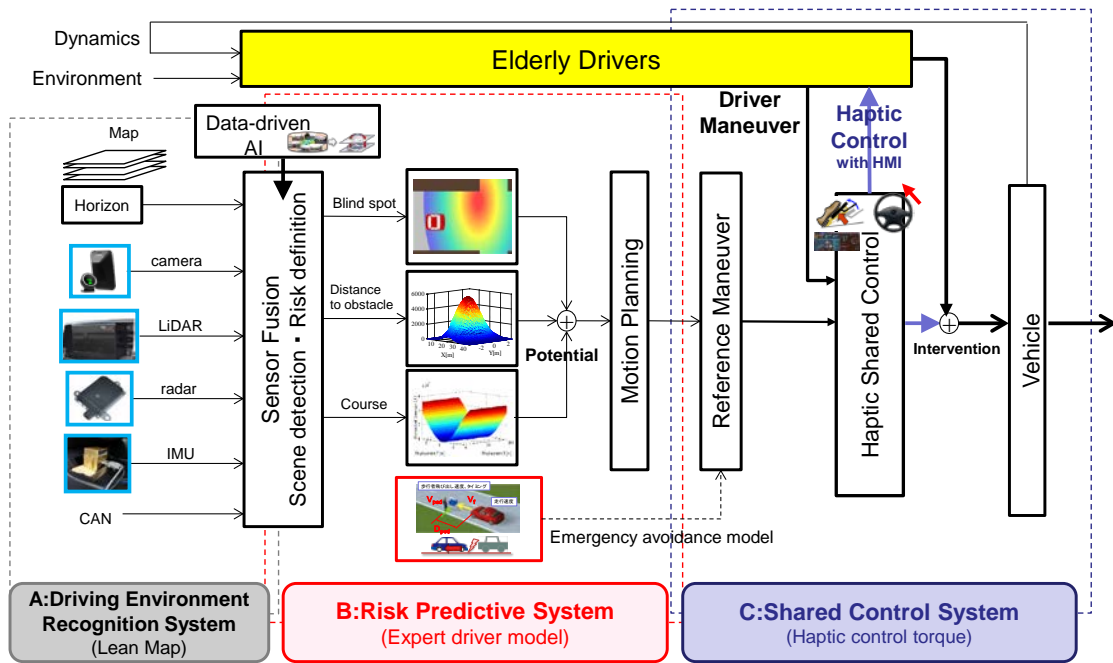


図 2.1 自律運転知能システムの構造

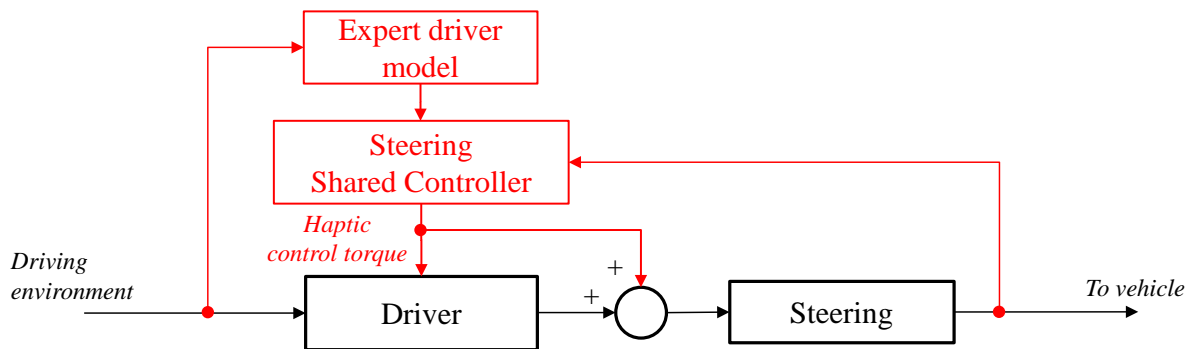


図 2.2 Shared Control の基本原理

バを対象としたシミュレータ実験をおこなっている[56]. 実験では、操舵支援制御の強さを変え、その時の横風安定性と操舵トルク干渉の関係を検証している. 検証の結果、両者にはトレードオフの関係があり、横風安定性を向上させようとする、強い操舵支援量が加わり、ドライバの操舵負担トルクがかえって大きくなってしまふことを報告している. 同様の問題は、Yuhara[55]ら、Flemisch[87]ら、Mulder[88]らの研究でも指摘されている. 第 2 の課題は操舵支援の感じ方に個人差があることである. Petemeijer らの研究では、約 1.2km の周回コースをドライビングシミュレータ上に設

定し、連続的に力覚ガイダンスを与えた時の運転成績の向上効果を評価している[59]. 実験には 32 名のドライバが参加しているが、同じ力覚ガイダンスゲインにも関わらず、その感じ方は個人によって大きく異なり、強すぎると感じるドライバも存在したことを示している.

これらの課題を解決する最も単純な手段は、操舵支援のゲインを小さく設定することである. しかしながら、操舵支援のゲインを単純に小さくしてしまうと、ドライバはステアリングから来る能動的な反力を得にくくなるというトレードオフの問題が発生する. また制御システムの経路追従能力が悪化する問題も起きる. 別の解決方法は個人の運転能力に応じて操舵支援の強さを変える個人適応型の操舵支援の設計方法が挙げられる. しかしこの場合は個人差を何かしらの定量値で評価する必要が出てきてしまい、複雑な人間工学を制御系に組み入れなければならなくなる.

上記の課題を解決するために、本研究ではアクティブステアリング制御に **DYC** を組み合わせたシステムを提案する. **DYC** に注目する理由は、**DYC** は各輪の制駆動力を用いて車両の方向制御を行うため、ステアリングを介さずに車両横方向制御が出来る点である. **DYC** に横方向制御の一部を分担させながら、かつドライバの運転操作の変容を助ける作用を働かせることで、操舵支援のゲインは変えずに人間と機械の協調系で規範運転を実現する能力を高めることが、提案するシステムの目的である.

第 2 章では、上記の基礎検討の第一歩として、経路追従走行における **Shared control** システムの制御設計をおこなう. 具体的には、**DYC** が操舵支援に与える影響を、車両のダイナミクスのアプローチから理論解析する. **DYC** によって、同じ操舵支援のゲインでも、制御システムとしての経路追従性が向上すること、またドライバが運転しやすい車両が得られることを示し、提案するシステムが操舵干渉を減らしながら同時に高い軌跡追従性を実現できることを、理論的に示す.

2.2 Shared Control システムの制御設計

2.2.1 制御システムの全体構成

本節では、操舵支援システムとDYCによるShared control システムの設計について、その詳細を述べる。本研究ではコースに対する実ドライバの認知・判断、ステアリングの操作、車両の運動という通常の系に対し、操舵支援を行うための制御部（以下、操舵反力制御部とする）とDYC支援を行うための制御部（以下、DYC制御部とする）を新たに構築する(図 2.3)。本研究におけるステアリングは、ステアリングホイールとタイヤがステアリングギヤを介して直結された構造を対象とし、トルク入力方式を前提とする。すなわち実ドライバの操舵トルク(以下、ドライバトルクとする)と、操舵反力制御部の操舵支援トルク(以下、反力制御トルクとする)は、同時にステアリング入力され、タイヤに伝わるものとする。

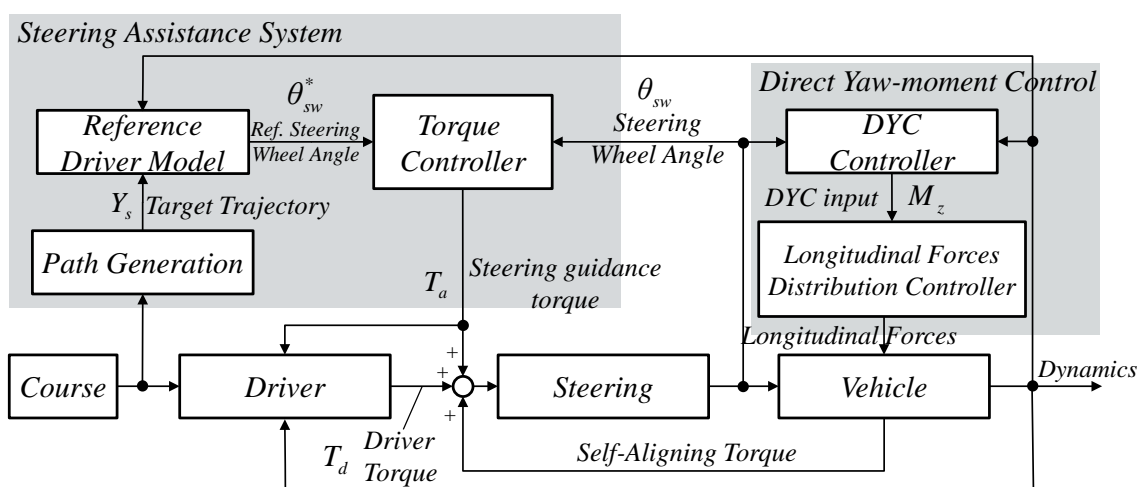


図 2.3 Shared control ブロック図

2.2.2 操舵反力制御の設計

操舵反力制御部のブロック図を図 2.4 に示す。図 2.4 に示すように、操舵反力制御部は経路生成部，規範ドライバモデル部，反力制御トルク決定部から構成される。規範ドライバモデルには，式(2.1)で示す舵角入力方式の前方注視点操舵モデルを定義し，そのコースに対して適切な操舵を行うようにパラメータを設定する。

$$\theta_{sw}^* = \frac{h_s}{1 + T_{ns}s} \{Y_s - (Y_c + T_{ps}V\psi)\} \quad (2.1)$$

ただし， θ_{sw}^* は規範ステアリングホイール舵角， h_s は規範ドライバ操舵ゲイン， T_{ns} は一次遅れ時定数， Y_s は規範ドライバ目標軌跡， Y_c は Y 方向車両軌跡， T_{ps} は規範ドライバ前方注視時間， V は車速， ψ は車両ヨー角である。

反力制御トルク決定部には，式(2.2)を定義し，規範ドライバモデル部で演算された規範ステアリングホイール舵角 θ_{sw}^* と，実ステアリングホイール舵角 θ_{sw} の差に対し比例制御で操舵支援トルク T_a を決定する。

$$T_a = K_a(\theta_{sw}^* - \theta_{sw}) \quad (2.2)$$

ただし， K_a は反力制御トルクゲインである。

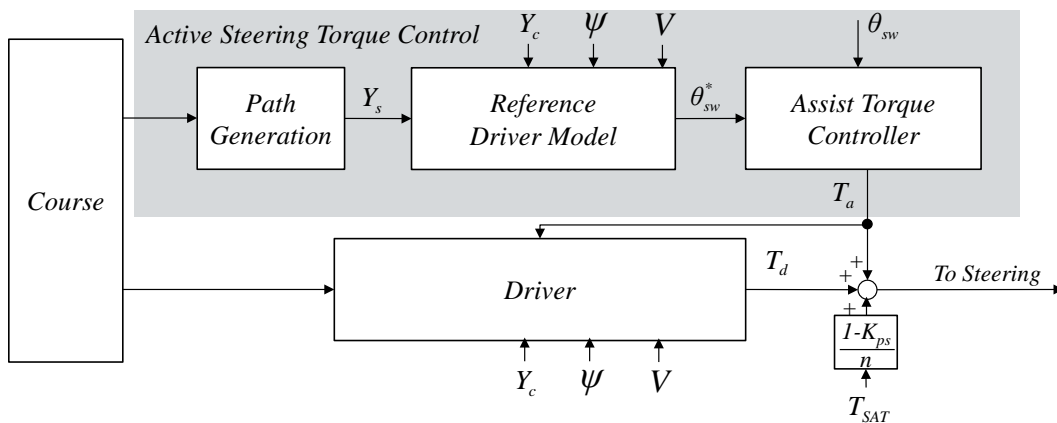


図 2.4 操舵支援制御部のブロック図

実ドライバ入力を反映したステアリング舵角が、規範ドライバが指令するステアリングホイール舵角と一致する場合は、反力制御トルクはゼロとなる。この状態では、反力制御トルク起因する力覚(反力)を実ドライバは感じることはない。操舵反力制御部はこの原理を活用し、操舵誘導の機能を担う。

2.2.3 DYC 設計

図 2.5 は DYC 制御部のシステム図である。DYC 制御量決定部、前後力左右分配演算部から構成される。DYC の制御則は、これまでに様々なものが提案され、その効果が確認されている[89]。本報では、DYC が有する次の 2 つの効果に注目する。1 つめは、前輪のセルフアライニングトルク T_{SAT} が小さくなる効果である。セルフアライニングトルクが小さくなると、作用・反作用の関係により、同じ横運動を実現するために必要な反力制御トルクは小さくできる。すなわち、反力制御トルクゲインを大きくしなくても、操舵反力制御部で分担する経路追従性能を上げることができる。2 つめは、車両の応答性が向上し運転しやすい車両が得られる効果である。この効果によって、ドライバは、反力制御トルクで得た規範軌跡に自身の目標軌跡を一致させ易くなるのが期待できる。その効果により、ドライバトルクは小さくなると考えられる。

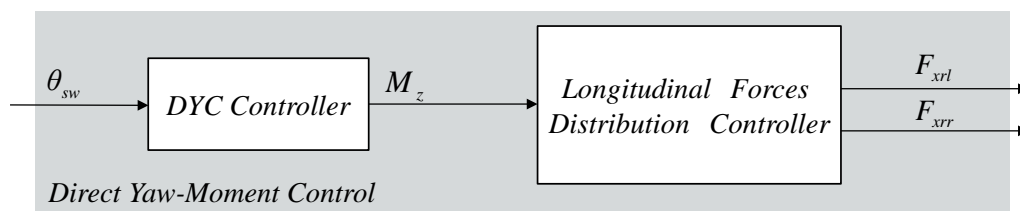


図 2.5 DYC 制御部のブロック図

そこで本報では、DYC 制御量決定部に式(2.3)の舵角比例制御を定義し、上記 2 つの効果を狙う。

$$M_{DYC} = K_{mz} \times \frac{\theta_{sw}}{n} \quad (2.3)$$

ただし、 K_{mz} は DYC ゲイン、 n はステアリングギヤ比である。なお、本制御則では、例えば定常円旋回のようなコースにおいて、操舵支援制御によって規範ドライバと実ドライバの運転行動が一致した場合でも、DYC は入力されることになる。

前後力左右分配制御部では、後輪駆動を前提とし、左右後輪に分配する制駆動力 F_{xrl} , F_{xrr} を式(2.4)、式(2.5)で演算する。

$$F_{xrr} = \frac{1}{2}mA_x^* + \frac{1}{d}M_{DYC} \quad (2.4)$$

$$F_{xrl} = \frac{1}{2}mA_x^* - \frac{1}{d}M_{DYC} \quad (2.5)$$

ただし、 m は車両重量、 A_x^* は車両目標前後加速度、 d はトレッドである。

2.3 人間機械系の開ループ解析

DYC が操舵支援に与える効果を解析する。具体的には、ステアリングのトルクに注目し、ステアリングへのトルク入力に対する横加速度の応答を解析する。

はじめに、ステアリングまわりの運動方程式を整理する。ステアリングを、複雑なパワーステアリング機構および操舵系のねじれ剛性を考慮しない線形モデルで仮定すると(図(2.6))、その運動方程式は式(2.6)で定義できる[90]。

$$\theta_{sw} = \frac{1}{J_s s^2 + C_s s} \left(T_d + T_m - \frac{T_{SAT}}{n} \right) \quad (2.6)$$

ここで、 J_s はステアリング系慣性モーメント係数、 C_s はステアリング系粘性摩擦係数、 T_m はステアリングモータトルクである。

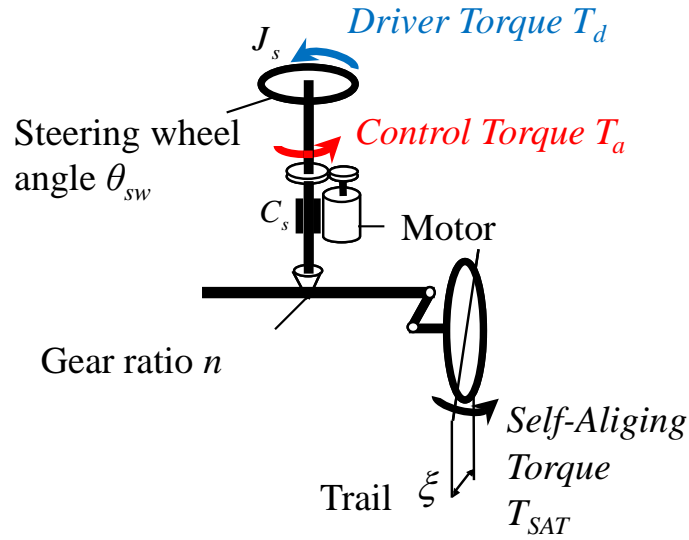


図 2.6 ステアリング線形モデル

ステアリングモータトルク T_m およびセルフアライニングトルク T_{SAT} は、それぞれ式 (2.7)、式(2.8)で定義される。

$$T_m = K_{ps} \times \frac{T_{SAT}}{n} + T_a \quad (2.7)$$

ここで、 K_{ps} はパワーステアリングのアシストトルク係数である。

$$T_{SAT} = 2\xi C_f \left(\frac{\theta_{sw}}{n} - \beta - \frac{l_f}{V} \gamma \right) \quad (2.8)$$

ここで、 ξ はニューマチックトレイル、 C_f は前輪コーナリングパワー、 β は車体スリップ角、 l_f は前輪-重心間距離、 γ はヨーレートである。

車両を線形 2 輪モデルで定式化すれば、車体スリップ角 β 、ヨーレート γ は、式(2.3)を用いて、式(2.9)、式(2.10)のように整理できる[91].

$$\begin{aligned} \beta &= G_\delta^\beta \frac{1 + T_\delta^\beta s}{1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + \frac{1}{\omega_n^2} s^2} \frac{\theta_{sw}}{n} + G_m^\beta \frac{1}{1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + \frac{1}{\omega_n^2} s^2} M_z \\ &= \frac{\left\{ G_\delta^\beta T_\delta^\beta s + (G_\delta^\beta + G_m^\beta K_{mz}) \right\} \theta_{sw}}{1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + \frac{1}{\omega_n^2} s^2} \frac{1}{n} \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned}
\gamma &= G_\delta^\gamma \frac{1+T_\delta^\gamma s}{1+\frac{2\zeta}{\omega_n}s+\frac{1}{\omega_n^2}s^2} \frac{\theta_{sw}}{n} + G_m^\gamma \frac{1+T_m^\gamma s}{1+\frac{2\zeta}{\omega_n}s+\frac{1}{\omega_n^2}s^2} M_z \\
&= \frac{\left\{ (G_\delta^\gamma T_\delta^r + G_m^\gamma T_m^\gamma K_{mz})s + (G_\delta^\gamma + G_m^\gamma K_{mz}) \right\} \theta_{sw}}{1+\frac{2\zeta}{\omega_n}s+\frac{1}{\omega_n^2}s^2} \frac{1}{n}
\end{aligned} \tag{2.10}$$

ただし、各係数は以下のようになる。

$$\begin{aligned}
G_\delta^\beta &= \frac{1 - \frac{m}{2l} \frac{l_f}{l_r} V^2}{1 + AV^2} \frac{l_r}{l} & G_m^\beta &= -\frac{mV^2 + 2(l_f C_f - l_r C_r)}{4C_f C_r l^2 (1 + AV^2)} \\
T_\delta^\beta &= \frac{I_z V}{2l_r C_r} \frac{1}{1 - \frac{m}{2l} \frac{l_f}{l_r} V^2} \\
G_\delta^\gamma &= \frac{1}{1 + AV^2} \frac{V}{l} & G_m^\gamma &= \frac{C_f + C_r}{2C_f C_r l} \frac{1}{1 + AV^2} \frac{V}{l} \\
T_\delta^\gamma &= \frac{ml_f V}{2l C_r} & T_m^\gamma &= \frac{mV}{2(C_f + C_r)} \\
\omega_n &= \frac{2l}{V} \sqrt{\frac{C_f C_r}{m I_z}} \sqrt{1 + AV^2} & \zeta &= \frac{m(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r) + I_z (C_f + C_r)}{2l \sqrt{m I_z C_f C_r} (1 + AV^2)}
\end{aligned}$$

式(2.7)、式(2.8)、式(2.9)および式(2.10)の関係を式(2.6)に代入することで、ドライバトルクまたは操舵支援トルクに対するステアリングホイール角の関係は式(2.11)となる。

$$\frac{\theta_{sw}}{n} = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{A_4 s^4 + A_3 s^3 + A_2 s^2 + A_1 s + A_0} (T_d + T_a) \tag{2.11}$$

ただし、各係数は以下の通りである。

$$\begin{aligned}
a_2 &= \frac{1}{\omega_n^2}, & a_1 &= \frac{2\zeta}{\omega_n}, & a_0 &= 1 \\
A_4 &= \frac{nJ_s}{\omega_n^2}, & A_3 &= \frac{nC_s}{\omega_n^2} + \frac{2n\zeta J_s}{\omega_n}, \\
A_2 &= \frac{2n\zeta C_s}{\omega_n} + nJ_s + \frac{2\zeta C_f(1-K_{ps})}{n} \frac{1}{\omega_n^2} \\
A_1 &= nC_s + \frac{2\zeta C_f(1-K_{ps})}{n} \left(\frac{2\zeta}{\omega_n} - G_\delta^\beta T_\delta^\beta - G_\delta^\gamma \frac{l_f}{V} T_\delta^\gamma - G_m^\gamma \frac{l_f}{V} T_m^\gamma K_{mz} \right) \\
A_0 &= \frac{2\zeta C_f(1-K_{ps})}{n} \left\{ 1 - G_\delta^\beta - G_\delta^\gamma \frac{l_f}{V} - \left(G_m^\beta + G_m^\gamma \frac{l_f}{V} \right) K_{mz} \right\}
\end{aligned}$$

次に車両の運動方程式を整理する．車両の横加速度 A_y は，式(2.3)を用いて，式(2.12)のように整理できる．

$$\begin{aligned}
A_y &= VG_\delta^\gamma \frac{1+T_{\delta 1}^a s + T_{\delta 2}^a s^2}{1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + \frac{1}{\omega_n^2} s^2} \frac{\theta_{sw}}{n} + VG_m^\gamma \frac{1+T_m^a s}{1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + \frac{1}{\omega_n^2} s^2} M_z \\
&= \frac{q_2 s^2 + q_1 s + q_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \frac{\theta_{sw}}{n}
\end{aligned} \tag{2.12}$$

ただし各係数は以下の通りである．

$$\begin{aligned}
T_{\delta 1}^a &= \frac{l_r}{V}, & T_{\delta 2}^a &= \frac{I_z}{2lC_r}, & T_m^a &= -\frac{l_f C_f - l_r C_r}{V(C_f + C_r)} \\
q_2 &= T_{\delta 2}^a VG_\delta^\gamma, & q_1 &= T_{\delta 1}^a VG_\delta^\gamma + T_m^a VG_m^\gamma K_{mz}, & q_0 &= VG_\delta^\gamma + VG_m^\gamma K_{mz}
\end{aligned}$$

以上より，得られたステアリングまわりの運動方程式の式(2.11)と，車両運動方程式の式(2.12)を用いると，ドライバトルクまたは操舵支援トルクと横加速度の関係は，式(2.13)のように定式化できる．

$$A_y = \frac{q_2 s^2 + q_1 s + q_0}{A_4 s^4 + A_3 s^3 + A_2 s^2 + A_1 s + A_0} (T_d + T_a) \quad (2.13)$$

さらに、式(2.13)の s 項をゼロとして解くと、その定常ゲインは式(2.14)で定式化できる。

$$A_y = \frac{nl \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2lC_f} + \frac{1}{2lC_r} \right) K_{mz} \right\}}{\xi (1 - K_{ps}) ml_r \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2l_r C_r} - \frac{l}{ml_r V^2} \right) K_{mz} \right\}} (T_d + T_a) \quad (2.14)$$

得られた式(2.14)を用いて、DYCの効果を検討する。(ここでは、ドライバトルクをゼロとする)。図2.7上段は、車速違いにおける定常ゲイン図である。本研究では中速領域を対象とするが、DYC入力量 K_{mz} に応じて、中速の全領域に渡って定常ゲインが

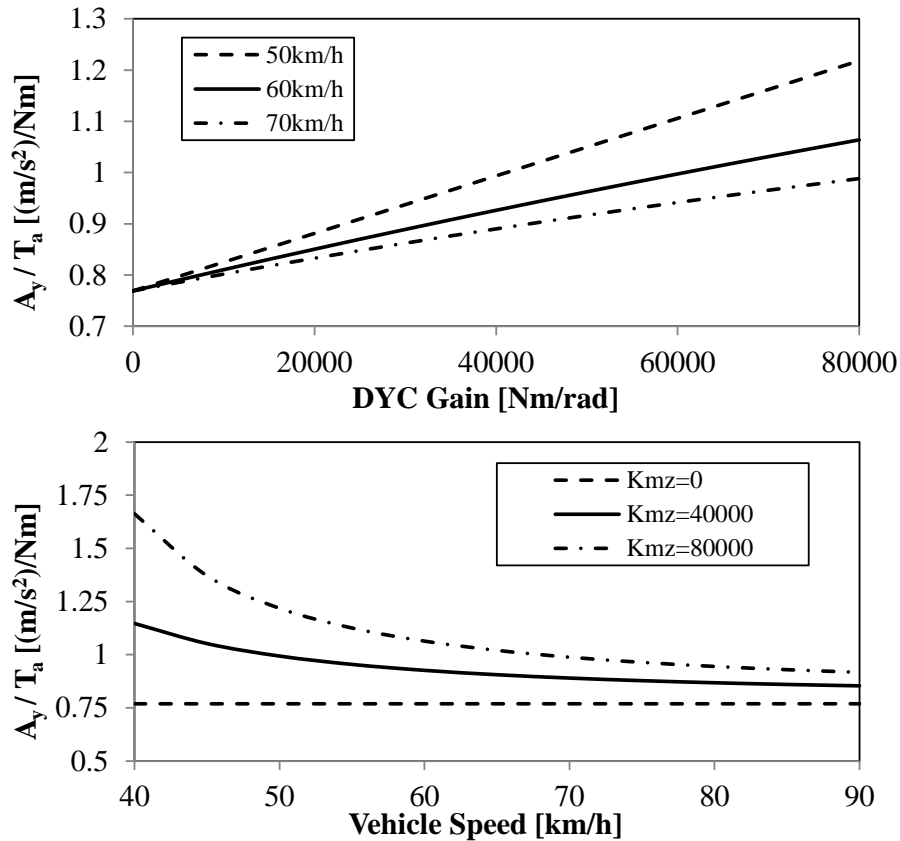


図 2.7 反力制御トルクに対する横加速度の定常ゲイン
(上段：x 軸は DYC ゲイン，下段：x 軸は車速)

増大している。この効果は、同じ反力制御トルクであっても、その横運動制御は増大することを示しており、本研究における DYC の狙いを実現している。なお、図 2.7 上段の定常ゲイン図は、車速に依存している。その理由は、式(2.14)の分母の K_{mz} 項が車速に依存するためである。図 2.7 下段は、車速違いにおける定常ゲイン図である。本車両の諸元では、50km/h 付近より低車速側では、式(2.14)の K_{mz} 項の符号は負になる。しかし対象とする中車速領域では、その絶対値は小さいため、分母全体では正の値をとる。このため、定常ゲインは DYC ゲインに比例して増大することになる。

次に、DYC がトルク干渉に及ぼす影響度合いを具体的に定量化してみる。改めて図 2.7 上段に注目する。車速を 60km/h に設定した場合、DYC 非制御、すなわち $K_{mz}=0$ における定常ゲインは $0.76(\text{m/s}^2)/\text{Nm}$ である。一方、DYC ゲインを 40000Nm/rad に設定した場合、反力制御トルクに対する横加速度の定常ゲインは、 $0.92(\text{m/s}^2)/\text{Nm}$ である。この 2 つの数値の比率は 1.2 倍である。このことから、DYC を組み合わせることで、同じ反力制御トルクであっても 1.2 倍の横運動制御が実現できると見積ることができる。

2.4 人間機械系の閉ループ解析

本節では、ドライバを含めた閉ループ解析を行い、DYC がドライバの運転操作に与える効果を考察する。ここでは、反力制御トルクはゼロとする。式(2.15)は本研究で仮定するトルク入力形式の前方注視ドライバモデルである。

$$T_d = \frac{H}{\tau_v s + 1} \{Y_d - (Y_c + T_p V \psi)\} + \frac{K_h}{\tau_h s + 1} T_a \quad (2.15)$$

ただし、右辺第一項は視覚由来を、右辺第二項は力覚由来をあらわす。また、 H は視覚由来の操舵ゲイン、 τ_v は視覚由来の一次遅れ時定数、 Y_d はドライバ目標軌跡、 T_p は前方注視時間、 V は車速、 ψ はヨー角、 K_h は力覚由来の操舵ゲイン、 τ_h は力覚由来の一次遅れ時定数である。実ドライバは自身の視覚情報と、反力制御トルクから得られる力覚情報を組み合わせて、ステアリングにトルクを入力するとする。なお、本モデ

ルは、Yuhara ら[55]，堀内ら[92]の研究を参考にして応用発展させている．

式(2.10)の 1 階積分がヨー角，式(2.12)の 2 階積分が車両の実横変位であることを用いて，式(2.15)に代入すると，実ドライバの目標横変位 Y_d に対する実横変位 Y_c の関係は，式(2.16)で定式化できる(力覚由来の一次遅れ時定数は非常に小さい．そこでここでの計算では，系の見通しを良くするために $\tau_h=0$ とした)．

$$Y_c = \frac{u_2 s^2 + u_1 s + u_0}{U_7 s^7 + U_6 s^6 + U_5 s^5 + U_4 s^4 + U_3 s^3 + U_2 s^2 + U_1 s + U_0} Y_d \quad (2.16)$$

ただし，各係数は以下の通りである．

$$u_2 = Hq_2, \quad u_1 = Hq_1, \quad u_0 = Hq_0$$

$$U_7 = T_n A_4, \quad U_6 = T_n A_3 + A_4, \quad U_5 = T_n A_2 + A_3, \quad U_4 = T_n A_1 + A_2,$$

$$U_3 = T_n A_0 + A_1, \quad U_2 = H a_1 + A_0 + T_p V H (G_\delta^\gamma T_\delta^\gamma + G_m^\gamma T_m^\gamma K_{mz})$$

$$U_1 = H q_1 + T_p V H (G_\delta^\gamma + G_m^\gamma K_{mz}), \quad U_0 = H q_0$$

式(2.16)を用いて，車速 60 km/h における経路追従性能を，周波数応答で解析する．はじめに，マニュアル運転時(すなわち DYC 非制御時)において，ドライバモデルの内部パラメータと経路追従性能の関係を評価する．表 2.1 はドライバモデルの標準パラメータである．これらの値を標準パラメータとして設定し，視覚由来の一次遅れ時定数 τ_v を 0.05 から 0.5 まで 0.05 刻みで変化させた場合の周波数応答を図 2.8 に示す．同様に，前方注視時間 T_p を 0.8 から 1.8 まで 0.1 刻みで変化させた場合の周波数応答を図 2.9 に，視覚由来の操舵ゲイン H を 0.6 から 1.5 まで 0.1 刻みで変化させた場合の周波数応答を図 2.10 に示す．図 2.8 より， τ_v を大きくした場合，ゲインにピークが発生していることが確認できる．また位相の遅れも確認できる．また，値を大きくしていくことで 0.1 Hz から 0.2 Hz 付近ではコーストレース性が悪くなってしまうことが確

表 2.1 ドライバモデル標準パラメータ

<i>Definition</i>	<i>Symbol</i>	<i>Value</i>	<i>Unit</i>
Visual time constant	τ_v	0.2	s
Preview time	T_p	1.2	s
Visual steering gain	H	1.1	N
Haptic time constant	τ_h	0.05	s
Haptic steering gain	K_h	-0.5	-
Vehicle velocity	V	60	km/h

認できる．図 2.9 からは，前方注視時間を大きくすることでゲインのピークが減少し位相の遅れも改善することがわかる．しかし，過大な前方注視時間は逆に経路追従性が悪化することが確認できる．前方注視時間は，どの程度遠くをドライバが見ながら操作を決定しているかというものである．過大な前方注視時間は，ドライバが描くコースと目標コースの差がかえって大きくなってしまうため，経路追従性能が悪化すると考えられる．図 2.10 からは，操舵ゲインを大きくすることでゲインのピークが小さくなり，定常ゲインが改善することが確認できる．また，位相の遅れも改善していることがわかる．

次に **DYC** の効果について考察を行う．表 2.1 に示す実ドライバを仮定した際に，**DYC** 入力量を変化させた周波数応答を図 2.11 に示す．ゲイン 1.0 はコーストレース性能が高いことをあらわすが，**DYC** 入力量 M_{DYC} に応じて，0.15Hz 以降のゲインが改善することが確認できる．また位相図に注目すると，0.1Hz から 0.4Hz における位相遅れの改善も確認できる．以上の結果は，**DYC** によって，運転し易い車両が得られることを意味しており，実ドライバは **DYC** なしと比較して，より無駄のないトルク入力でコースを運転できると考えられる．

改めて，式(2.16)の前方注視ドライバモデルに注目する．提案する **Shared control** システムでは，右辺第 2 項であらわされる制御反力トルクを使ってドライバに追従すべ

き軌跡を感じさせ、右辺第 1 項にある目標軌跡を変容させることが狙いである。ドライバはその変容を、ドライバトルクの変化としてステアリングに加える。この時、DYCによって運転し易い車両が得られていれば、ドライバは反力制御トルクで得た規範軌跡に、自身の目標軌跡を一致させ易くなり、ドライバトルクは結果的に小さくなると考えられる。このメカニズムによって、提案する Shared control システムでは、反力制御トルクゲインを小さくせずとも、経路追従性能と操舵干渉が同時に低減される。

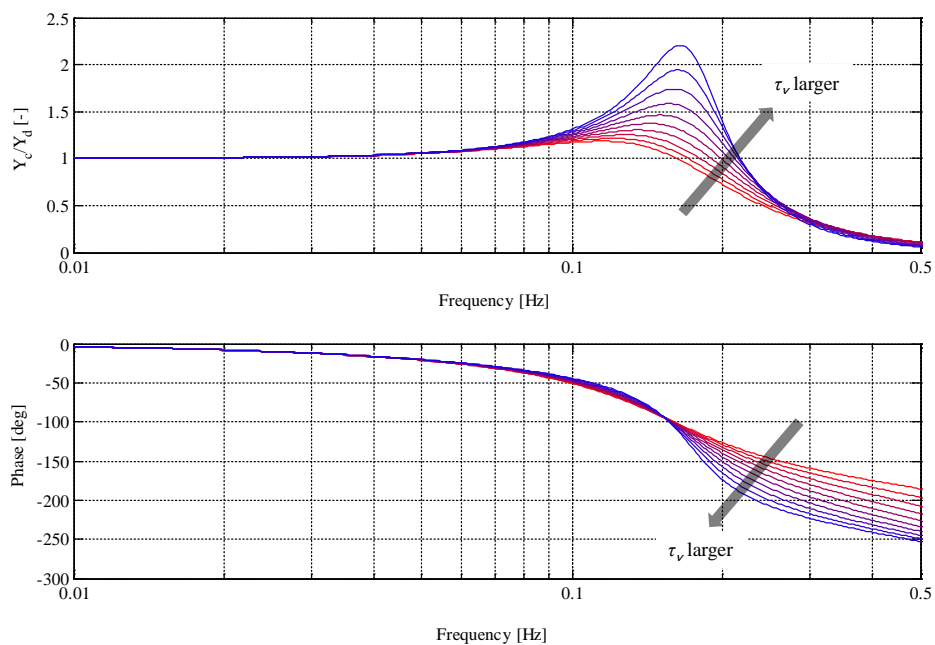


図 2.8 ドライバ目標横変位に対する実横変位のボード線図

(視覚由来の一次遅れ時定数 τ_v を 0.05 から 0.5 まで 0.05 ずつ変化させた場合)

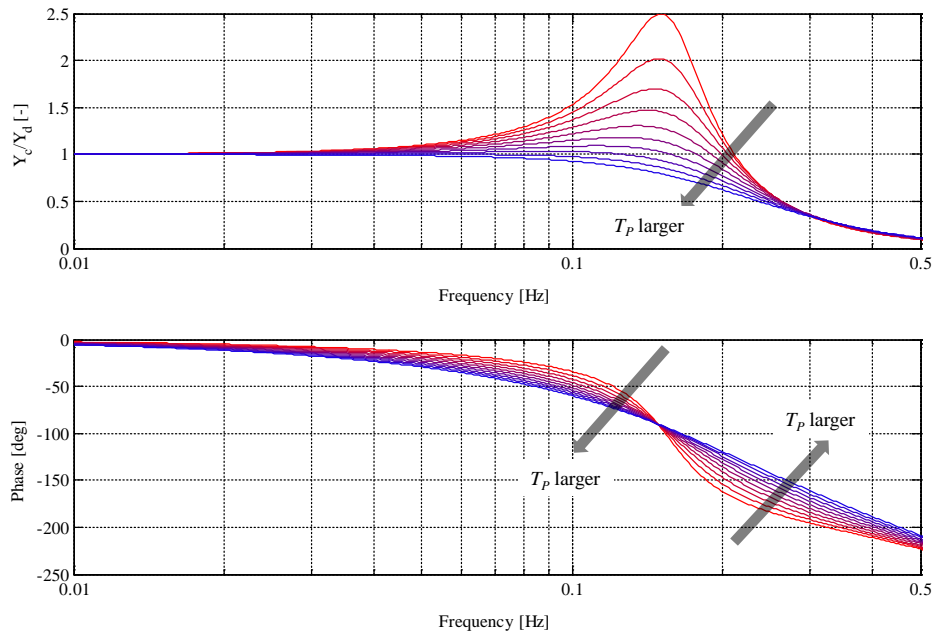


図 2.9 ドライバ目標横変位に対する実横変位のボード線図
(前方注視時間 T_p を 0.8s から 1.7s まで 0.1s ずつ変化させた場合)

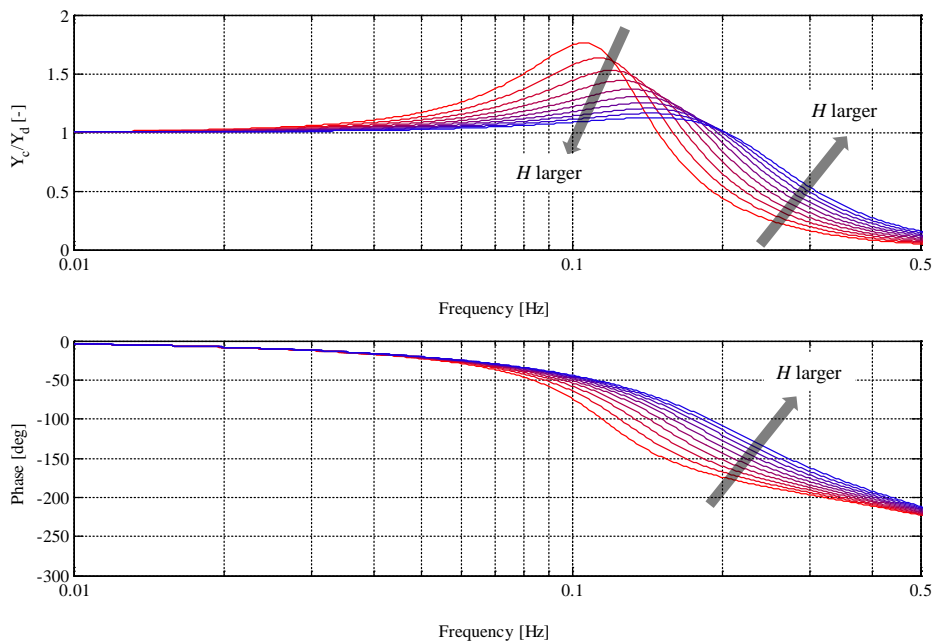


図 2.10 ドライバ目標横変位に対する実横変位のボード線図
(視覚由来の操舵ゲイン H を 0.6N から 1.5N まで 0.1N ずつ変化させた場合)

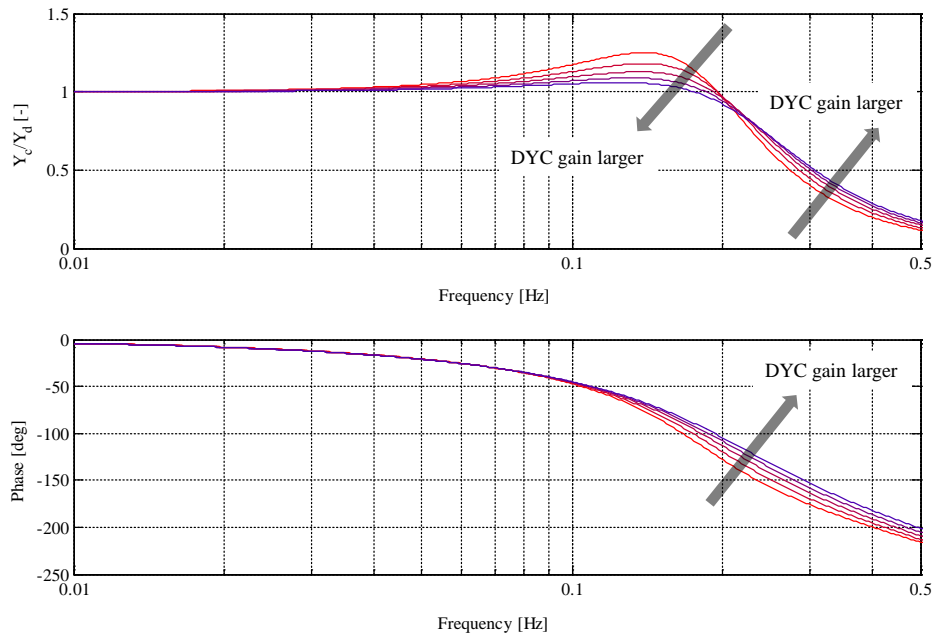


図 2.11 ドライバ目標横変位に対する実横変位のボード線図
(DYC を加えた場合，ドライバは表 2.1 の標準パラメータ)

2.5 人間機械系のシングルレーンチェンジシミュレーション

これまでに説明した操舵反力制御と DYC による Shared control システムの作用を評価するために，式(2.15)のドライバモデルを用いてシングルレーンチェンジシミュレーションを行った．コース図を図 2.12 に，シミュレーション条件を表 2.2 に示す．制御無し，操舵制御，操舵制御と DYC を組み合わせた 3 種類の条件とし，操舵反力制御の反力制御トルクゲインは $K_a=4$ で固定した．表 2.3，表 2.4 には，シミュレーションで用いた車両パラメータと規範ドライバモデルのパラメータを示す．計算時間ステップは 0.05s とした．ステアリングのモデルには式(2.6)を用い，車両のモデルには線形 2 輪モデルを用いた．

図 2.13 にシミュレーション結果を示す．はじめに横加速度に注目する．操舵支援，操舵支援+DYC は，制御なしと比較して，ともに横加速度の立ち上がりの応答が良くなっている．これは，規範ドライバモデル前方注視時間を大きく設定していることに

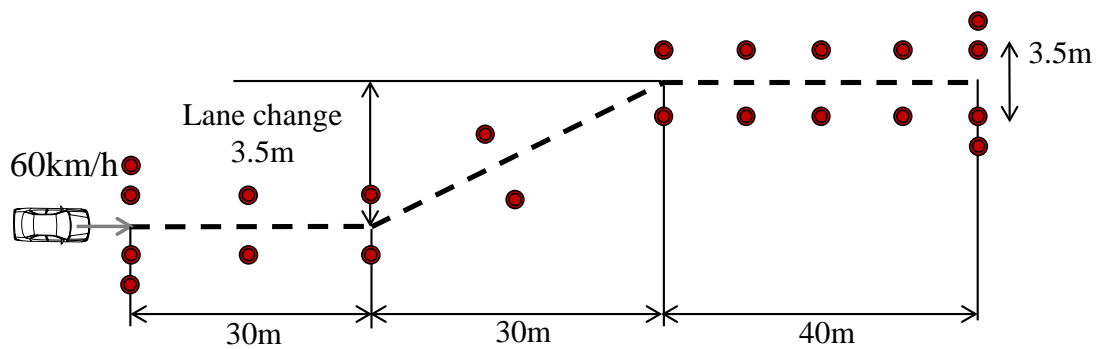


図 2.12 シングルレーンチェンジコース図

表 2.2 シミュレーション条件

Type	K_a [Nm/rad]	K_{mz} [Nm/rad]
Without control	0	0
Steering control	4	0
Steering control + DYC	4	4×10^4

表 2.3 規範ドライバモデルパラメータ

Definition	Symbol	Value	Unit
Reference visual time constant	τ_n	0.05	s
Reference preview time	T_{ps}	1.3	s
Reference steering gain	h_s	0.4	N

由来する。この結果、実ドライバトルクの波形が変化しており、操舵支援トルクによって操舵が誘導されていることが確認できる。

次に実ドライバトルク、操舵支援トルクに注目する。いずれも DYC 入力によってトルクが小さくなっている。図 2.14 はドライバトルクと操舵支援トルクの差の二乗積分結果である。ここで、積分区間は時刻 0s から 7s とした。図 2.11 の結果によれば、DYC 入力によってその干渉が低減しており、第 2.3 節および第 2.4 節の考察と合致する結果が得られている。ドライバは、操舵時に操舵支援トルクとセルフアライニング

表 2.4 車両パラメータ

<i>Definition</i>	<i>Symbol</i>	<i>Value</i>	<i>Unit</i>
Vehicle mass	m	1500	Kg
Yaw moment of inertia	I_z	2457	Kgm ²
Distance between C.O.G and front axle	l_f	1.1	m
Distance between C.O.G and rear axle	l_r	1.54	m
Wheel base	l	l_f+l_r	m
Tread base	t_d	1.54	m
Cornering stiffness of front tires	C_f	49500	N/rad
Cornering stiffness of rear tires	C_r	55000	N/rad
Trail	ξ	0.05	m
Coefficient of assist torque	K_{ps}	0.5	-
Steering gear ratio	N	17	-
Moment of inertia of steering system	J_s	0.034	kgm ²
Equivalent viscous friction coefficient of steering wheel system	C_s	0.11	Nms/rad

トルクの合計のトルクを反力として得ているが，そのうち，反力制御トルクを操舵反力の能動的な変化分として感じていると考えられる．従って，両者の干渉が低減されることで，実ドライバが操舵に対して得られる手ごたえは，違和感が小さくなっていると考えられる．最後に車両軌跡に注目する．図 2.15 は車両軌跡の拡大図である(規範ドライバモデル目標横変位を 2 点破線で示す)．操舵支援，操舵支援+DYC とともに，制御なしと比較して安定側に改善しているが，操舵支援+DYC は規範ドライバモデルの目標横変位 Y_s により漸近している．以上より，操舵支援+DYC は，操舵のトルク干渉を低減しながら，コーストレース性能を同時に実現できることが確認された．

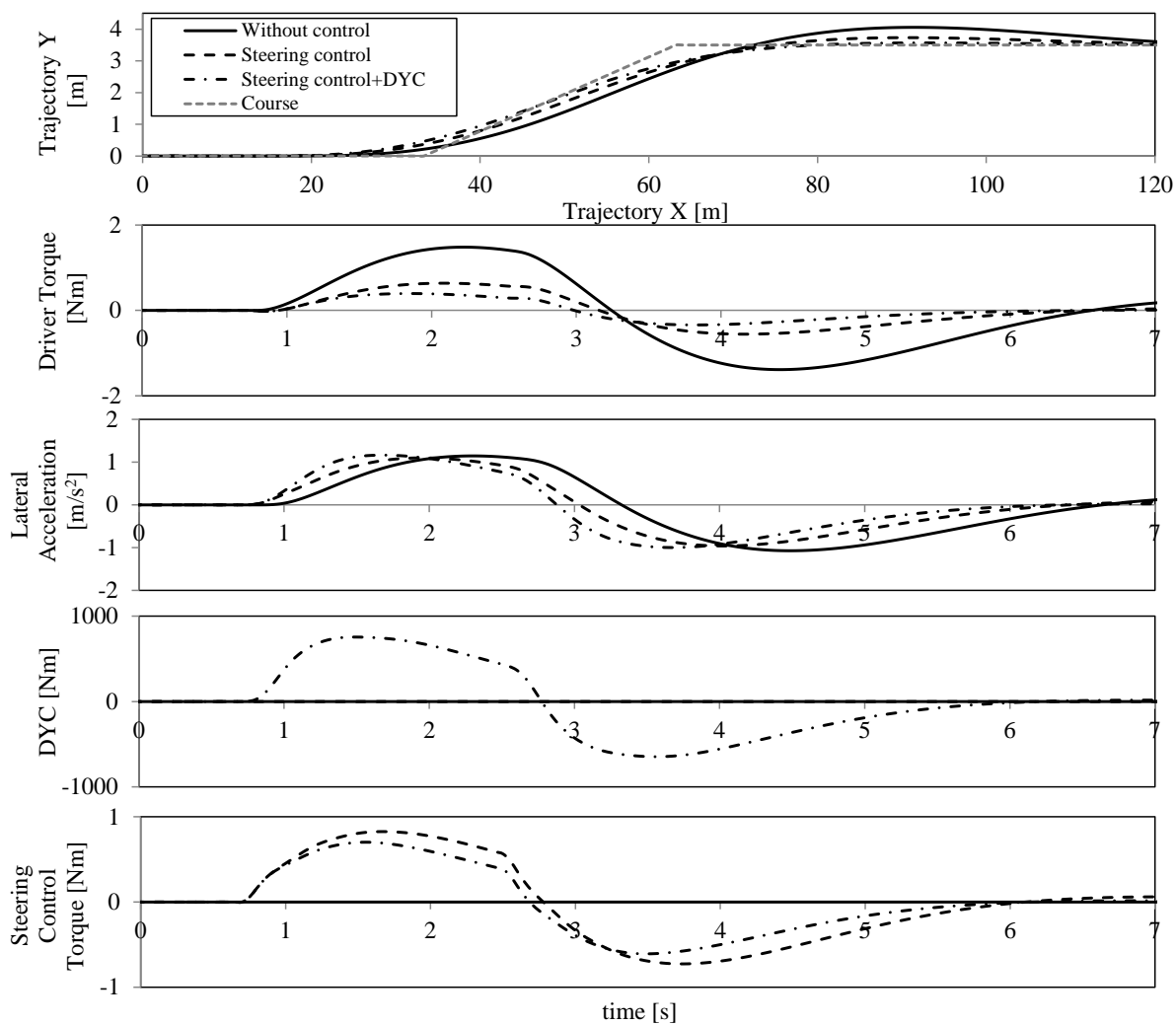


図 2.13 シミュレーション結果

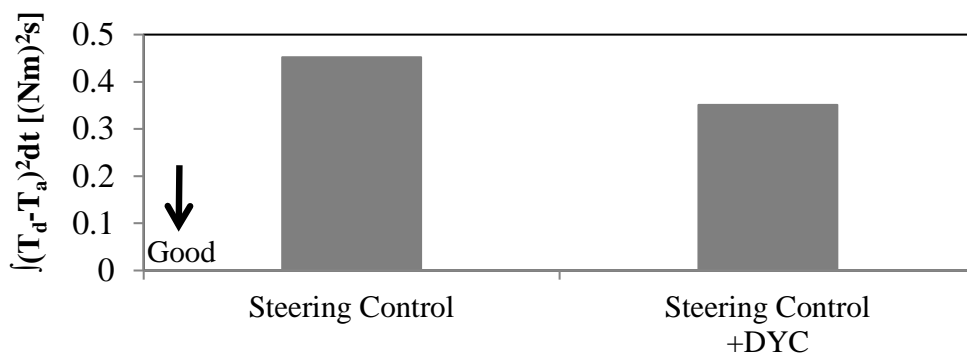


図 2.14 ドライバトルクと反力制御トルクの上乗積分値

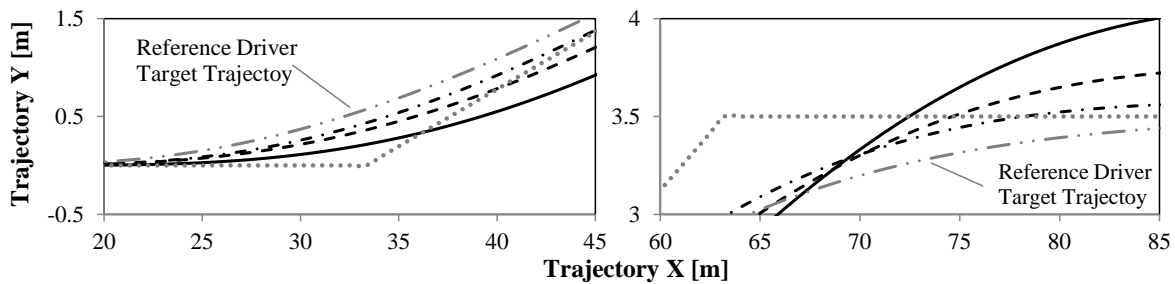


図 2.15 車両軌跡の拡大図 (X=20~45m, 60~85m)

2.6 まとめ

本章では、実ドライバの運転行動をより高みに導くためのアクティブステアリング制御則を検討した。また、従来の操舵支援が有する 1. 高い経路追従性能を要求した場合の操舵干渉, 2. 支援の感じ方に個人差があるという課題を、操舵支援のゲインを変えずに解決するために、DYC を組み合わせた制御則を提案した。理論解析やシミュレーション検討を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 実ドライバの運転操作を規範ドライバモデルに導くために、それらの差分に応じた能動的な反力制御トルクを、ステアリングというインターフェースを介してドライバに教示する仕組みを、ステアリングのアクティブ制御則として考案した。
- (2) DYC を組み合わせることで、同じ横運動における前輪のセルフライニングトルクは小さくできる。これによって、反力制御トルクゲインを大きく設定しなくても、操舵反力制御部で分担する経路追従性能を向上させることができる。すなわち、規範教示の強さを変えずに経路追従性能の向上機能を高めることができる。
- (3) ステアリング舵角に比例した DYC を入力することで、車両応答の定常ゲインは大きくなり、運転し易い車両が得られる。この効果によって、ドライバは、反力制御トルクで得た規範軌跡に、自身の目標軌跡を一致させ易くなる。これによりドライバトルクは小さくなる。

(4) シングルレーンチェンジを題材としたシミュレーションをおこなった。計算結果からは、上記(2)、(3)の効果を確認することが出来た。

第 3 章

軌跡追従時のシェアード・コントロールの 実験的検討

3.1 はじめに

高齢ドライバの運転行動や運転技量を定量的に評価しようとする取り組みは、古くより多くの研究が成されてきた。例えば平松らは、20 歳代、40 歳代、65 歳以上の 3 世代を対象に、前方コースの提示時間(予見時間)と運転成績の関係を調べている[93]。赤松らは、道路交通環境と高齢ドライバの運転技量の関係を詳細に調査し、非高齢者と比較すると、高齢者はカーブ進入時のハンドル操作に切り遅れが発生しやすく、また操作の滑らかさが不足しやすいことを明らかにしている[94]。同様のシーンに対する分析には、高地らの研究もある[95]。また小竹らはドライブレコーダを用いて運転行動を収集し、高齢ドライバの認知特性に由来した不安全行動の発生メカニズムを説明している[96]。

制御システムが支援する場合の高齢ドライバの運転行動の変化に着目した研究としては、例えば山崎らの研究がある[97]。この研究では、高齢者の聴覚特性を支援するための聴覚情報提示法を提案している。別の研究としては Hong らの研究がある[98]。この研究では、交差点での停止に対する警報システムの有効性について、若年ドライバと高齢ドライバを比較した実験をおこなっている。また、栗谷川らは、アンケート調査や身体特性の計測結果を用いて、高齢ドライバに好適な夜間視認支援システムを提案している[99]。さらに Mulder らは、ステアリングの運転支援に注目した研究を行っており、提案する力覚ガイダンスシステムを 12 名の高齢ドライバで評価している[100]。評価の結果からは、提案システムは、曲線経路追従性は向上する一方で、ドライバのステアリングトルクが増大する課題があることを明らかにしている。

本章では、第 2 章で構築した Shared control の制御設計について、ドライビングシ

ミュレータを用いた実験検討を示す。具体的には，若年ドライバ 10 名と，高齢ドライバ 10 名を被験者としたシングルレーンチェンジの実験をおこなう。上記の既往研究では，運転成績の結果は示されているものの，車両の運動に大きな影響を与えるステアリングまわりのトルクやステアリング舵角等の物理量の変容は丁寧に考察されていない。そこで本章ではこれらの時刻歴応答を示し，操舵反力制御によって，さらには **DYC** という別の制御入力があった場合に，それらがどのように変化するのかを丁寧に考察する。また，若年ドライバと高齢ドライバの効果作用の違いを考察し，運転のし易さと運動の安定性の両方から提案システムを評価する。

3.2 農工大ドライビングシミュレータ

3.2.1 全体構成・主計算機

図 3.1 にドライビングシミュレータの外観図，図 3.2 にドライビングシミュレータの構成図を示す。ドライビングシミュレータは実車同様の運転装置を有し，道路環境や他車交通流などの設定を行うことで，任意の交通状況および場面を再現することができる。

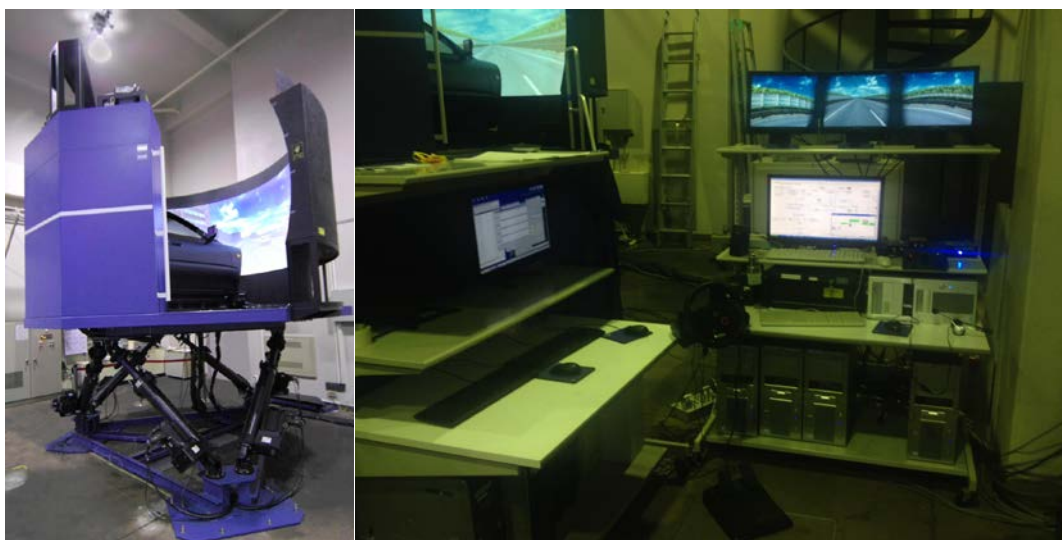


図 3.1 農工大ドライビングシミュレータ

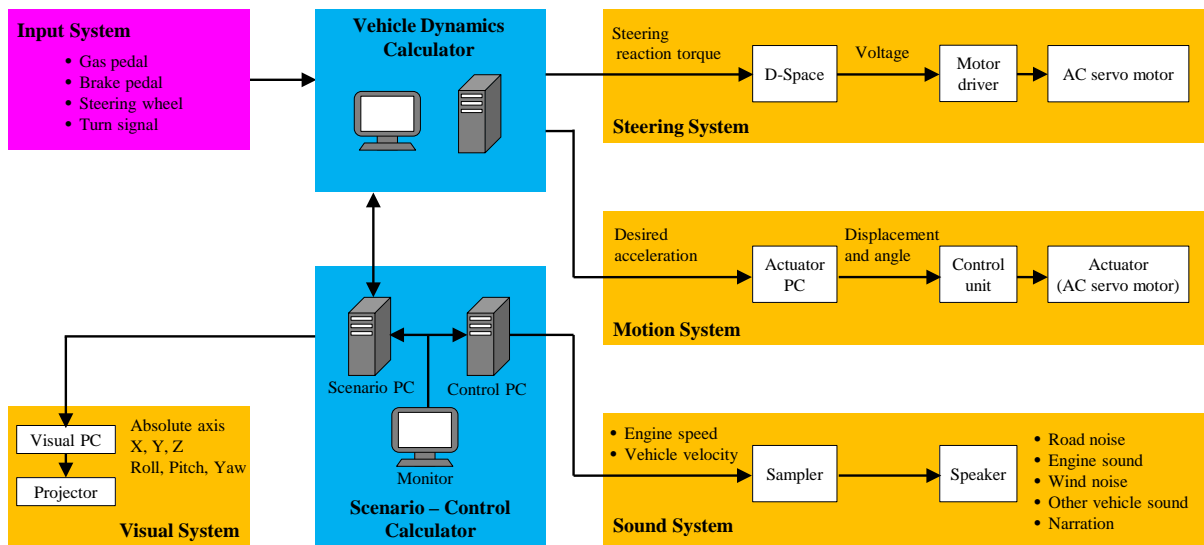


図 3.2 シミュレータ構成図

主計算機はドライバインターフェイスからの入力をもとに車両挙動を計算する装置である。計算された車両運動状態を元に、ドライバインターフェイスに信号を送り、実際の走行場面を再現する。

また、主計算機では各種走行場面を再現するため、他車走行の制御、障害物の発生等を行うプログラムを実験車自身が作成し実行することが可能である。また走行中の各種データを記録し、解析・処理を行うことが可能である、さらに主計算機には dSPACE 社製の DSP ボードが併設されており、付属のソフトウェアにより、Mathworks 社製の MATLAB, Simulink によって記述された任意の制御アルゴリズムを実装することができる。

3.2.2 動揺装置

動揺装置は 6 つの AC サーボモータ駆動型アクチュエータを用いて 6 自由度の運動を作り出すことができる。図 3.3 に示すように、実際の車両の加速度をドライビングシミュレータで模擬する際には、初動加速度をキャビンの並進運動、持続加速度をキャビンの傾斜を用いて 2 つの模擬加速度の和により加速度の模擬を行っている。

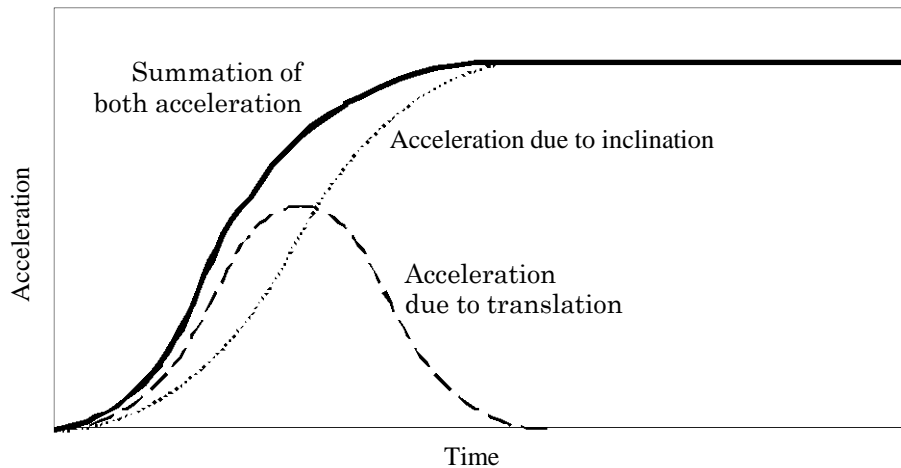


図 3.3 加速度の模擬方法

3.2.3 ステアリングシステム

図 3.4 にステアリングシステムの概念図を示す。ステアリングシステムはドライバーのハンドル角を入力として受け取り、操舵反力をドライバーに返すシステムである。ステアリングシステムは AC サーボモータ、トルクセンサ、ステアリングホイールから成るステアリングユニット、AC サーボモータを駆動するサーボアンプ、主計算機内の操舵反力制御器から構成される。

ドライバーがハンドル操作を行うと AC サーボモータのエンコーダによって計測されるハンドル角が DSP ボードを介して主計算機に送られる。主計算機内の車両モデルではこの信号を元にセルフアライニングトルクの計算を行う。操舵反力計算機ではセルフアライニングトルクから操舵反力を算出する。操舵反力は指令電圧信号に変換された後、DSP ボードを介してサーボアンプに送られ、AC サーボモータにトルクが発生する。ドライバーはこのトルクを操舵反力として認知する。

図 3.5 にステアリングユニットの外観図を示す。ステアリングユニットはサーボモータとステアリングホイールが 1 軸上に配置されおり、その中間にトルクセンサが配置されている。さらにねじれによる編力の変化の影響を少なくするような高剛性のカップリングで各デバイスを結合し、サーボモータからステアリングホイールまでの距離を限りなく短くしてある。また、ステアリングシステムの主な仕様は表 3.1 に示す通りである。

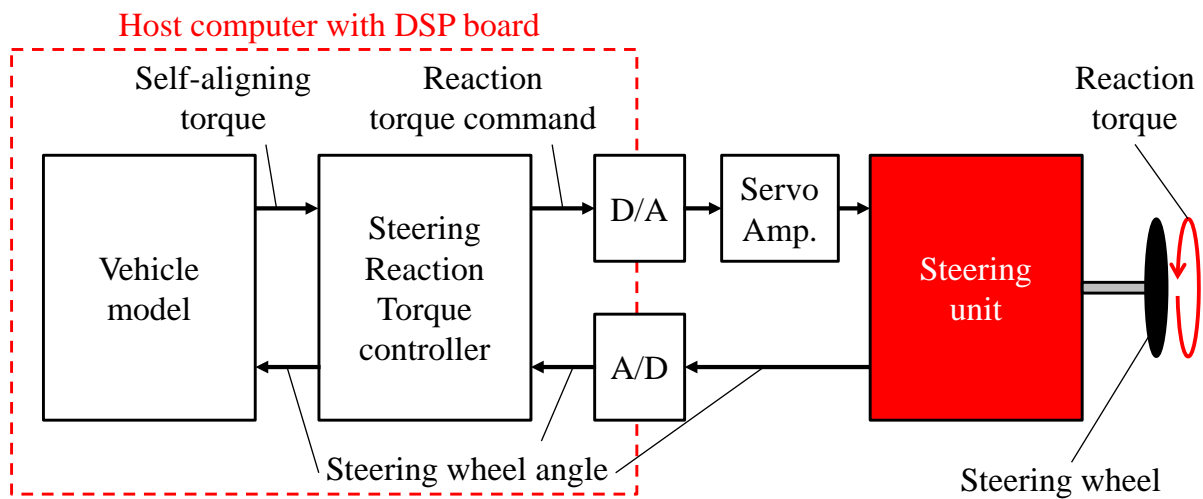


図 3.4 ステアリングシステム

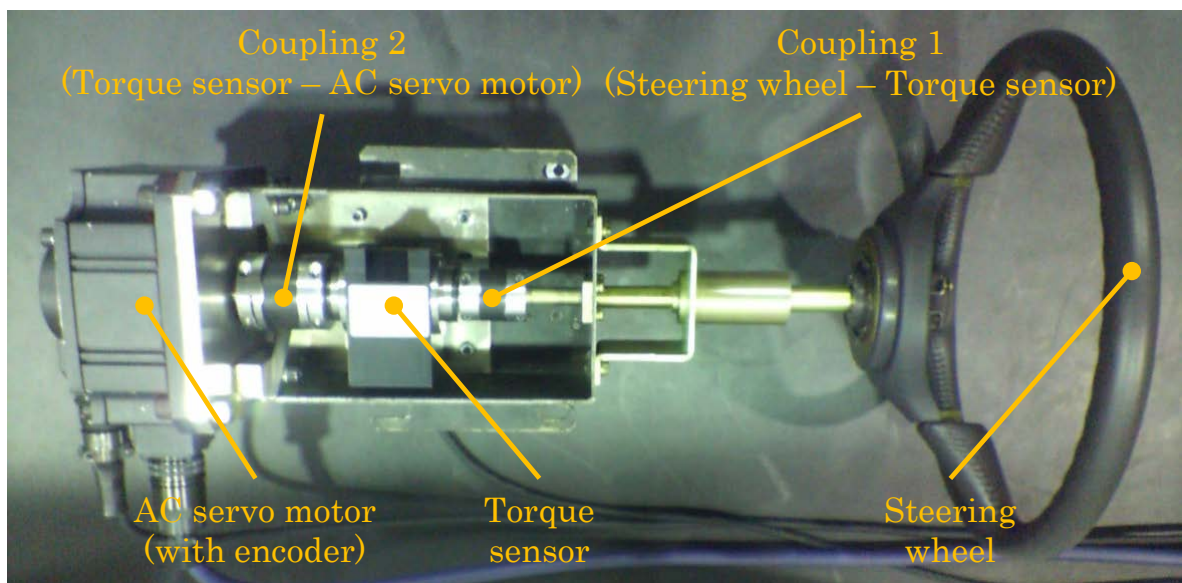


図 3.5 ステアリングシステムの実際の構成

3.2.4 その他の構成要素

【ビジュアルシステム】

図 3.6 にビジュアルシステムを示す。ビジュアルシステムは、車両モデルによって計算された車両位置 (X, Y, Z), ロール角, ピッチ角, ヨー角に応じて車両走行の

表 3.1 ステアリングシステム諸元

AC servo motor (with encoder)	Rated output	7.16 Nm
	Maximum output	21.6 Nm
	Encoder resolution (Maximum)	0.02 deg
Torque sensor	Measurement range	±20 Nm
	Measurement accuracy	0.03 Nm
Coupling 1 (Steering wheel – Torque sensor)	Regular torque	13.5 Nm
	Maximum torque	27 Nm
	Static torsion spring constant	520 Nm/rad
Coupling 2 (Torque sensor – AC servo motor)	Regular torque	35 Nm
	Maximum torque	70 Nm
	Static torsion spring constant	1500 Nm/rad

様子を表示するシステムである。映像はドライビングシミュレータに設置された3台のプロジェクタにより前方の球面スクリーンに映し出される。また、車両の後方とサイドミラーの位置にモニタが設置されており、ルームミラーから車両の後方の様子を見ることができる。

【サウンドシステム】

サウンドシステム用スピーカを図 3.7 に示す。サウンドシステムは車両の運動状態に応じてエンジン音、タイヤのスキール音、風切音等をリアルタイムに合成してスピーカで再生するシステムである。音の合成は、サンプリングを用いて車速、エンジン回転数に応じて行う。音の再生はキャビン壁とシートのヘッドレストに取り付けられている4つのスピーカによって再生される。



図 3.6 ビジュアルシステム



図 3.7 サウンドシステム

3.3 実験概要

3.3.1 実験場面

実験場面を図 3.8 に示す．また実際の前方向像を図 3.9 に示す．実験場面は 2 車線の直線コースを用いた．自車両前方に並べられたカラーコーンによってコースを規定した，シングルレーンチェンジのコースとなっている．実際の車線変更場面において，ドライバはステアリングによる操舵行動に加え，ブレーキ操作，あるいはアクセルペダル操作，ウインカー操作，後方確認等を組み合わせることにより車線変更を行うが，本研究ではドライバの操舵行動のみに注目するため，ブレーキ操作，アクセルペダル操作(スピードコントロールは，60km/h 一定の自動走行を組み込む)，ウインカー操作，後方確認等は不要とした．

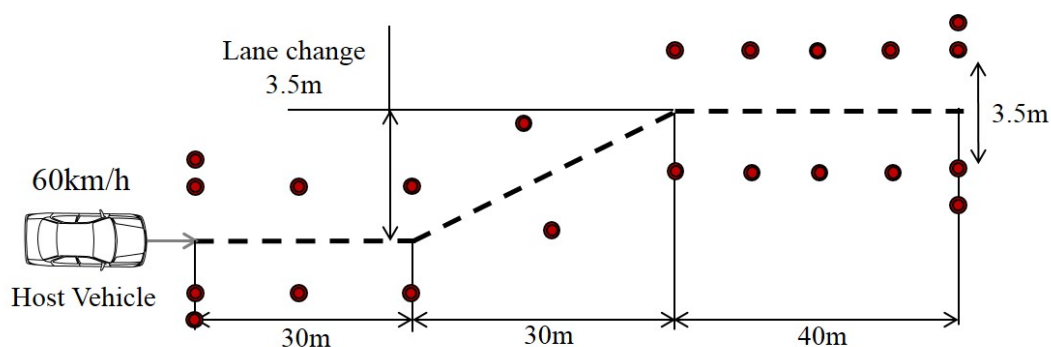


図 3.8 シングルレーンチェンジ・コース図



図 3.9 実際の前方向像

3.3.2 実験条件・手順

実験は、以下の条件および手順で行う。なお、本実験の実施については、東京農工大学研究倫理委員会の承認を得ている。また、トヨタ自動車株式会社内規「人を対象とする研究倫理ガイドライン運営要領」に従い、倫理審査を受け事前の承認を得て実施された。さらに、被験者からは、インフォームドコンセントを得て実験を行った。具体的には研究の内容、想定される危険性、個人情報管理方法および参加の同意を撤回する権利があることなどを事前に説明し、同意を得た。

実験参加者は、20代の若年被験者10名(平均年齢23歳)と、現在も自動車の運転を行っている健康な高齢者8名(平均年齢68歳)である。若年および高齢被験者の情報は表4.3(a), (b)に示す通りである。事前にシナリオと、規範ドライバモデルによる操舵反力制御があることを説明した。また、操舵反力制御のみ(いわゆる手放し運転)ではレーンチェンジを達成できないため、操舵反力制御を適切に利用したうえで、主体的に運転するように指示した。演算周期は0.01sである。以上の構成を、非制御(Without control)、操舵反力制御(Steering control)、操舵反力制御+DYC(Steering control+DYC)の3条件でランダムに行った(表3.2)。ただし、制御条件は伝えないものとした。操舵反力制御部における操舵支援トルクゲインの決定について述べる。本実験における反力制御トルクゲイン $K_a=4$ Nm/radは試行錯誤的に決定したものである。予備実験において $K_a=10$ Nm/radでは誘導が強すぎ、主値的な運転ができないという意見があった。一方、 $K_a=4$ Nm/radは反力制御トルクを得ながら、同時に主導的にステアリングを操作できるものである。ただし、 $K_a=4$ Nm/radは手放し運転では完全自動運転を実現することはできないため、ドライバの入力が必須である。次にDYC制御部のDYCゲインの決定方法について述べる。実際のDYCアクチュエータの実能力を考えると、 $M_{DYC}=\pm 1000$ Nm程度が最大のDYC入力である。これを踏まえてシミュレーションで予備検証を行い、DYCゲインは $K_{mz}=40000$ Nm/radを選定した。

表 3.2 実験条件

<i>Type</i>	<i>Control torque gain K_a</i> [Nm/rad]	<i>DYC gain K_{mz}</i> [Nm/rad]
Without control	0	0
Steering control	4	0
Steering control+DYC	4	4×10^4

表 3.3 被験者一覧

(a) 若年ドライバ

<i>Subject ID</i>	<i>Age</i>	<i>Sex</i>	<i>Possession term</i> <i>of driver license</i> [year]	<i>Driving</i> <i>frequency</i> [days per a month]	<i>Experiment</i> <i>day</i>
S1	23	Male	4	3000	2015/11/18
S2	23	Male	2	200	2015/11/18
S3	22	Male	3	4000	2015/11/18
S4	23	Male	3	100	2015/11/18
S5	22	Male	3	1500	2015/11/18
S6	22	Male	3	10	2015/11/18
S7	24	Male	5	500	2016/01/07
S8	23	Male	5	500	2016/01/07
S9	23	Male	5	3000	2016/01/07
S10	22	Male	3	1000	2016/01/07

(b) 高齢ドライバー

<i>Subject ID</i>	<i>Age</i>	<i>Sex</i>	<i>Possession term of driver license [year]</i>	<i>Driving frequency [days per a month]</i>	<i>Experiment day</i>
O1	71	Male	12	4000	2015/07/13
O2	70	Male	48	200	2015/07/15
O3	66	Female	36	400	2015/07/13
O4	67	Female	30	3000	2015/07/13
O5	66	Female	47	1500	2015/07/14
O6	66	Male	47	40000	2015/07/14
O7	66	Male	50	6000-7000	2015/07/14
O8	68	Female	34	1500	2015/07/15

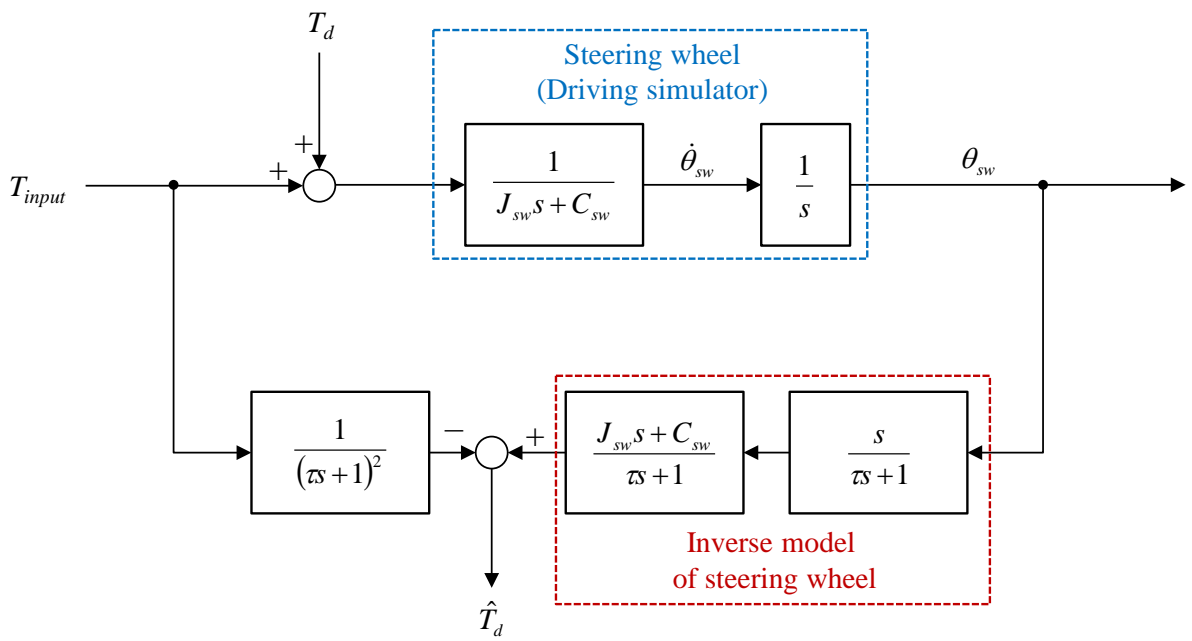
3.3.3 ドライバの操舵トルクの推定方法

本節以降で示す実験結果のうち、ドライバーの操舵トルクは図 3.10 に示す外乱オブザーバを用いた推定値である。

図 3.10 に示す外乱オブザーバをそのまま使用すると逆モデルに操舵角の微分が必要となり外乱の影響を受けやすい。しかし、以下の式(3.1)に示すように式を変形することで微分を使わずに表現することが可能である。

$$\frac{s}{\tau s + 1} \cdot \frac{J_{sw} s + C_{sw}}{\tau s + 1} = \frac{1}{\tau} \left(1 - \frac{1}{\tau s + 1} \right) \left\{ \frac{J_{sw}}{\tau} \left(1 - \frac{1}{\tau s + 1} \right) + \frac{C_{sw}}{\tau s + 1} \right\} \quad (3.1)$$

ただし、 τ はローパスフィルタ時定数である。



Input of servo motor: $T_{input} = -T_r + T_a$ Time constant of low pass filter: $\tau = 0.05$ s

図 3.10 外乱オブザーバブロック線図

3.4 実験結果

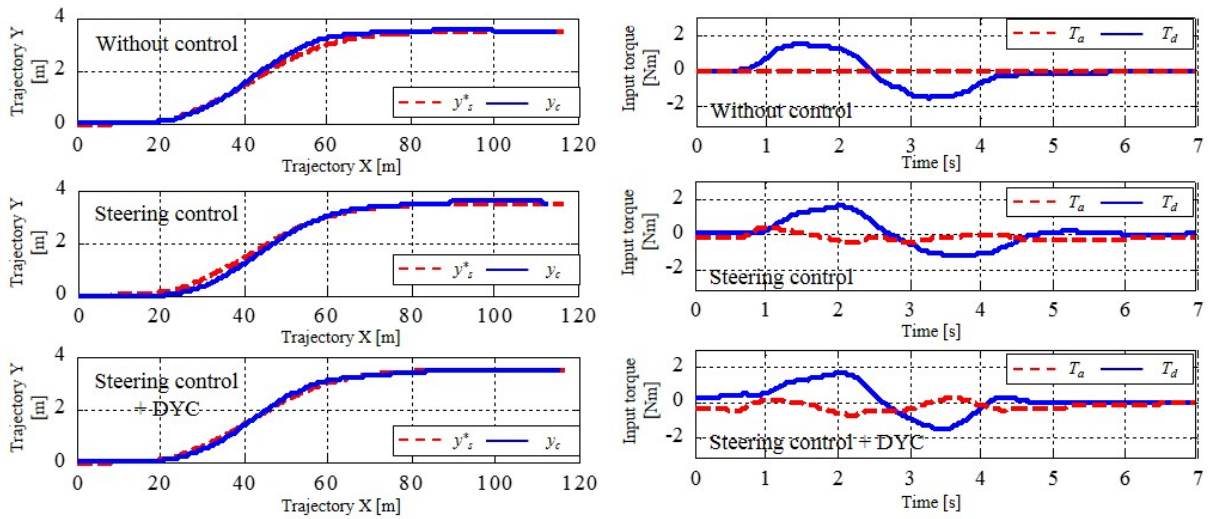
3.4.1 若年ドライバの実験結果

若年層の各被験者（被験者 S1～S10）の実験結果のうち，車両軌跡，支援トルク，ステアリング舵角，セルフアライニングトルク，横加速度，DYC 入力を図 3.11(a), (b), (c), (d), (e), (f)から図 3.20(a), (b), (c), (d), (e), (f)に示す。

ここでは，一例として被験者 S5 の時刻歴応答の結果を確認する(図 3.15)。はじめに (c)のステアリング舵角に注目する。非制御の場合，時刻 1s から 2s における操舵の初期の切り増しは，その増加が緩やかである。そのため，ステアリング操作が全体的に遅れている。その操作遅れを補うためか，後半の負側のステアリング操作は大きくなってしまっている。一方，操舵反力制御または操舵反力制御+DYC の場合は，初期の切り増しがしっかりと行われ，その結果，後半の負側のステアリング操作は滑らかでかつその絶対値も小さく変容している。この効果により，(a)の車両軌跡は，**Without control** の場合では 30m 付近のレーンチェンジ遅れや，60m 付近のオーバーシュートが確認できるが，制御介入によってそれらは大幅に低減されている。

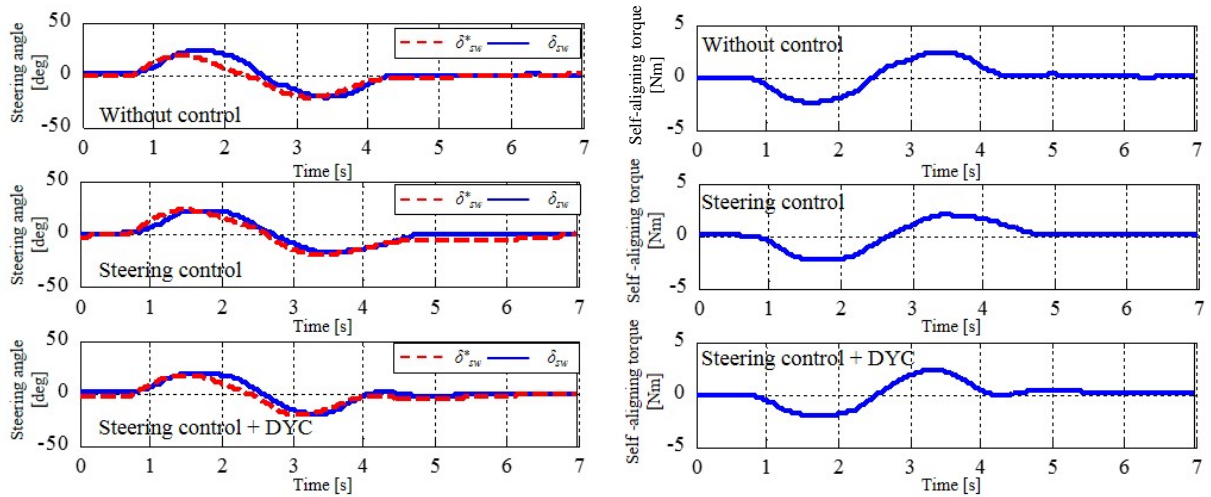
上記の変容は，操舵反力制御部で演算される反力制御トルクに由来すると考えられる。(b)のステアリングトルクに示されるとおり，操舵反力制御または操舵反力制御+DYC の条件では，0.6s あたりに反力制御トルクが負の方向にわずかに発生している。ドライバはこのわずかに発生する負のトルクを頼りに，制御システムが教示する操舵開始のタイミングを得ていると考えられる（複数の被験者から，上述のような感覚があることをコメントとして得ている）。操舵を開始するタイミングが制御システムの教示に近づくことで，ステアリングまわりのトルクのつり合い結果であるステアリング舵角は規範ステアリング舵角に近づいたと考えられる。

操舵反力トルクの絶対値が，後述する高齢ドライバの実験結果と比較して非常に小さいことは特筆される。このことは，被験者 S5 は，規範ドライバモデルとの運転操作の差が小さいことを意味している。このように，規範運転に近い運転操作を行えている場合はその支援量が小さくなることは，本システムの特徴の一つである。上記の結果は，その他の若年ドライバからも，同様の傾向を確認することができる。



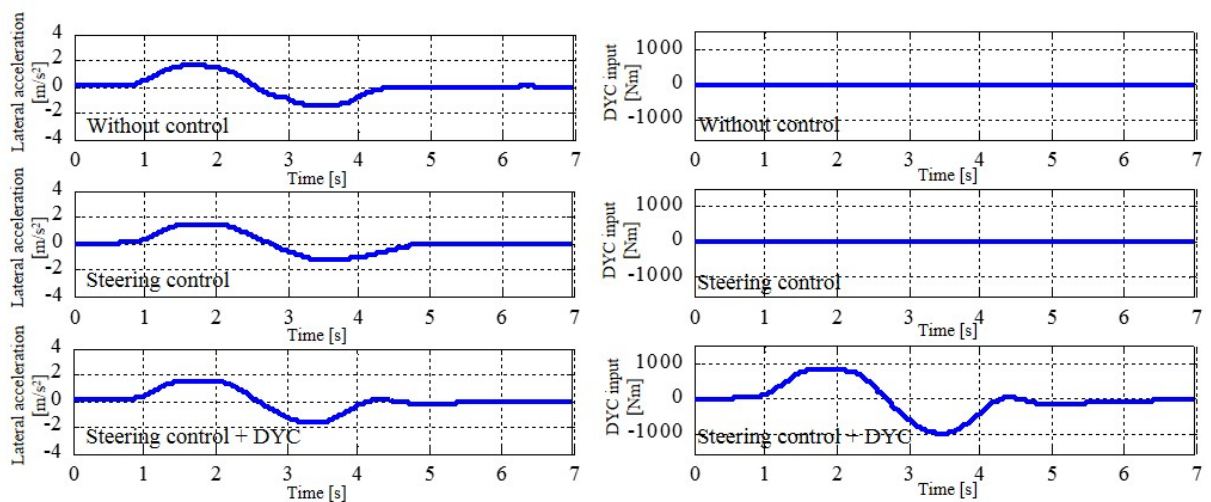
(a) The center of gravity vehicle trajectory

(b) Time history of steering torque



(c) Time history of steering angle

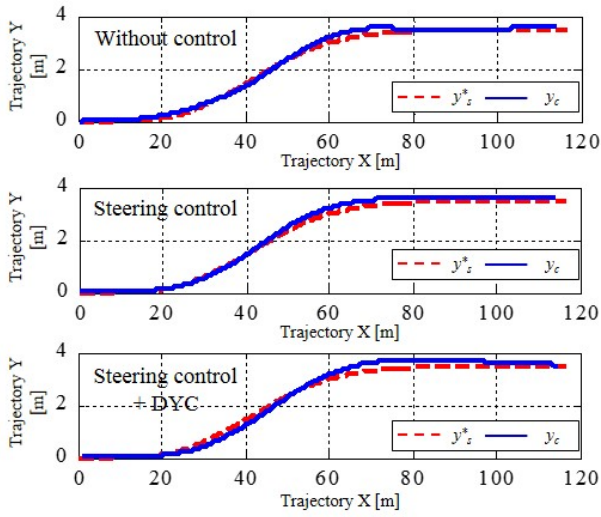
(d) Time history of self-aligning torque



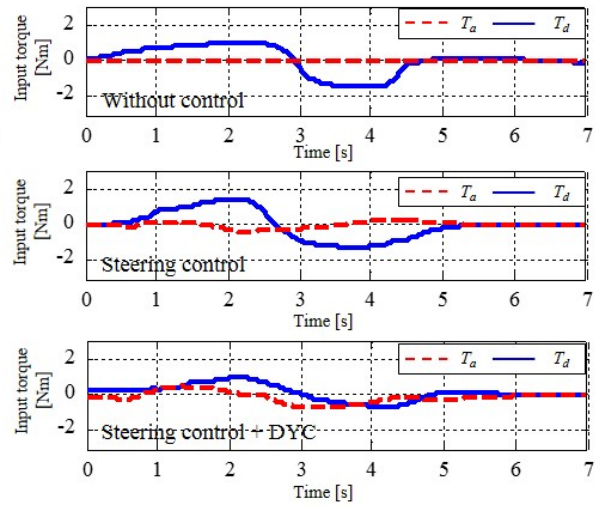
(e) Time history of lateral acceleration

(f) Time history of DYC input

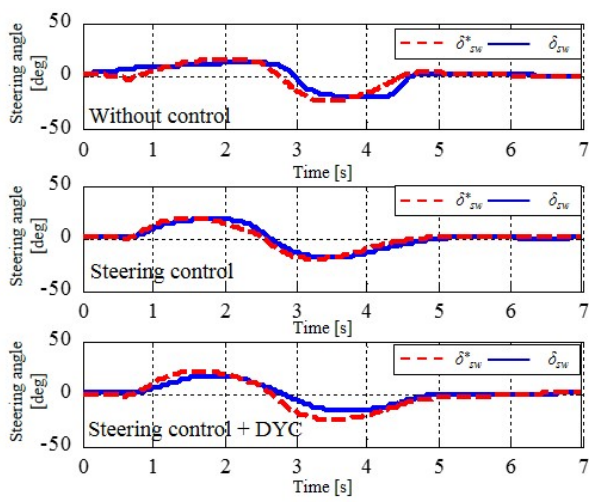
図 3.11 時刻歴応答 (若年ドライバ Subject S1)



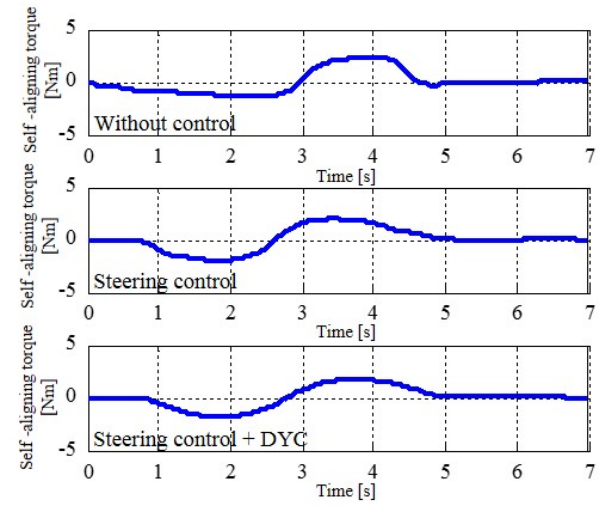
(a) The center of gravity vehicle trajectory



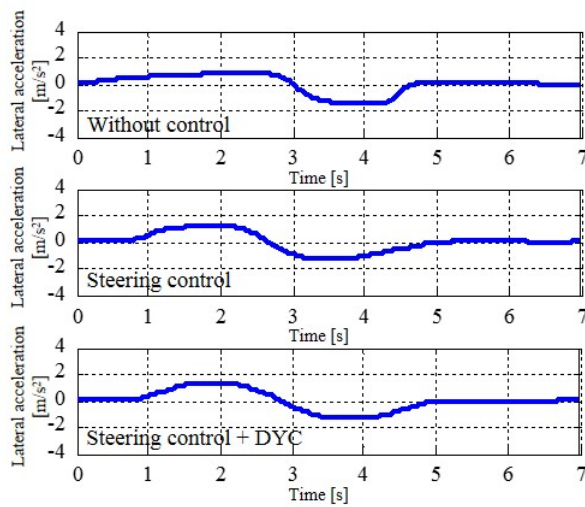
(b) Time history of steering torque



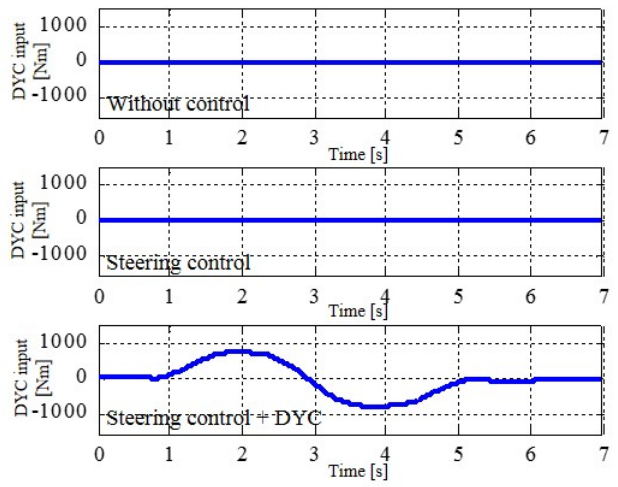
(c) Time history of steering angle



(d) Time history of self-aligning torque

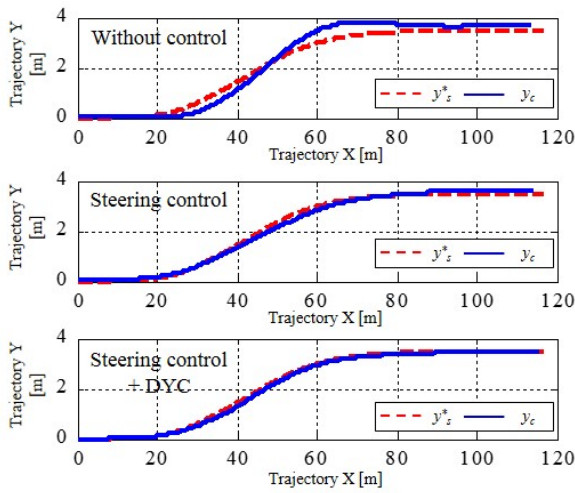


(e) Time history of lateral acceleration

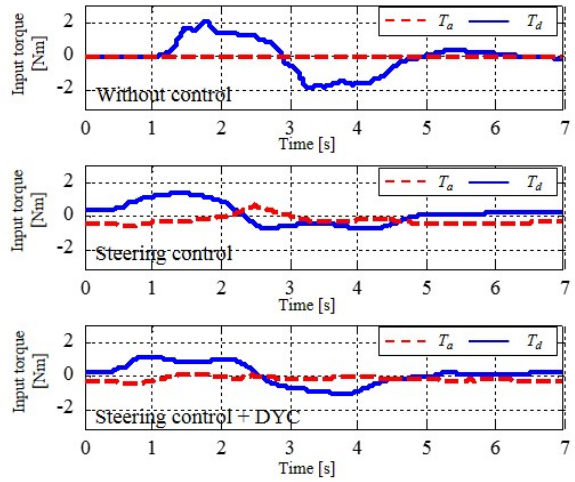


(f) Time history of DYC input

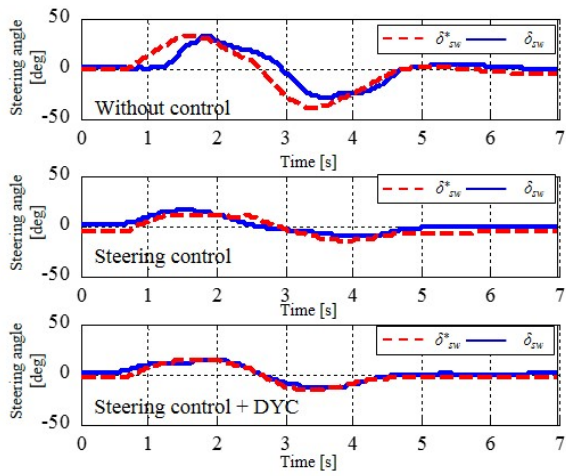
図 3.12 時刻歴応答 (若年ドライバ Subject S2)



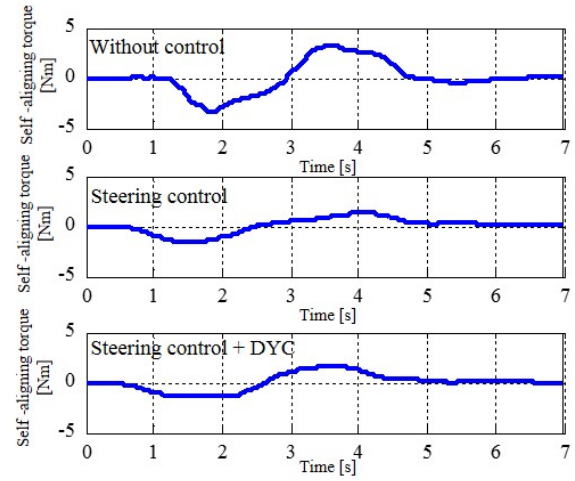
(a) The center of gravity vehicle trajectory



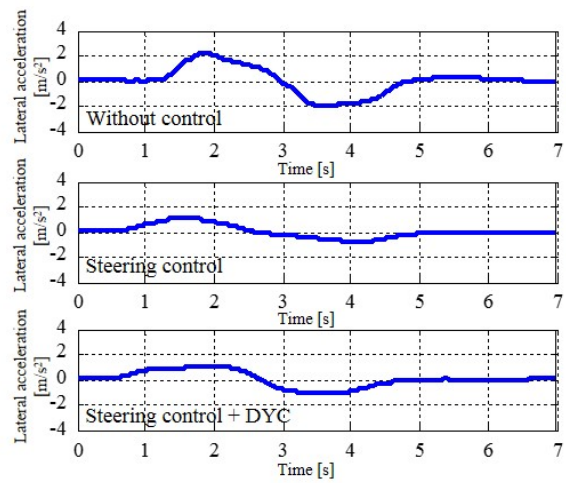
(b) Time history of steering torque



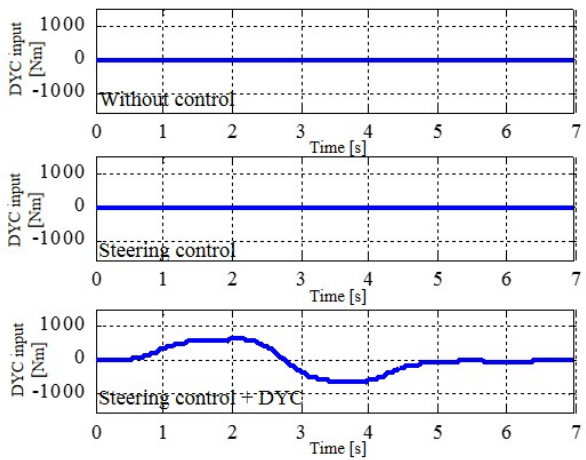
(c) Time history of steering angle



(d) Time history of self-aligning torque

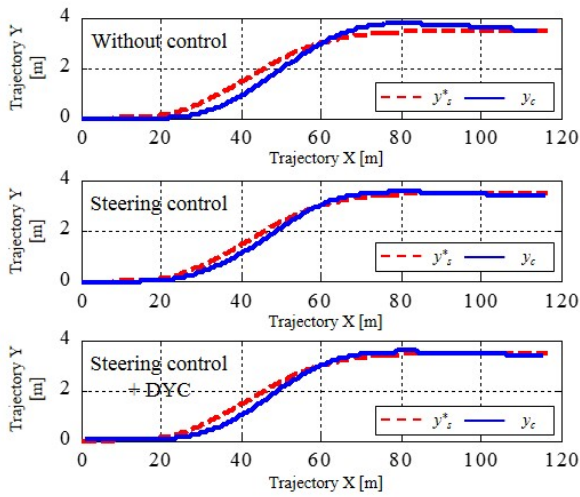


(e) Time history of lateral acceleration

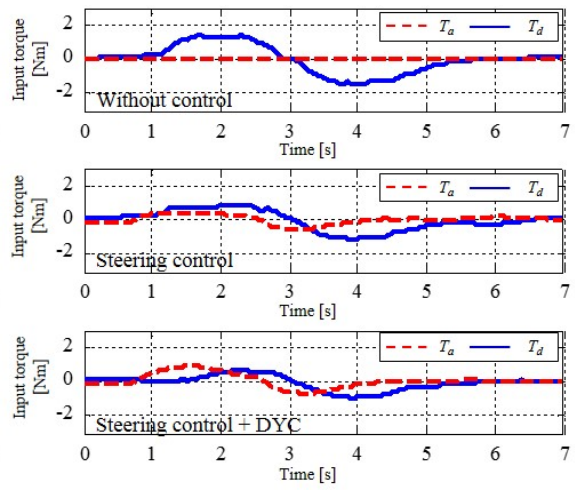


(f) Time history of DYC input

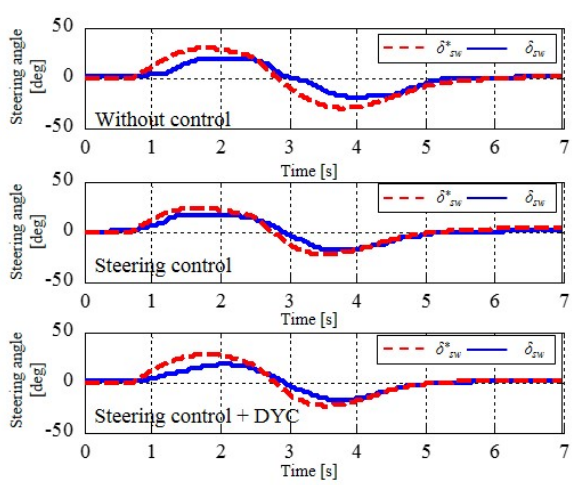
図 3.13 時刻歴応答 (若年ドライバ Subject S3)



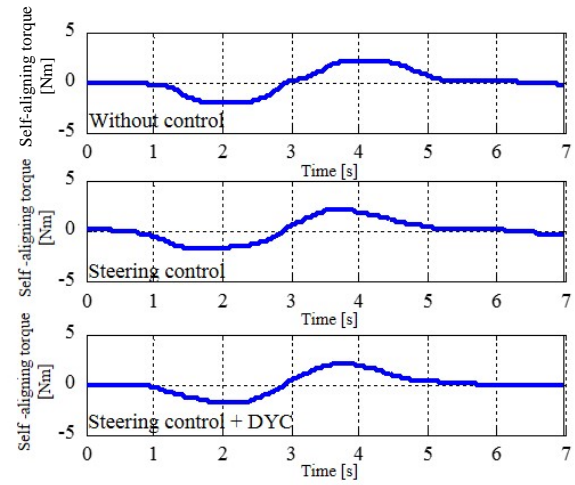
(a) The center of gravity vehicle trajectory



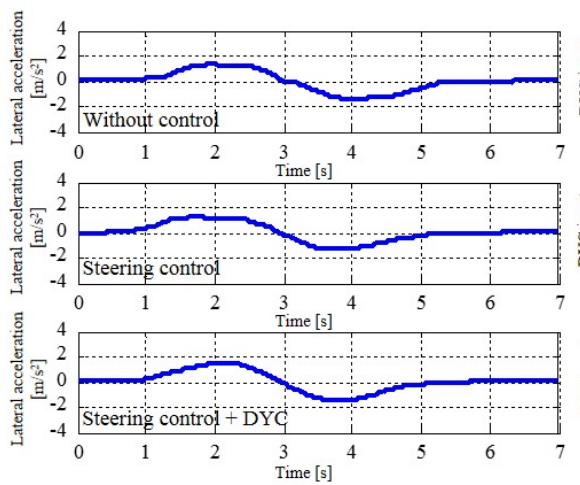
(b) Time history of steering torque



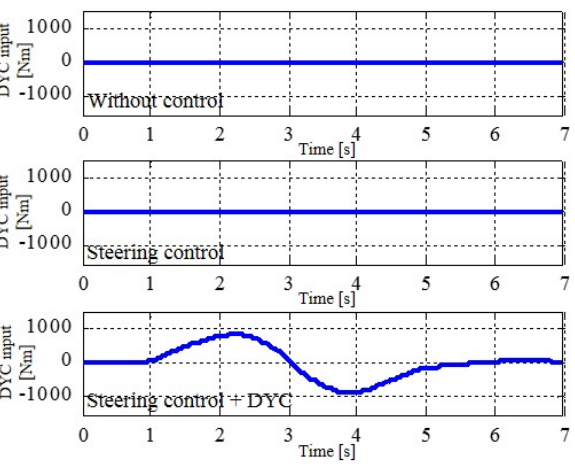
(c) Time history of steering angle



(d) Time history of self-aligning torque

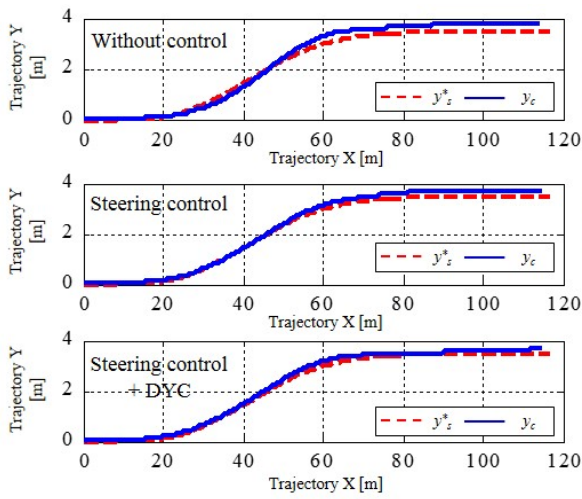


(e) Time history of lateral acceleration

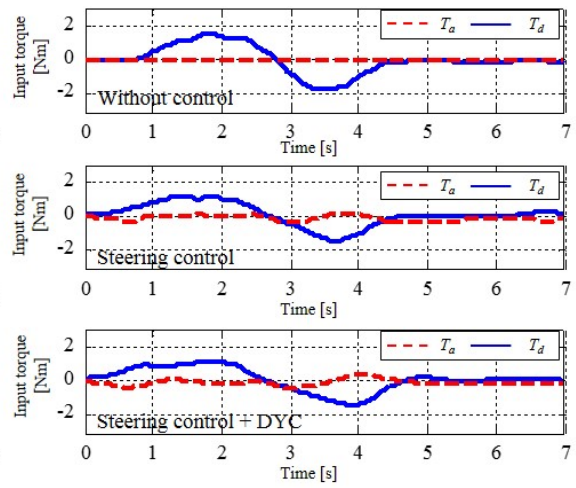


(f) Time history of DYC input

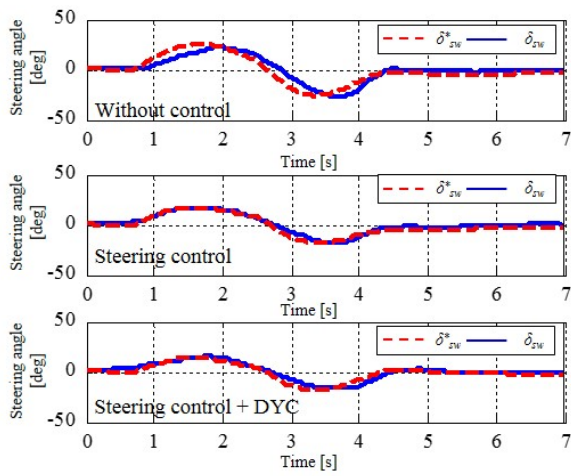
図 3.14 時刻歴応答 (若年ドライバ Subject S4)



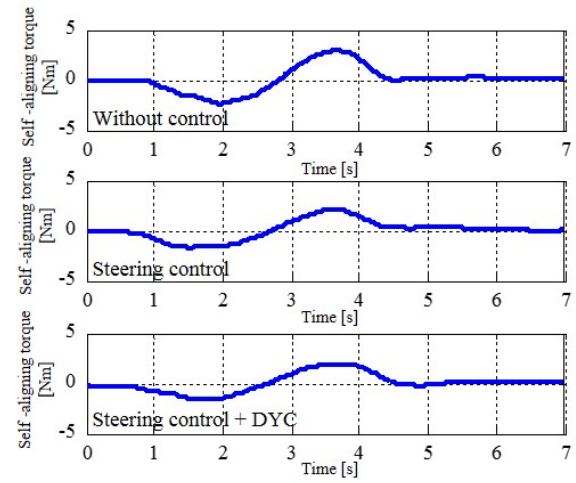
(a) The center of gravity vehicle trajectory



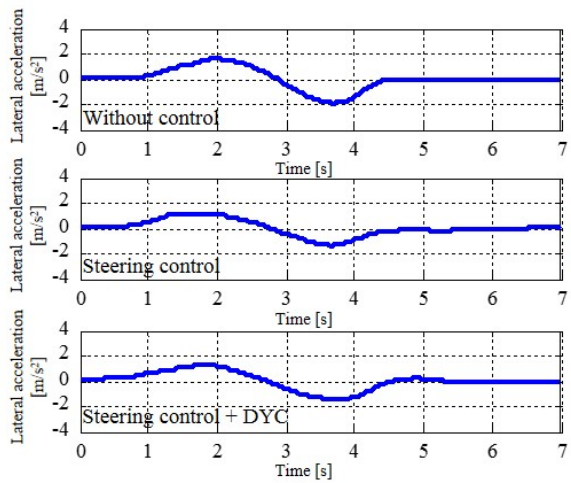
(b) Time history of steering torque



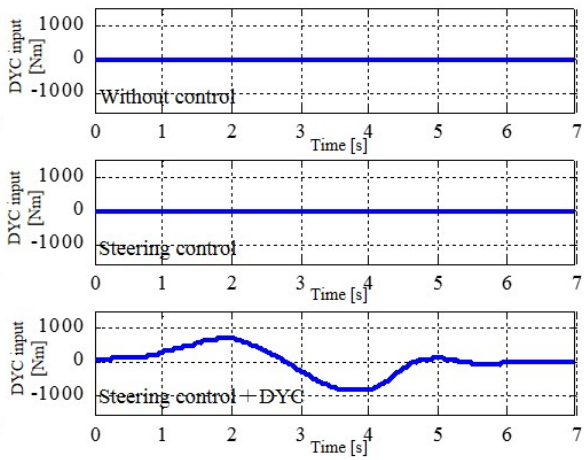
(c) Time history of steering angle



(d) Time history of self-aligning torque

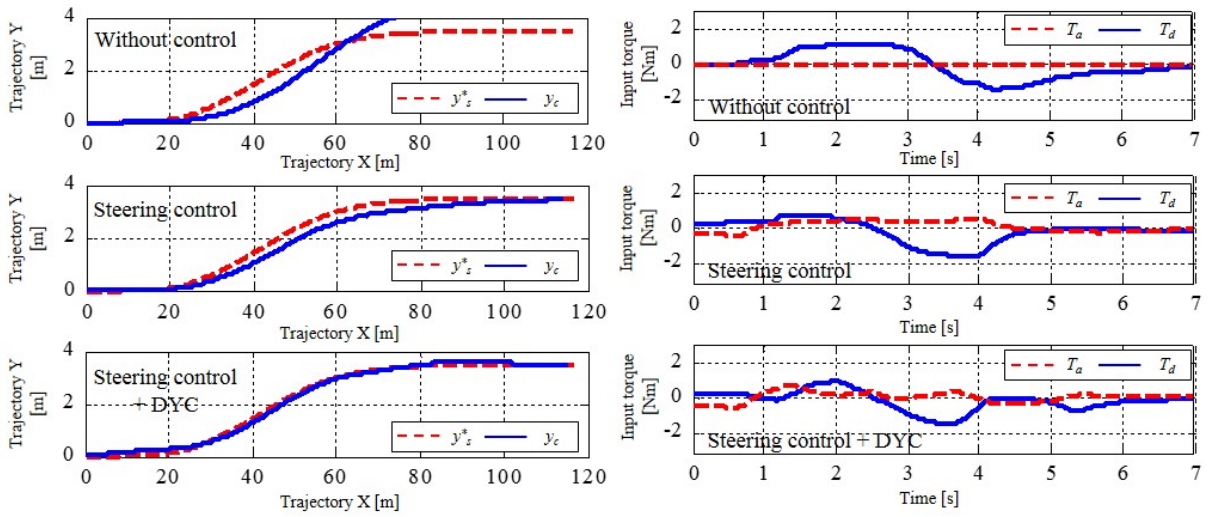


(e) Time history of lateral acceleration



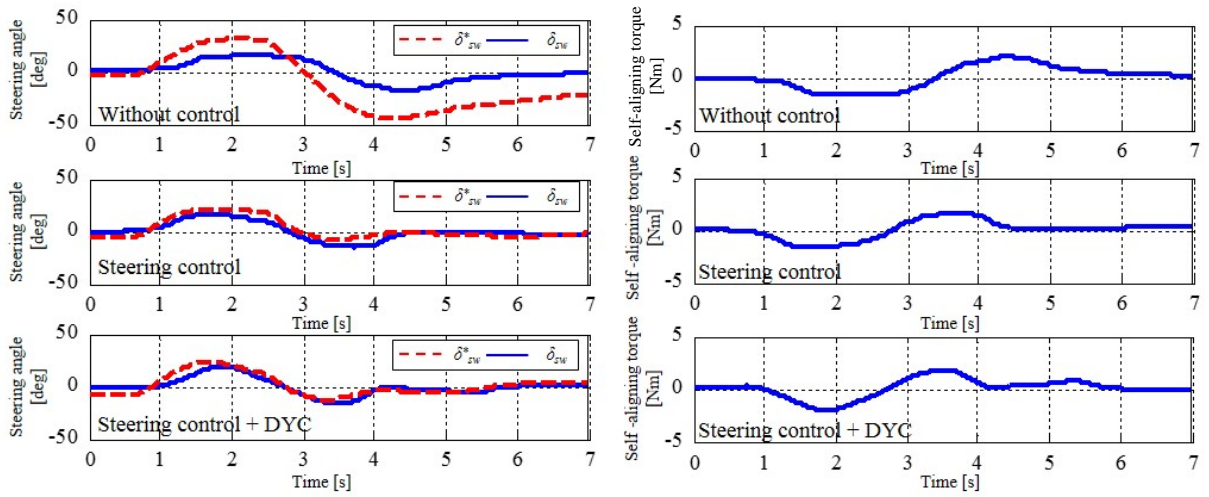
(f) Time history of DYC input

図 3.15 時刻歴応答 (若年ドライバ Subject S5)



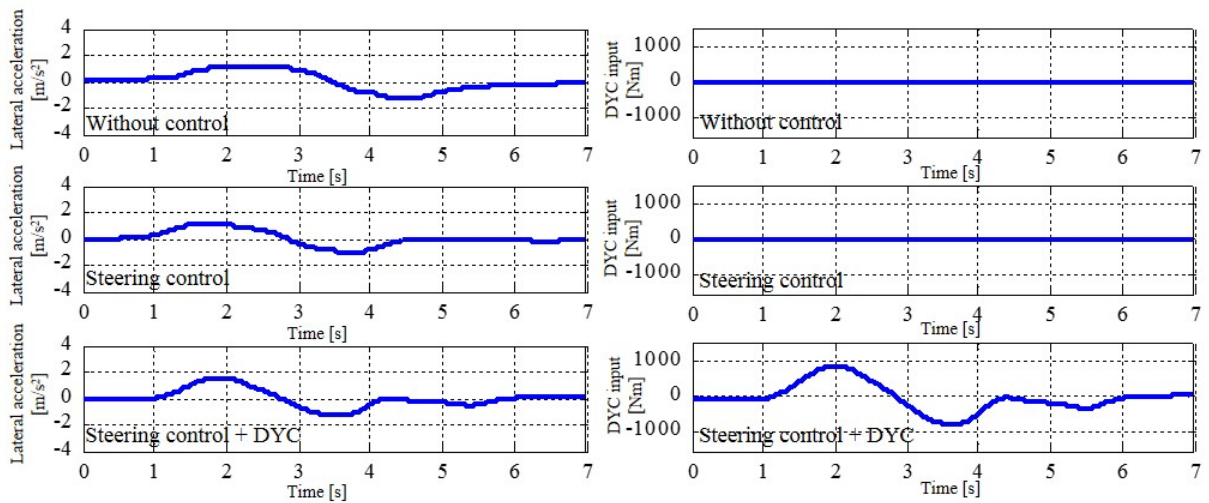
(a) The center of gravity vehicle trajectory

(b) Time history of steering torque



(c) Time history of steering angle

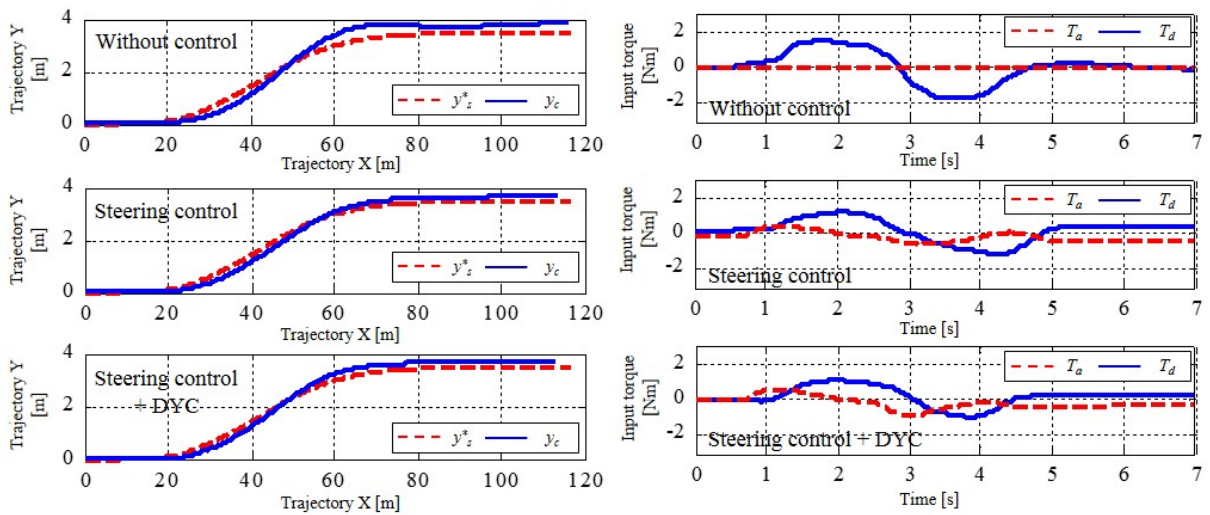
(d) Time history of self-aligning torque



(e) Time history of lateral acceleration

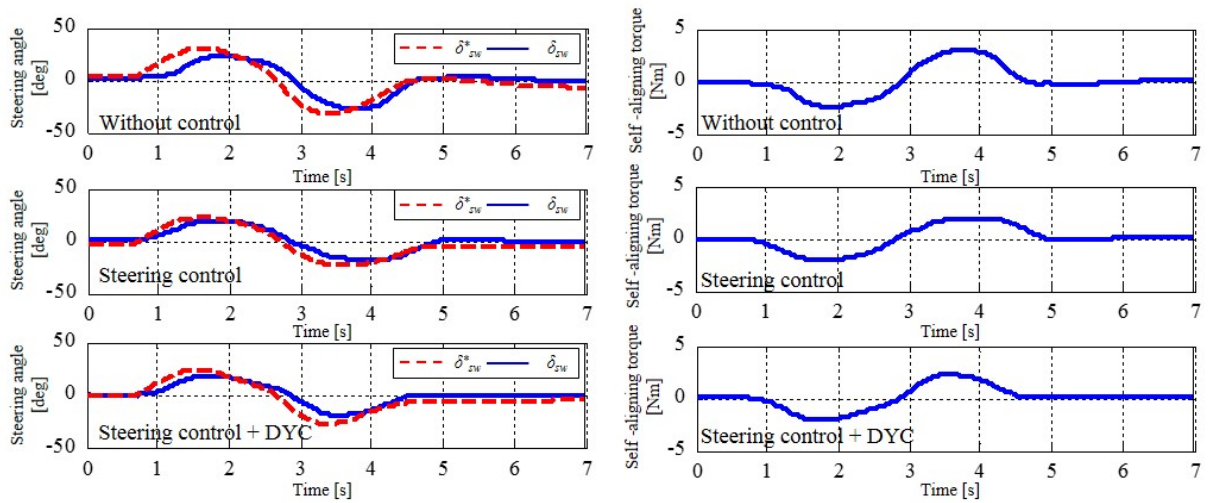
(f) Time history of DYC input

図 3.16 時刻歴応答 (若年ドライバ Subject S6)



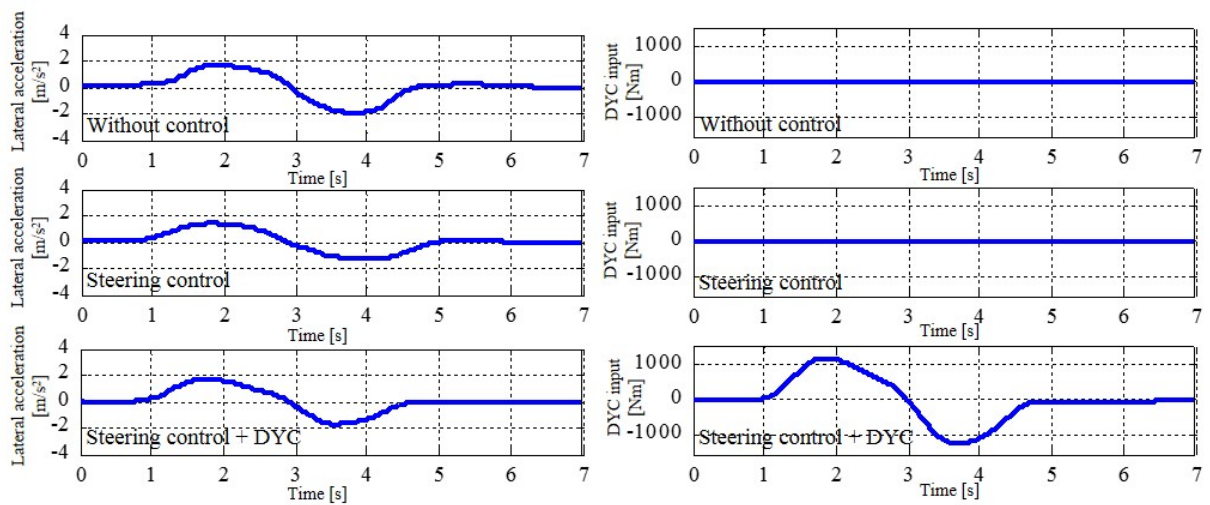
(a) The center of gravity vehicle trajectory

(b) Time history of steering torque



(c) Time history of steering angle

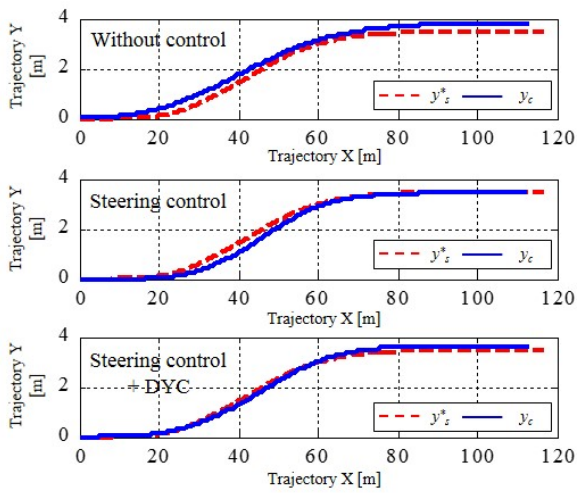
(d) Time history of self-aligning torque



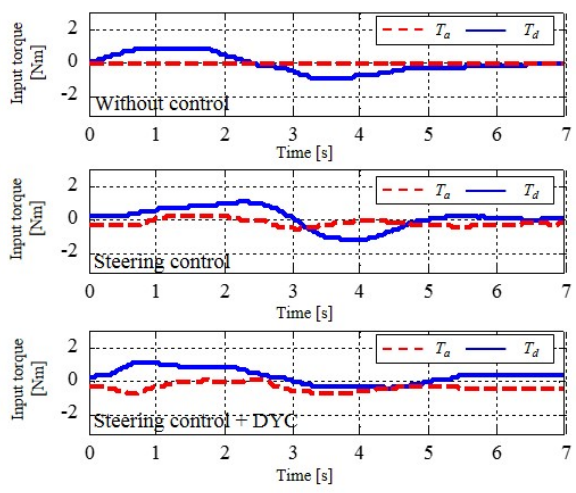
(e) Time history of lateral acceleration

(f) Time history of DYC input

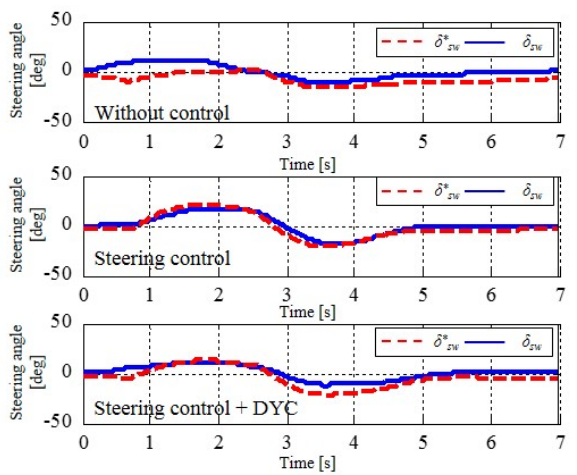
図 3.17 時刻歴応答 (若年ドライバ Subject S7)



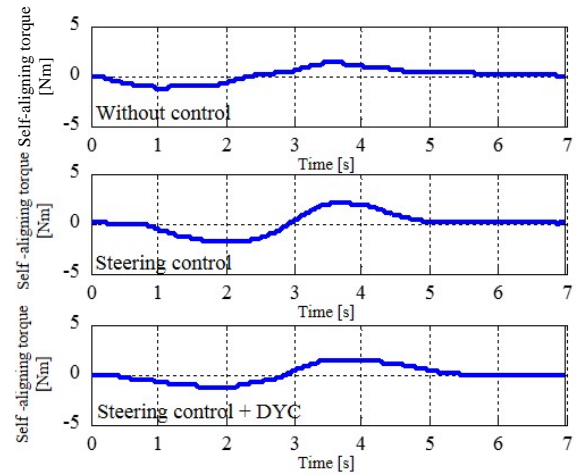
(a) The center of gravity vehicle trajectory



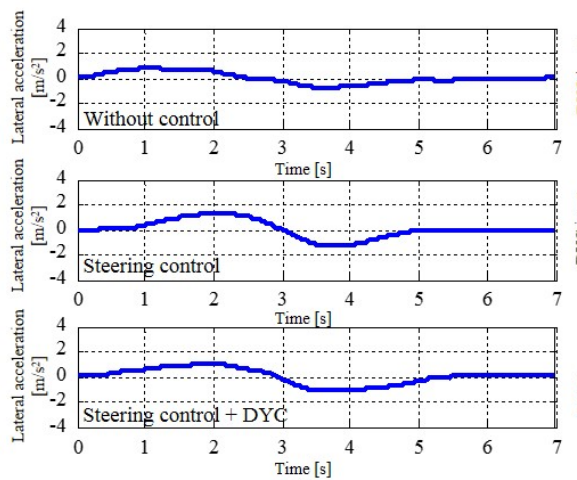
(b) Time history of steering torque



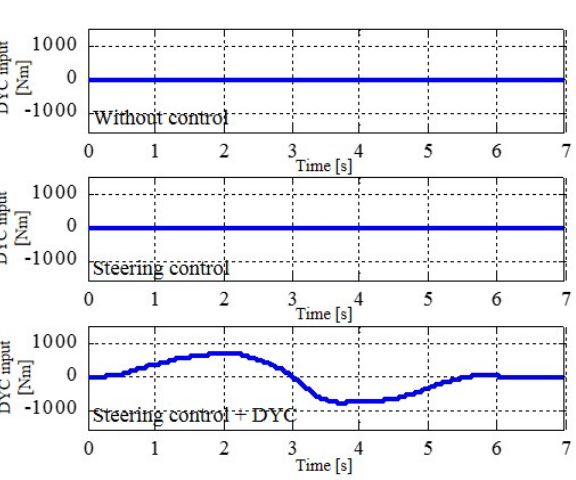
(c) Time history of steering angle



(d) Time history of self-aligning torque

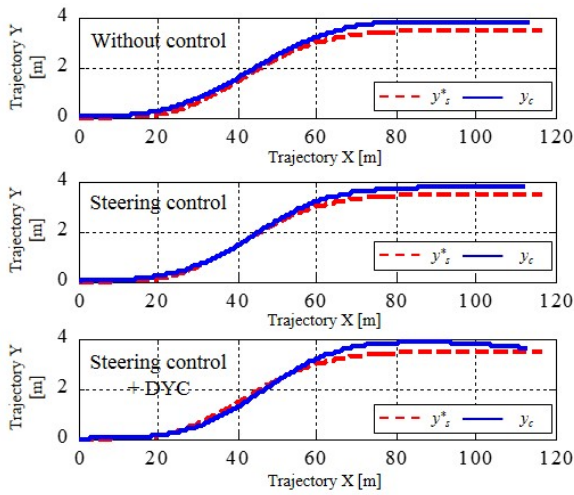


(e) Time history of lateral acceleration

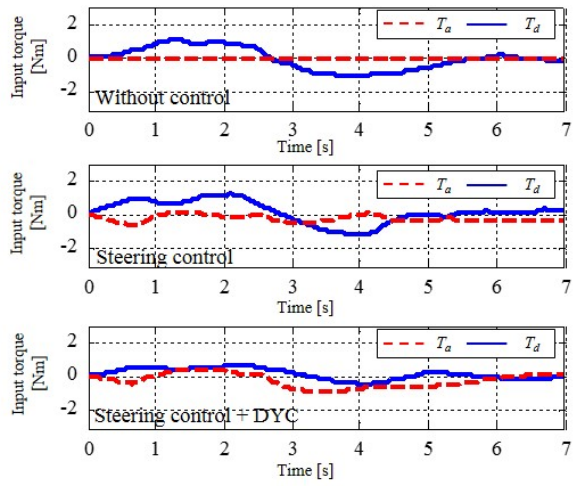


(f) Time history of DYC input

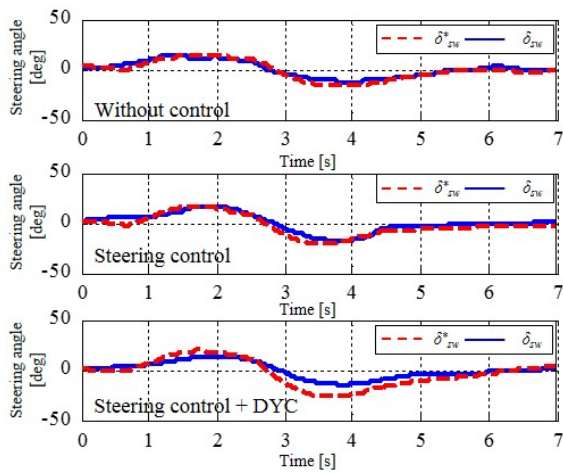
図 3.18 時刻歴応答 (若年ドライバ Subject S8)



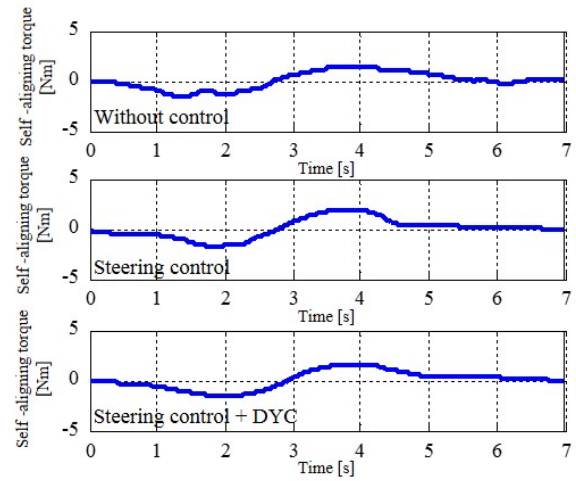
(a) The center of gravity vehicle trajectory



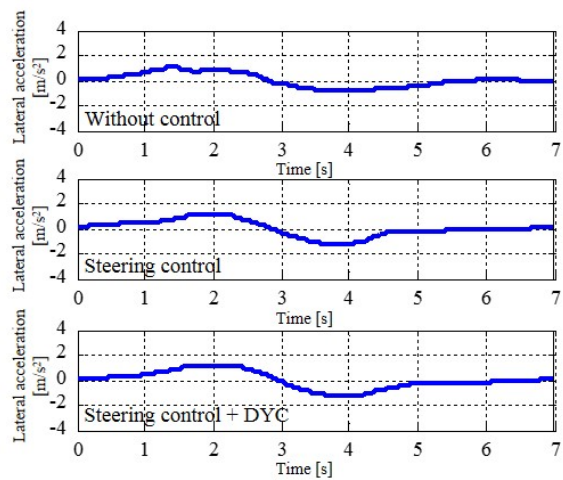
(b) Time history of steering torque



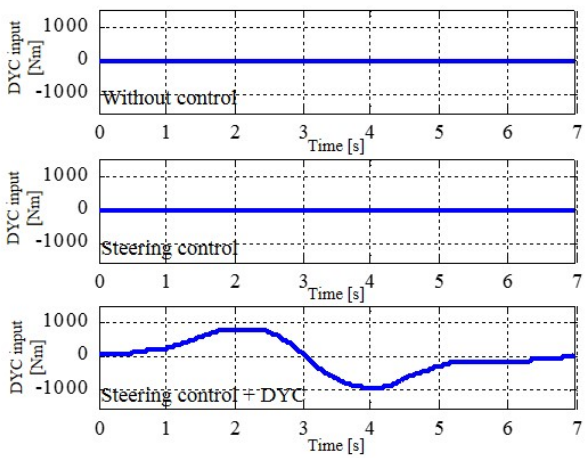
(c) Time history of steering angle



(d) Time history of self-aligning torque

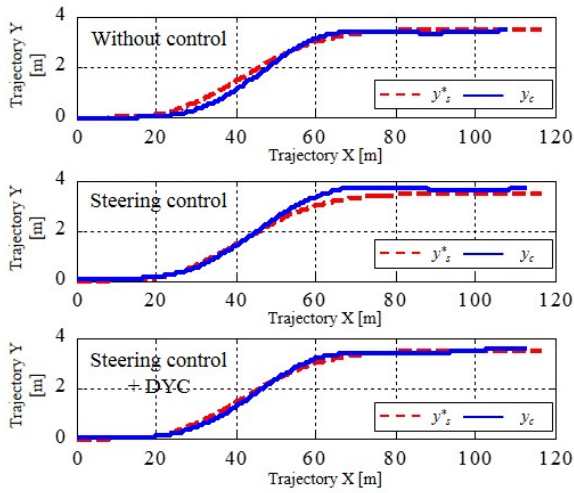


(e) Time history of lateral acceleration

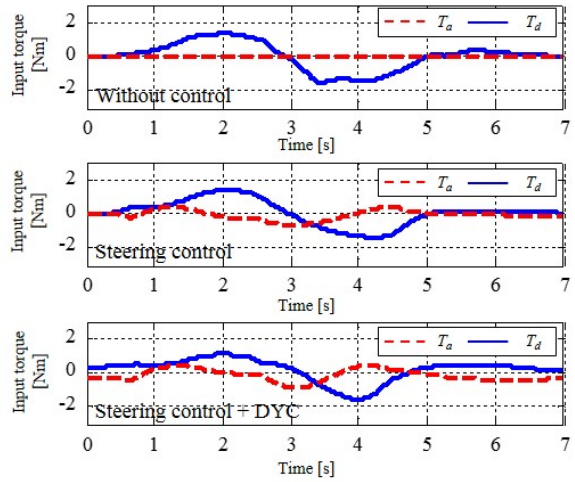


(f) Time history of DYC input

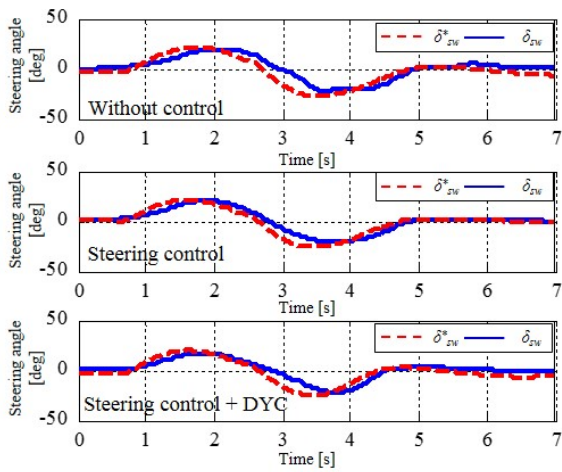
図 3.19 時刻歴応答 (若年ドライバ Subject S9)



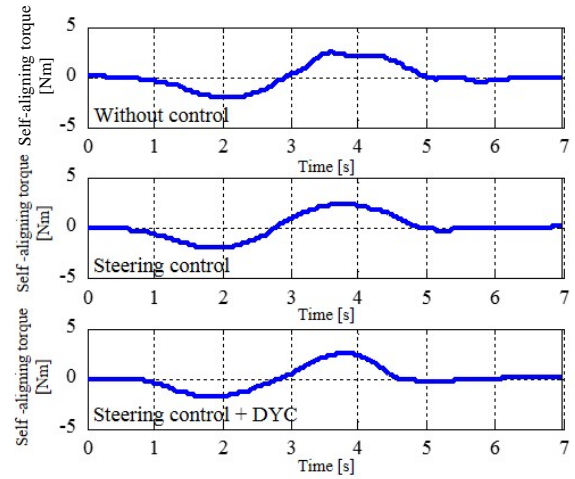
(a) The center of gravity vehicle trajectory



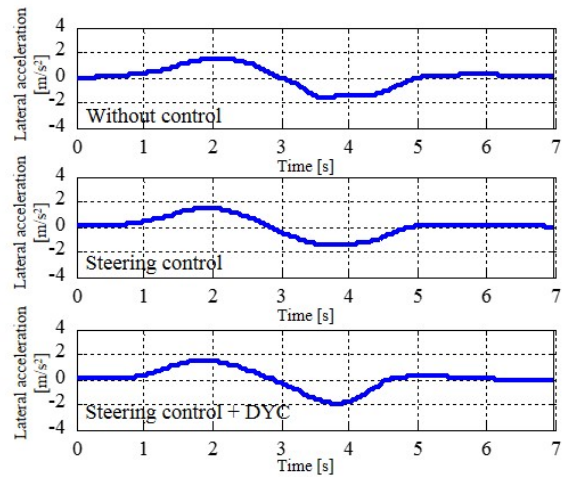
(b) Time history of steering torque



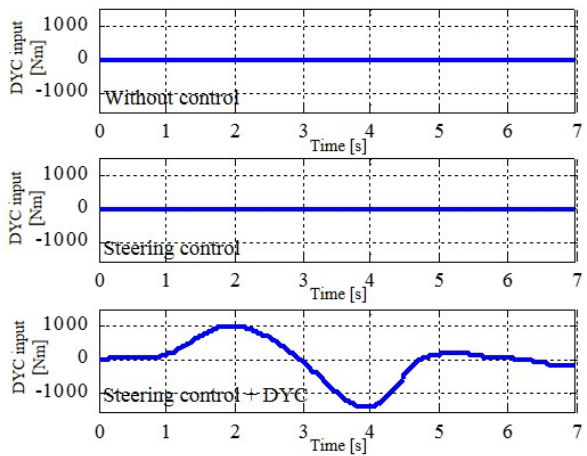
(c) Time history of steering angle



(d) Time history of self-aligning torque



(e) Time history of lateral acceleration



(f) Time history of DYC input

図 3.20 時刻歴応答 (若年ドライバ Subject S10)

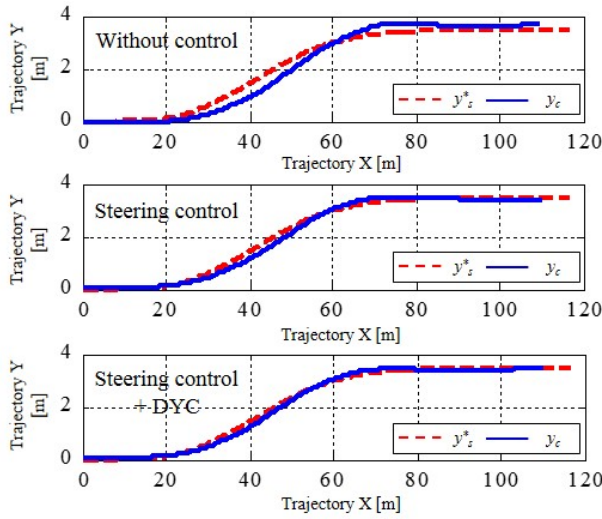
3.4.2 高齢ドライバの実験結果

高齢者の各被験者（被験者 O1～O8）の実験結果のうち，車両軌跡，支援トルク，操舵角，セルフライニングトルク，横加速度，DYC 入力を図 3.21(a), (b), (c), (d), (e), (f)から図 3.28(a), (b), (c), (d), (e), (f)に示す．なお，横軸の縦変位と時刻の関係は 0m で 0s である．

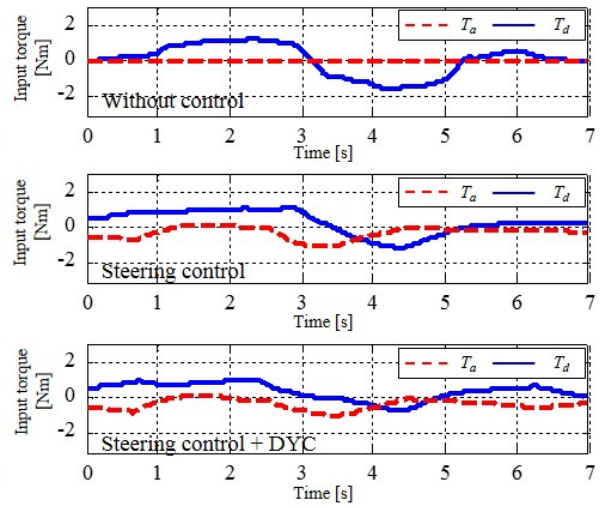
ここでは被験者 O7(図 3.27)の時刻歴応答に着目する．はじめに操舵支援の効果を確認する．(b)に示すように，非制御の場合は，1.5s あたりにステップ上の大きなトルク入力を確認できる．また 3s あたりまで僅かなふらつきが入力されている．一方で，操舵反力制御や操舵反力制御+DYC の場合は，トルク入力が滑らかに変容している．その入力の結果，ステアリング舵角(c)や車両軌跡(a)も滑らかに変容し，規範ドライバモデルの運転に近づいている．これらの傾向は，若年ドライバ被験者 S5 の時刻歴応答結果と一致しているおり，人間—機械の閉ループで滑らかな運転を実現するという提案システムの狙いが達成されている．若年ドライバの被験者 S5 との違いは，1.2s あたりに発生している負の反力制御トルクの大きさである．被験者 O7 は被験者 S5 に比べ大きな反力制御トルクが発生している．一般的に，ドライバと制御システムの運転操作に差が発生し易い位置は，その開始位置であると考えられる．その理由は，どのタイミングでレーンチェンジを開始するかは，ドライバの普段の運転のくせやその技量に大きく依存していると考えられるためである．非制御における被験者 S5 と被験者 O7 のステアリングトルクを比較すると，被験者 O7 の方が，レーンチェンジの開始タイミングが遅い．このため，操舵反力制御部は被験者 O7 の操舵開始のタイミングを早めるように，反力制御トルクを大きく発生させていると考えられる．被験者 O7 は，制御システムが教示する操舵開始のタイミングを，ステアリングというインターフェースを介して，より明示的に得ていると考えられる．

次に DYC の効果を確認する．操舵反力制御と操舵反力制御+DYC のトルク支援(b)を比較すると，DYC を組み合わせることで，1.2s 付近や 3.5s 付近にみられるドライバと反力制御トルクの相互作用は小さくなっている．また，ドライバトルクの絶対値も小さくなっており，小さな操舵入力で車線変更を行うことができていることが確認

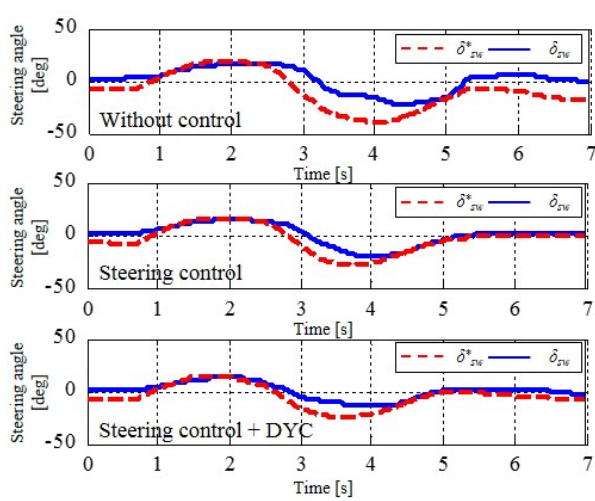
できる．この時の車両軌跡(a)を確認すると，DYC を組み合わせた場合，その軌跡結果は，規範ドライバモデルが描く規範軌跡により近づいている．以上の結果から，DYC は，ドライバと制御システムのトルクによる相互作用をより滑らかにしながら，軌跡追従性能をさらに向上させる効果があると考えられる．



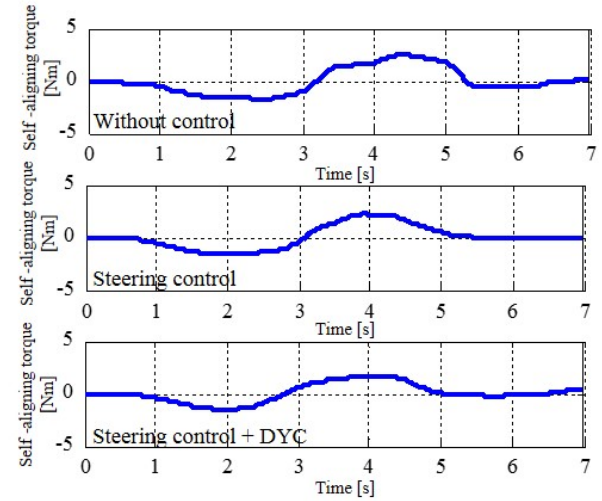
(a) The center of gravity vehicle trajectory



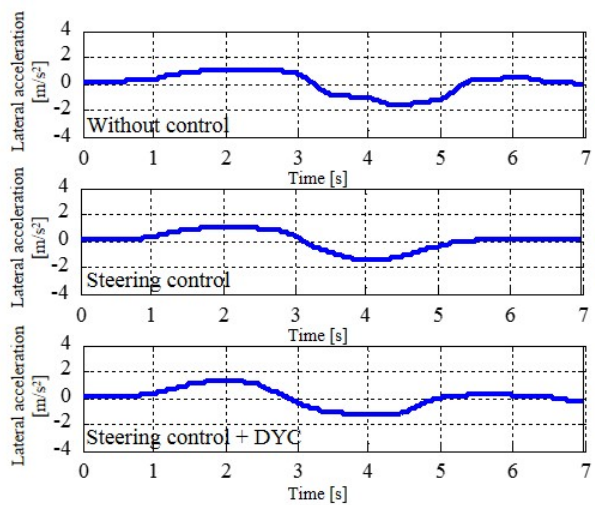
(b) Time history of steering torque



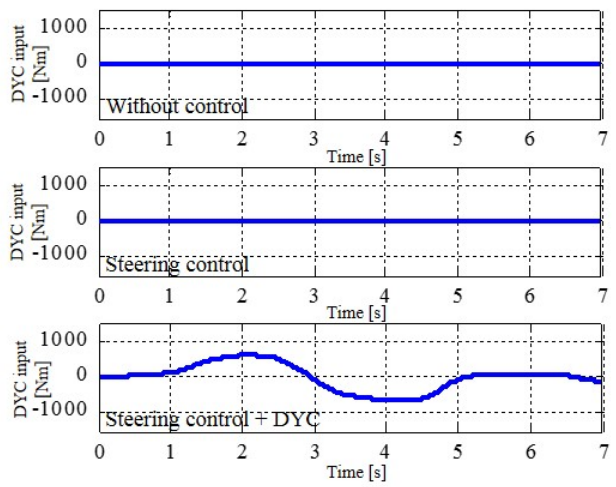
(c) Time history of steering angle



(d) Time history of self-aligning torque

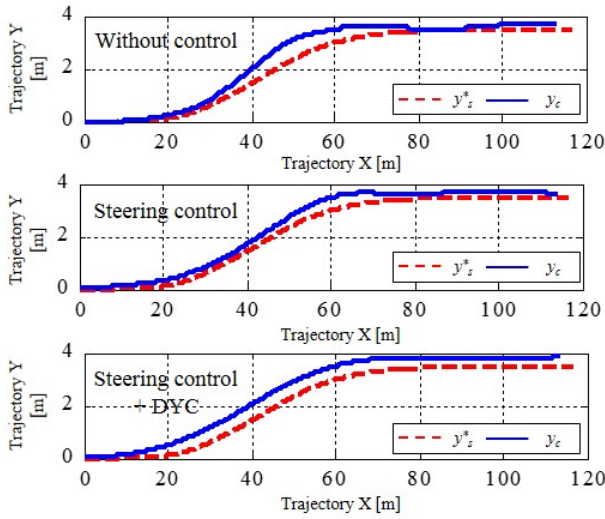


(e) Time history of lateral acceleration

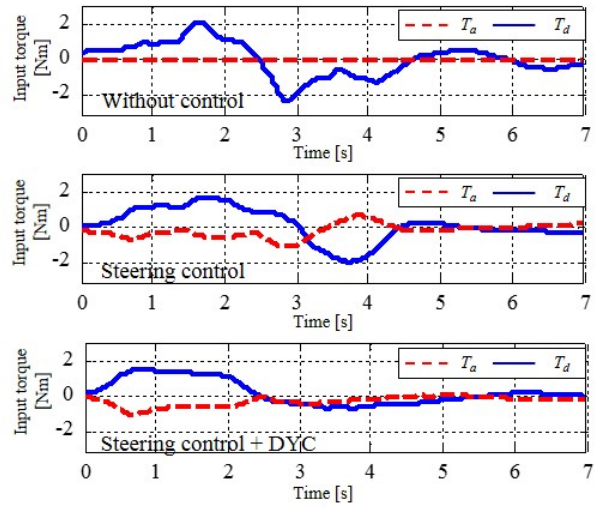


(f) Time history of DYC input

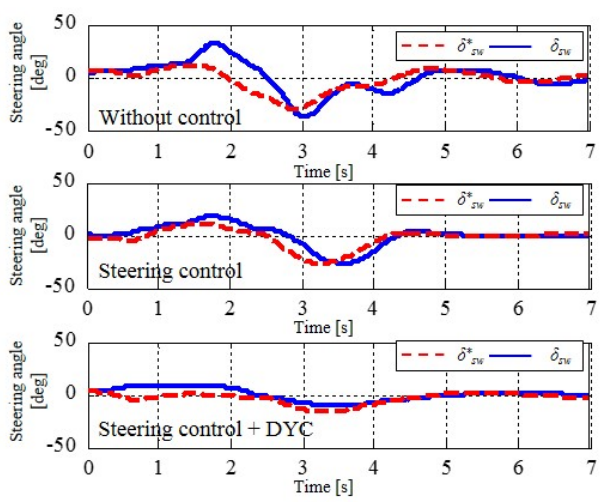
図 3.21 時刻歴応答 (高齢ドライバ Subject O1)



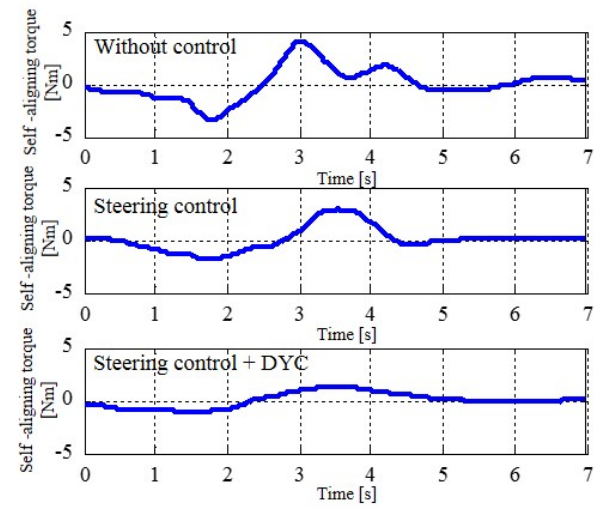
(a) The center of gravity vehicle trajectory



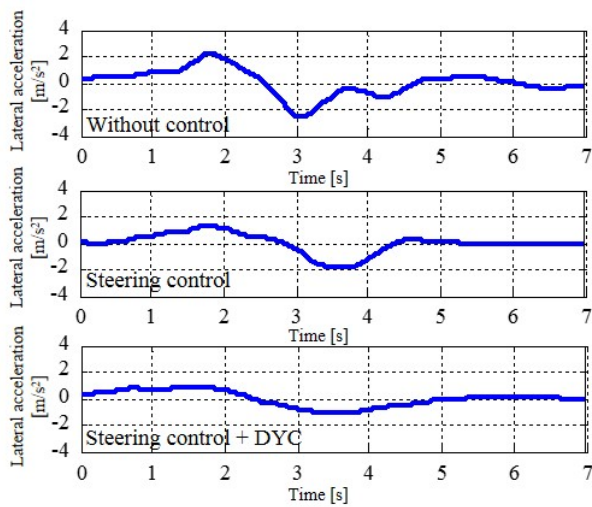
(b) Time history of steering torque



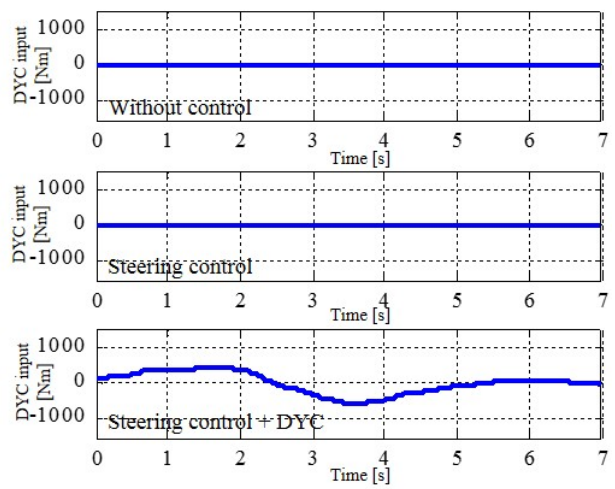
(c) Time history of steering angle



(d) Time history of self-aligning torque

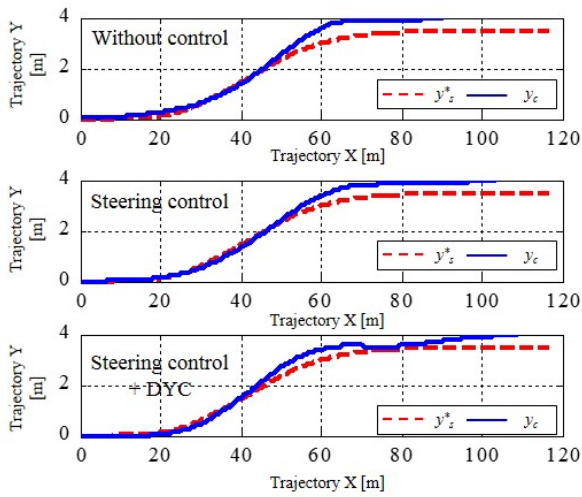


(e) Time history of lateral acceleration

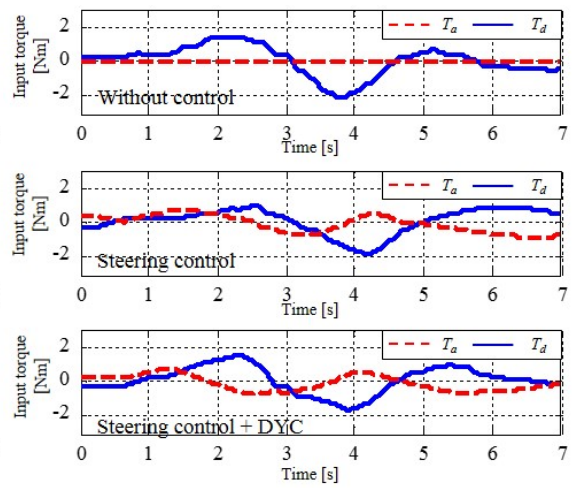


(f) Time history of DYC input

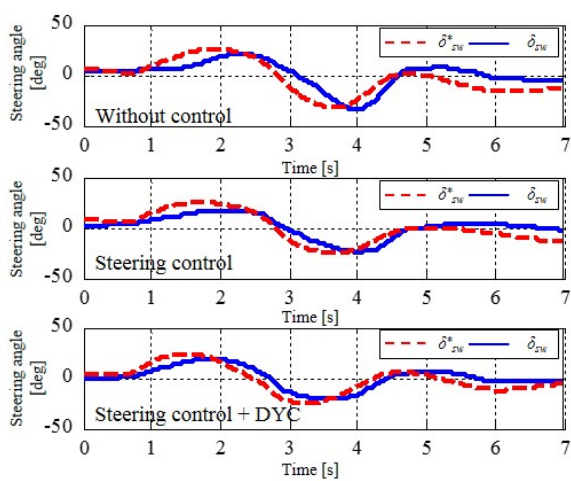
図 3.22 時刻歴応答 (高齢ドライバ Subject O2)



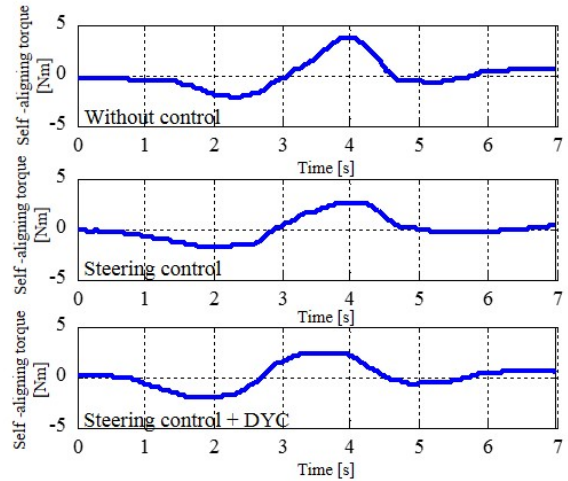
(a) The center of gravity vehicle trajectory



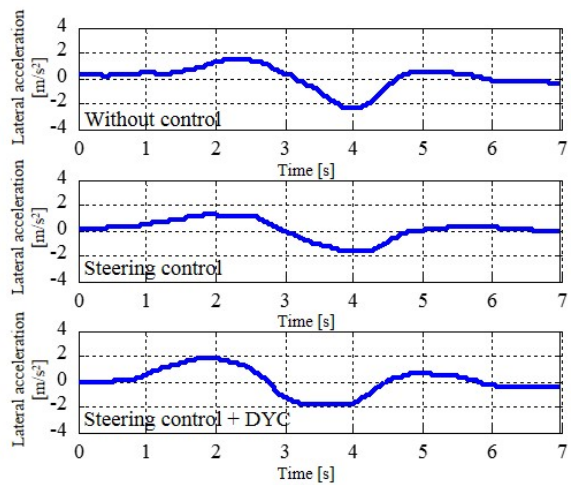
(b) Time history of steering torque



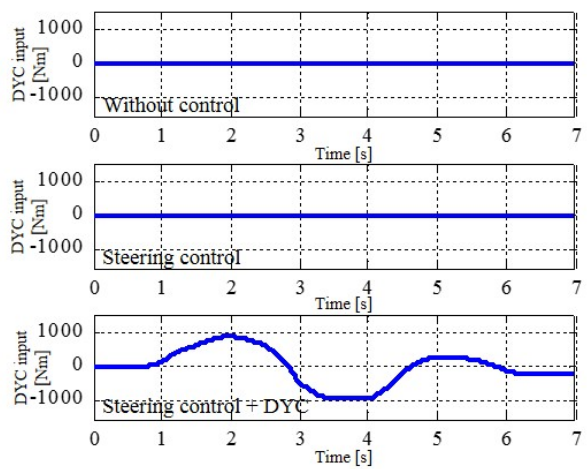
(c) Time history of steering angle



(d) Time history of self-aligning torque

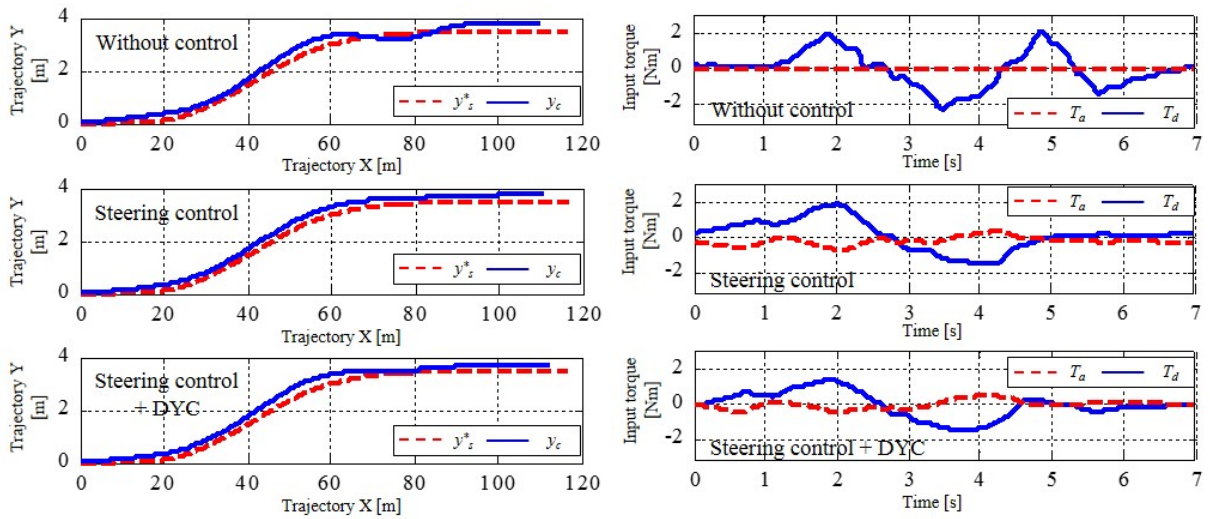


(e) Time history of lateral acceleration



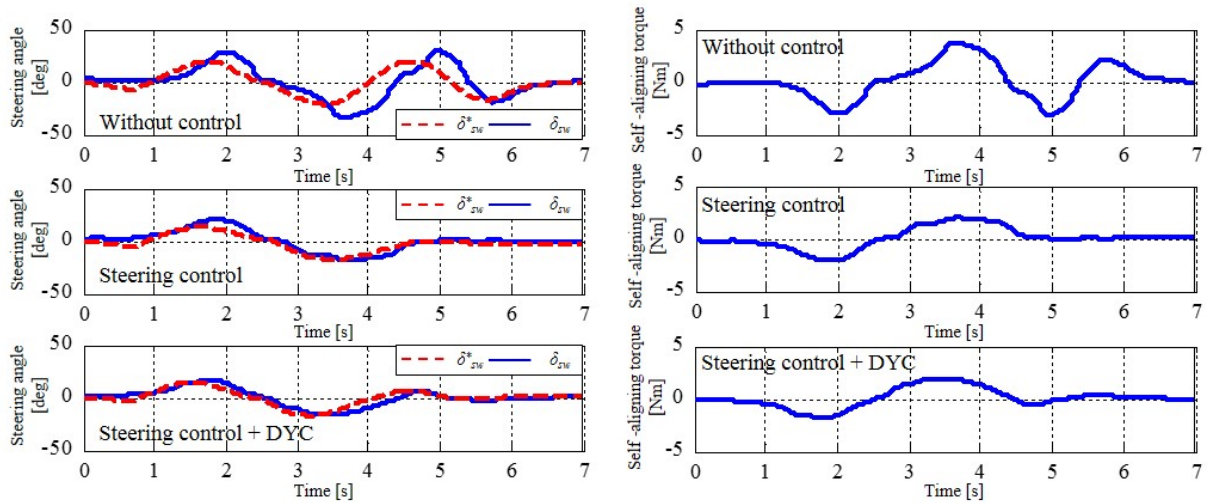
(f) Time history of DYC input

図 3.23 時刻歴応答 (高齢ドライバ Subject O3)



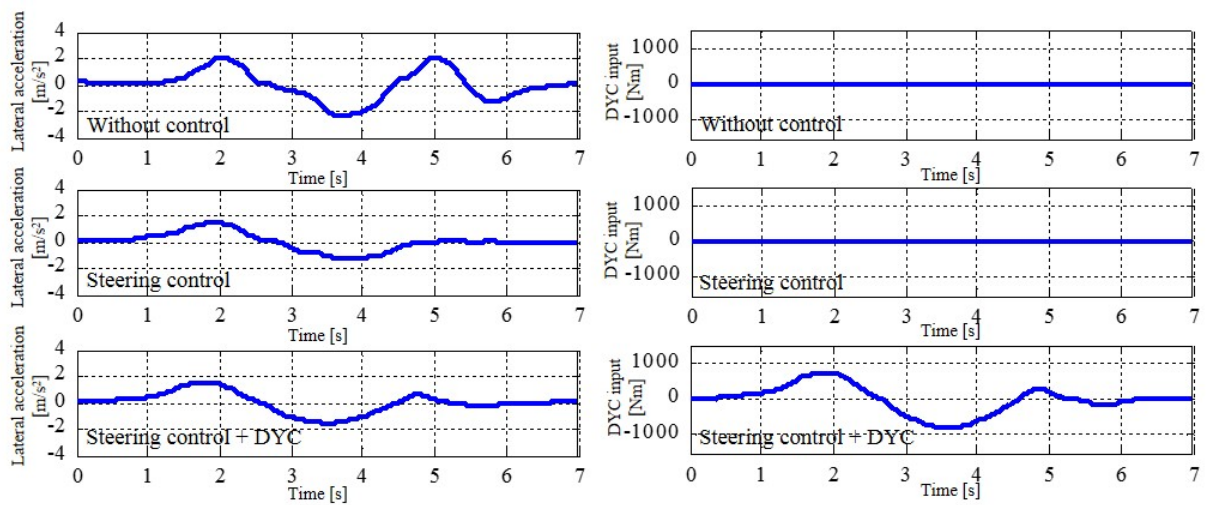
(a) The center of gravity vehicle trajectory

(b) Time history of steering torque



(c) Time history of steering angle

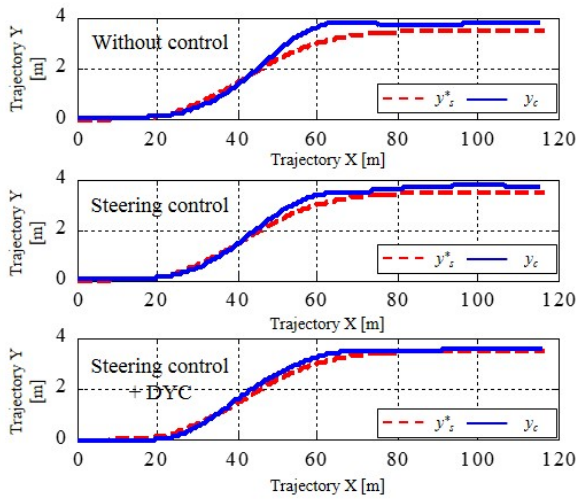
(d) Time history of self-aligning torque



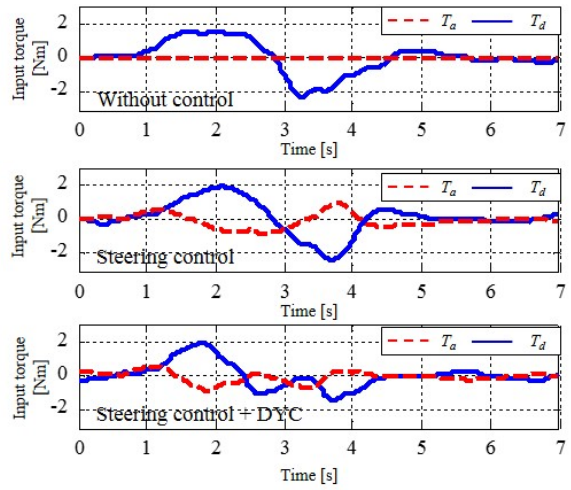
(e) Time history of lateral acceleration

(f) Time history of DYC input

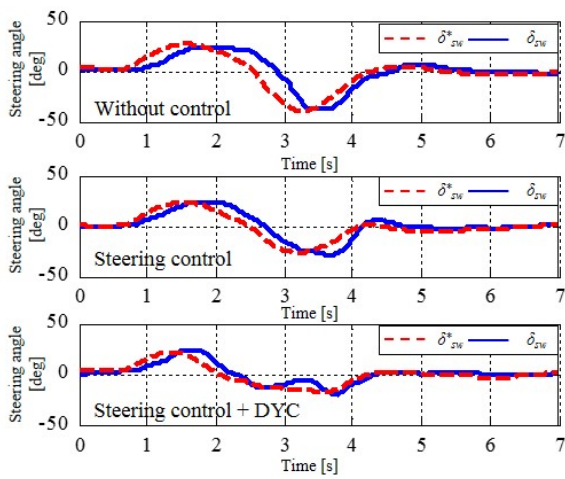
図 3.24 時刻歴応答 (高齢ドライバ Subject O4)



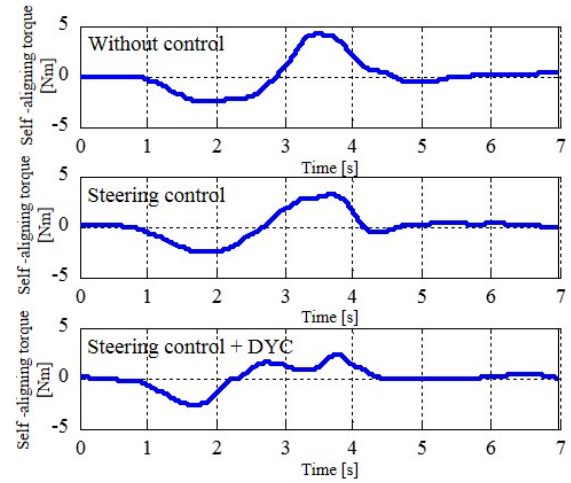
(a) The center of gravity vehicle trajectory



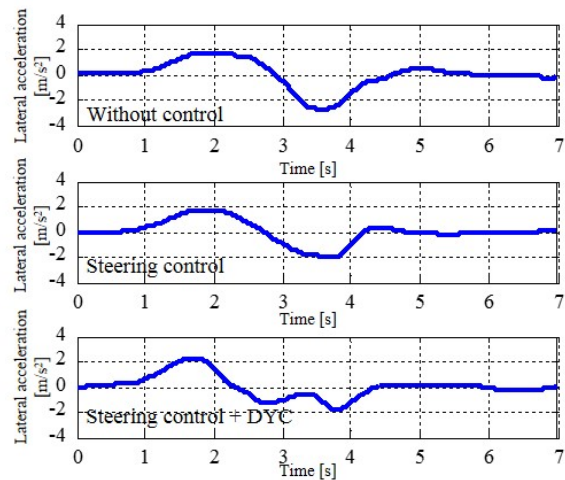
(b) Time history of steering torque



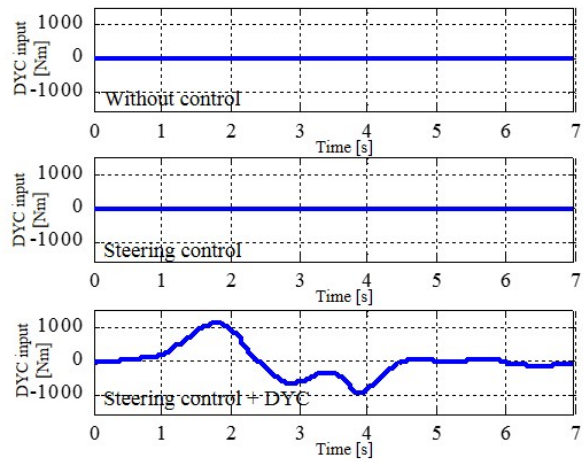
(c) Time history of steering angle



(d) Time history of self-aligning torque

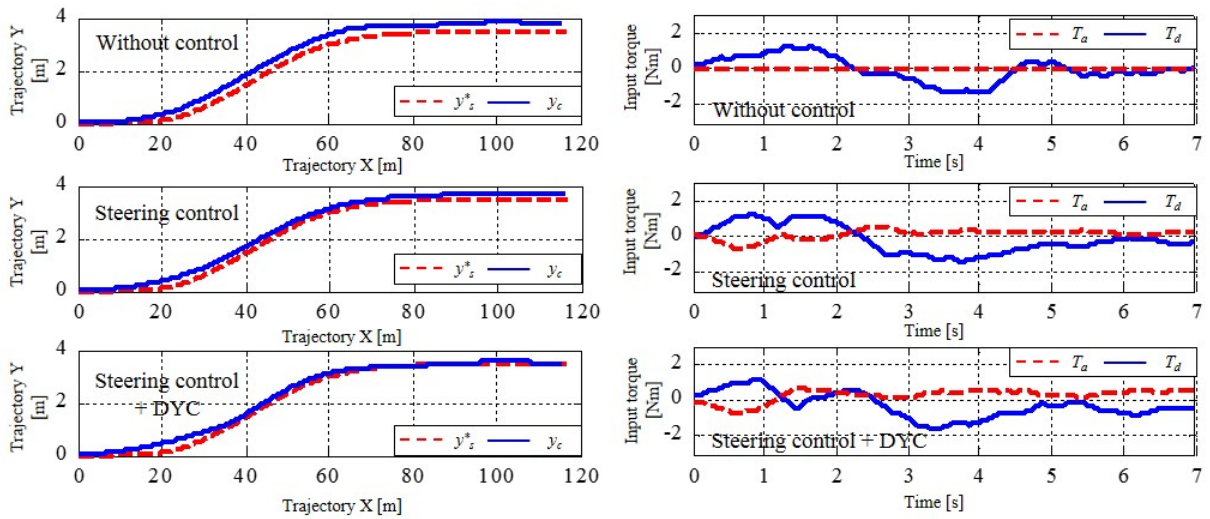


(e) Time history of lateral acceleration



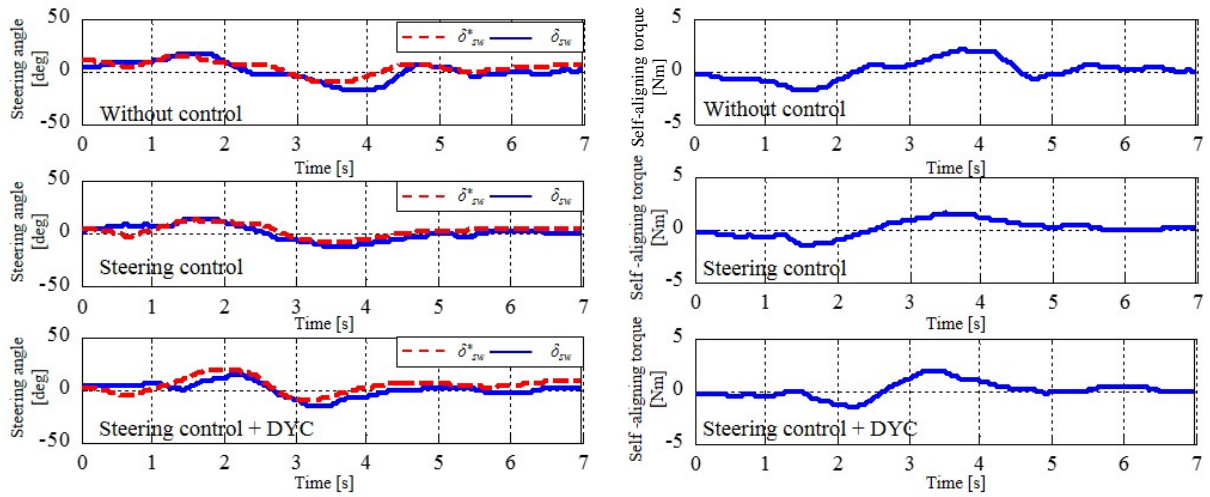
(f) Time history of DYC input

図 3.25 時刻歴応答 (高齢ドライバ Subject O5)



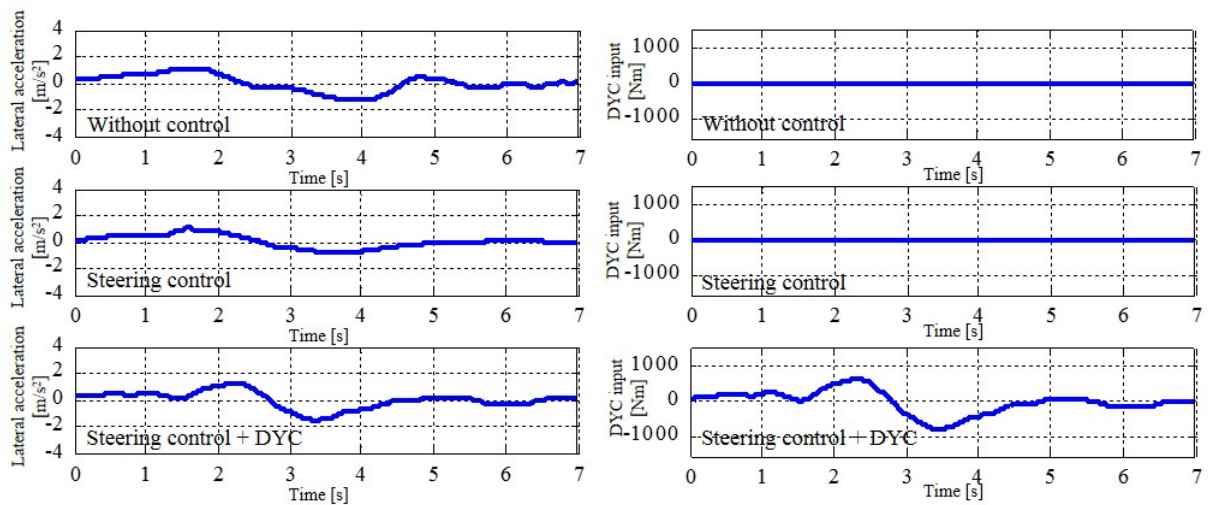
(a) The center of gravity vehicle trajectory

(b) Time history of steering torque



(c) Time history of steering angle

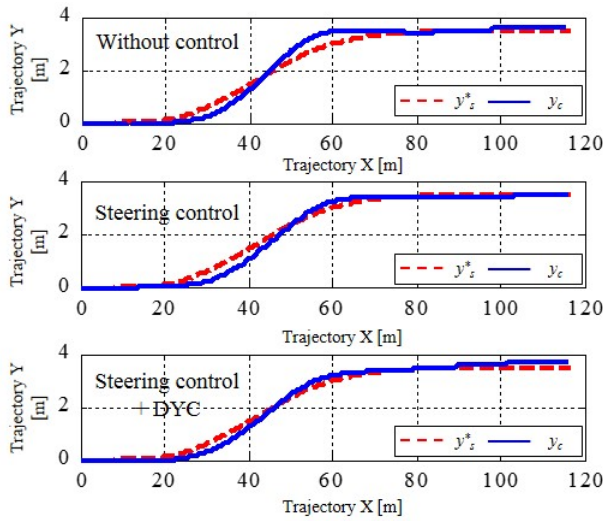
(d) Time history of self-aligning torque



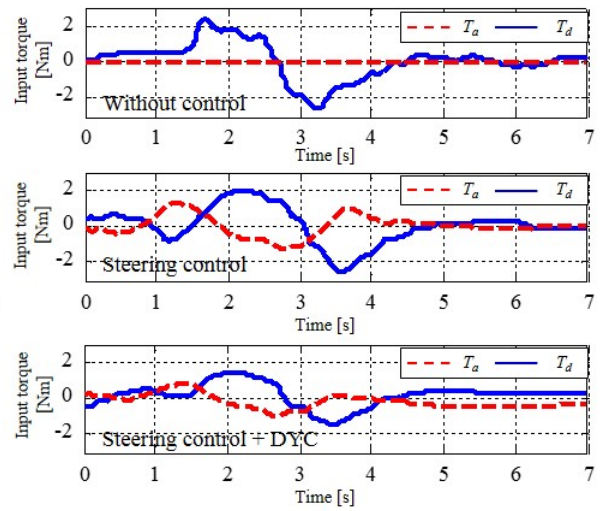
(e) Time history of lateral acceleration

(f) Time history of DYC input

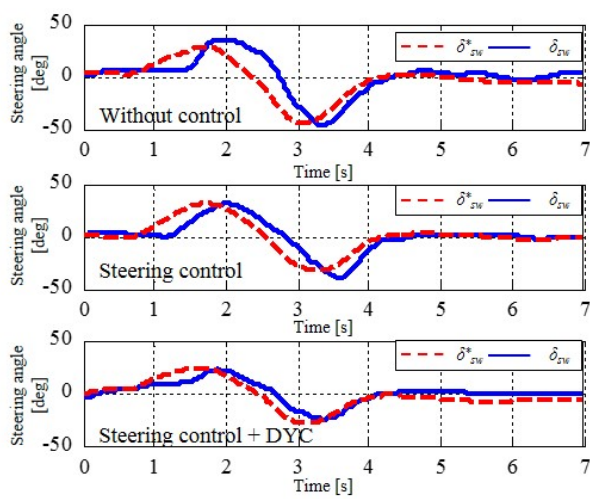
図 3.26 時刻歴応答 (高齢ドライバ Subject O6)



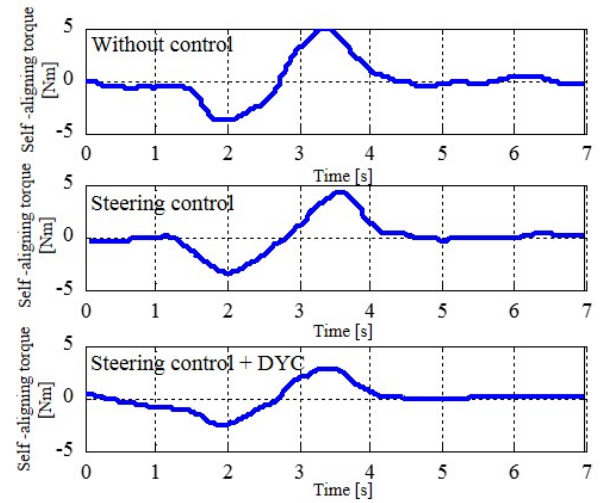
(a) The center of gravity vehicle trajectory



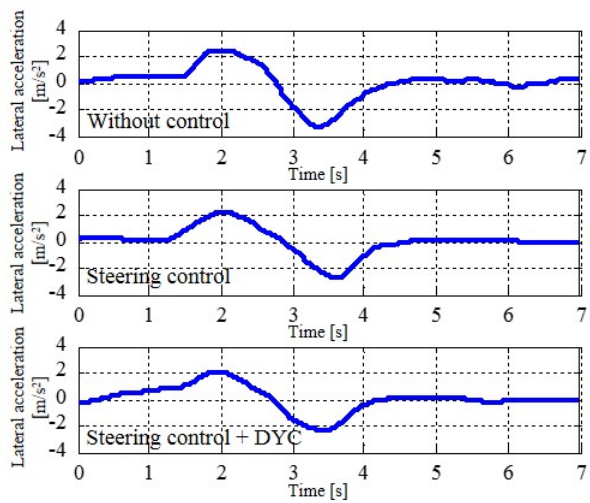
(b) Time history of steering torque



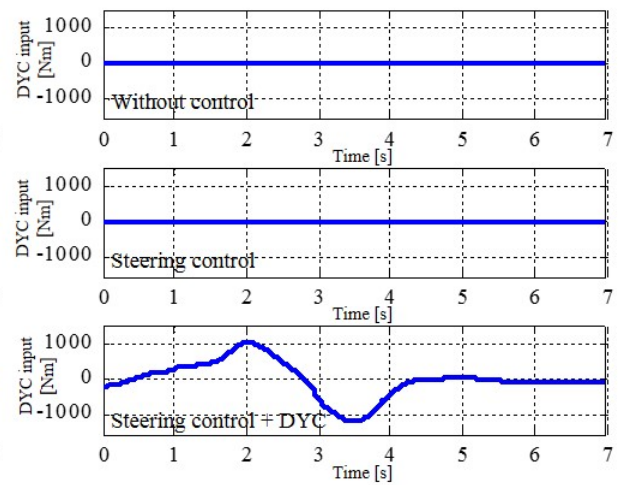
(c) Time history of steering angle



(d) Time history of self-aligning torque

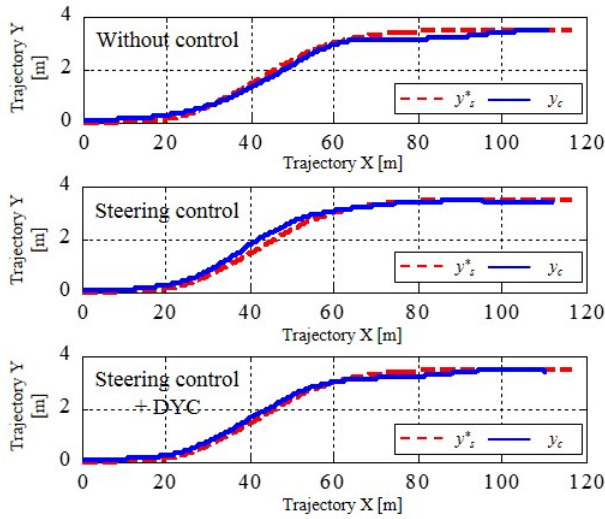


(e) Time history of lateral acceleration

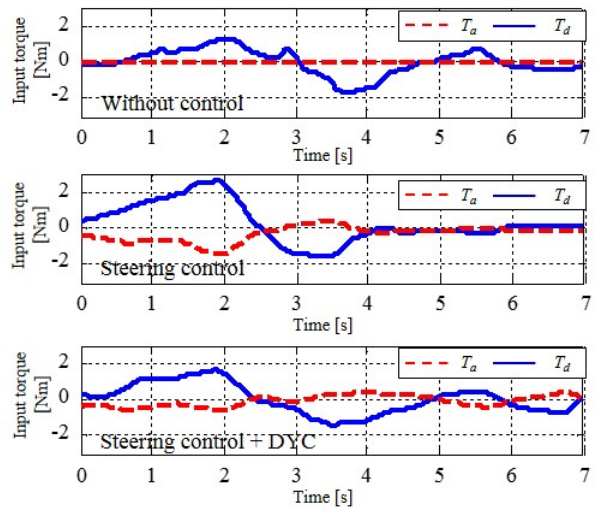


(f) Time history of DYC input

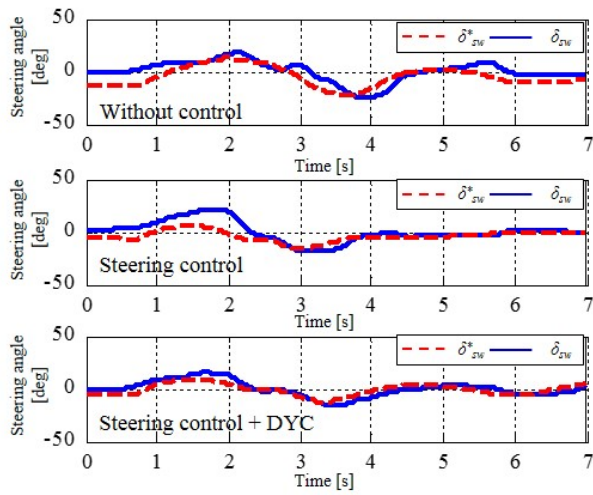
図 3.27 時刻歴応答 (高齢ドライバ Subject O7)



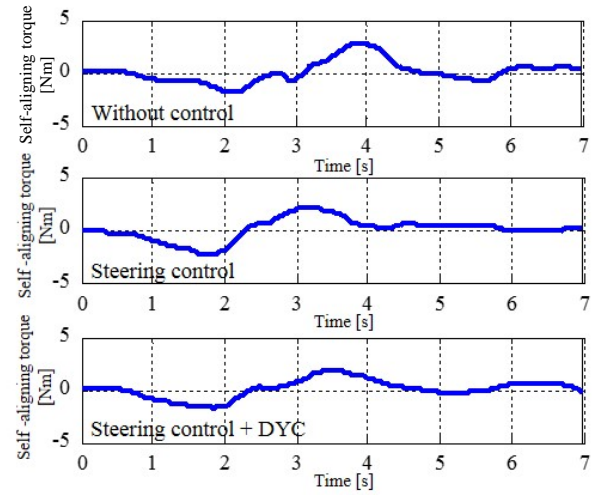
(a) The center of gravity vehicle trajectory



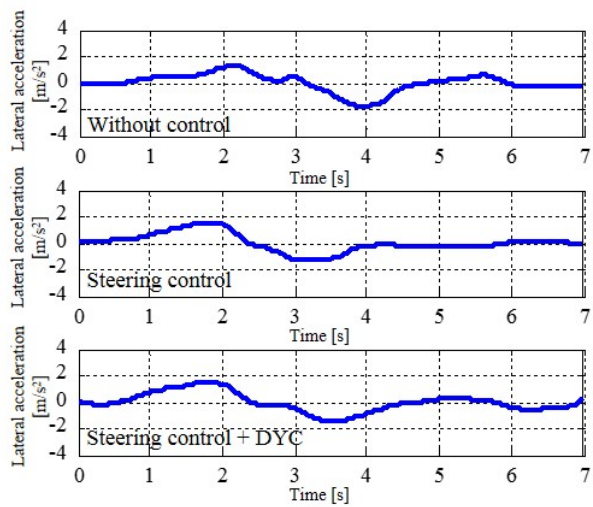
(b) Time history of steering torque



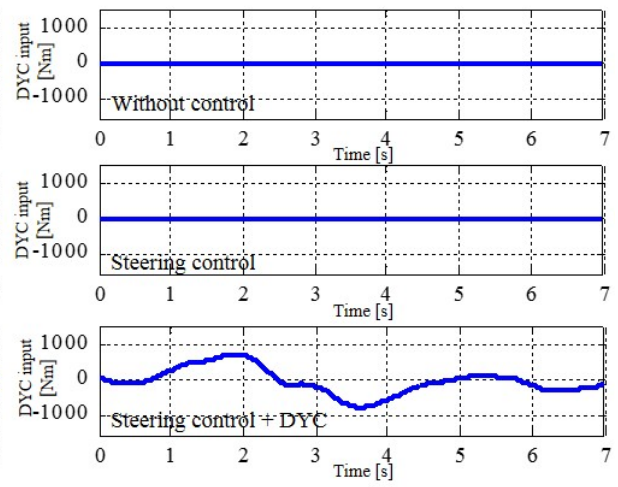
(c) Time history of steering angle



(d) Time history of self-aligning torque



(e) Time history of lateral acceleration



(f) Time history of DYC input

図 3.28 時刻歴応答 (高齢ドライバ Subject O8)

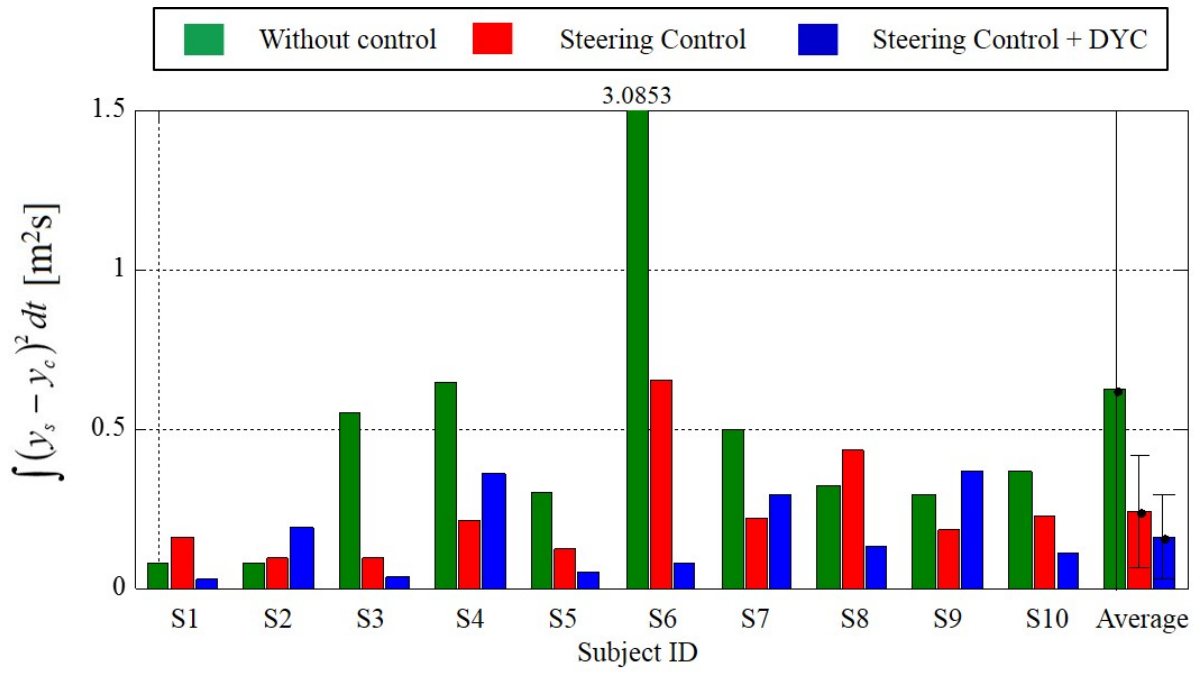
3.4.3 実験結果の解析

規範ドライバの目標横変位と実横変位の差の二乗積分値を比較し、コーストレース性能を定量的に評価する。若年および高齢ドライバの規範ドライバの目標横変位と実横変位の差の二乗積分値を図 3.29 に示す。ただし、積分区間は時刻 0 s から 7 s とした。

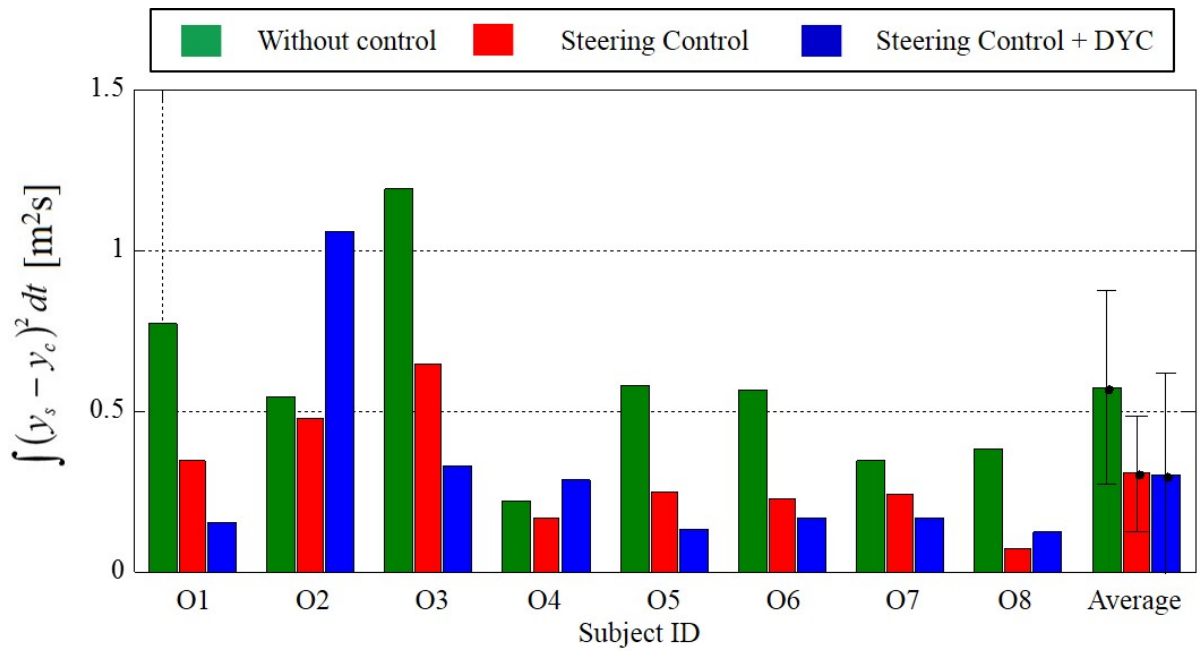
始めに操舵反力制御の効果を評価する。図 3.29 の平均値の結果からは、若年および高齢ドライバの両方においてコーストレース性能が向上していることが確認できる。しかしながら詳細を見てみると、若年ドライバのうち、被験者 S1, S2, S8 については、操舵反力制御によって軌跡追従性能が悪化する結果となっている。この結果は、若年ドライバが規範ドライバモデルに近い運転を行っていることに起因すると考えられる。例えば被験者 S1 や S2 などは、非制御状態でも二乗積分値が小さい。このようなドライバには、操舵反力制御が加わっても軌跡追従性能への影響は小さく、ばらつきの範囲である可能性が高い。高齢ドライバの場合は、非制御状態における二乗積分値は大きく、マニュアル運転におけるステアリング操作は、規範ドライバモデルのそれとは異なる傾向が強い。従って操舵反力制御が行われた場合は、顕著に軌跡追従性能が向上したと考えられる。

次に DYC の効果を評価する。非制御と操舵反力+DYC 制御を比較すると、若年ドライバについては 10 名の被験者のうち 8 名の被験者から、高齢ドライバについては 8 名の被験者のうち 6 名の被験者から DYC の効果が確認された。また、操舵反力制御のみと比較すれば、若年ドライバについては 10 名の被験者のうち 6 名の被験者から、高齢ドライバについては 8 名の被験者のうち 5 名の被験者から、DYC の効果が確認できた。以上の結果は、第 2 章で示した DYC を組み合わせる狙いが効果的に作用した結果であると考えられる。一方で DYC を組み合わせることで、軌跡追従性能が悪化するドライバも散見された。例えば高齢ドライバの被験者 O2 に着目する。時刻歴応答(図 3.22)を確認すると、3.5m 程度のレーンチェンジはおこなっていることから、主体的な運転はおこなっていると考えられる。軌跡追従性能が悪化する要因は、実ドライバの目標横変位が、反力制御トルクを与えても、規範ドライバも目標横変位に漸

近するように変化していないためと考えられる。操舵反力制御は、この差を小さくするための操舵誘導の機能を有するが、被験者 O2 はこの反力制御トルクを効果的に頼れていないと考えられる。図 3.22 の車両軌跡(a)において、どの制御条件でも規範ドライバモデルの目標横変位(破線)よりも手前を走行し、変化が見られないことは、上記を示唆するものと考えられる。このようなドライバには、表示系により規範ドライバモデルの目標横変位を教示することや、DYC 制御に軌跡を誘導するような機能などを、さらに付加することが有効と考えられる。この検討については第 5 章で示したい。



(a) Young drivers



(b) Elderly drivers

図 3.29 軌跡追従性能の評価

(規範ドライバの目標横変位と実変位の差の二乗積分値)

次に操舵角速度を比較し，運転の滑らかさを考察する．若年および高齢ドライバの操舵角速度の時刻歴応答をそれぞれ図 3.30 と図 3.31 に示す．操舵反力制御の効果に注目すると，若年ドライバ，高齢ドライバともに，非制御と比較して舵角速度のピークが低減し，操舵入力が滑らかになっていることが確認できる．また操舵反力制御と **DYC** が組み合わされると，操舵角速度はさらに減少する傾向が確認できる．この効果は，**DYC** によりステアリング舵角入力に対する車両横運動の定常ゲインが大きくなることで，より少ない操舵量で目標軌跡を追従することができるためであると考えられる．

上記を定量的に示すために，全被験者の舵角速度の二乗積分値を評価する．図 3.32 に計算結果とその平均値および標準偏差を示す．ただし，積分区間は同じく時刻 0 s から 7 s とした．若年ドライバ，高齢ドライバ共に，制御介入によって二乗積分値は減少する傾向にあるが，その減少効果は高齢ドライバの方が大きい．高齢ドライバの非制御時の二乗積分値を若年ドライバのそれと比較すると，高齢ドライバの二乗積分値は大きい傾向がある．具体的には，若年ドライバの平均値は $2000\text{deg}^2/\text{s}$ 程度であるのに対し，高齢ドライバは $6000\text{deg}^2/\text{s}$ 程度である．このことはマニュアル運転状態では，高齢ドライバの方がよりふらつきの大きなステアリング操作をおこなっていることを示している．このことが，操舵反力制御の効果が顕著であった理由であると考えられる．以上より，高齢ドライバは，操舵反力制御によって，より滑らかな運転に変容していることが定量的に示された．

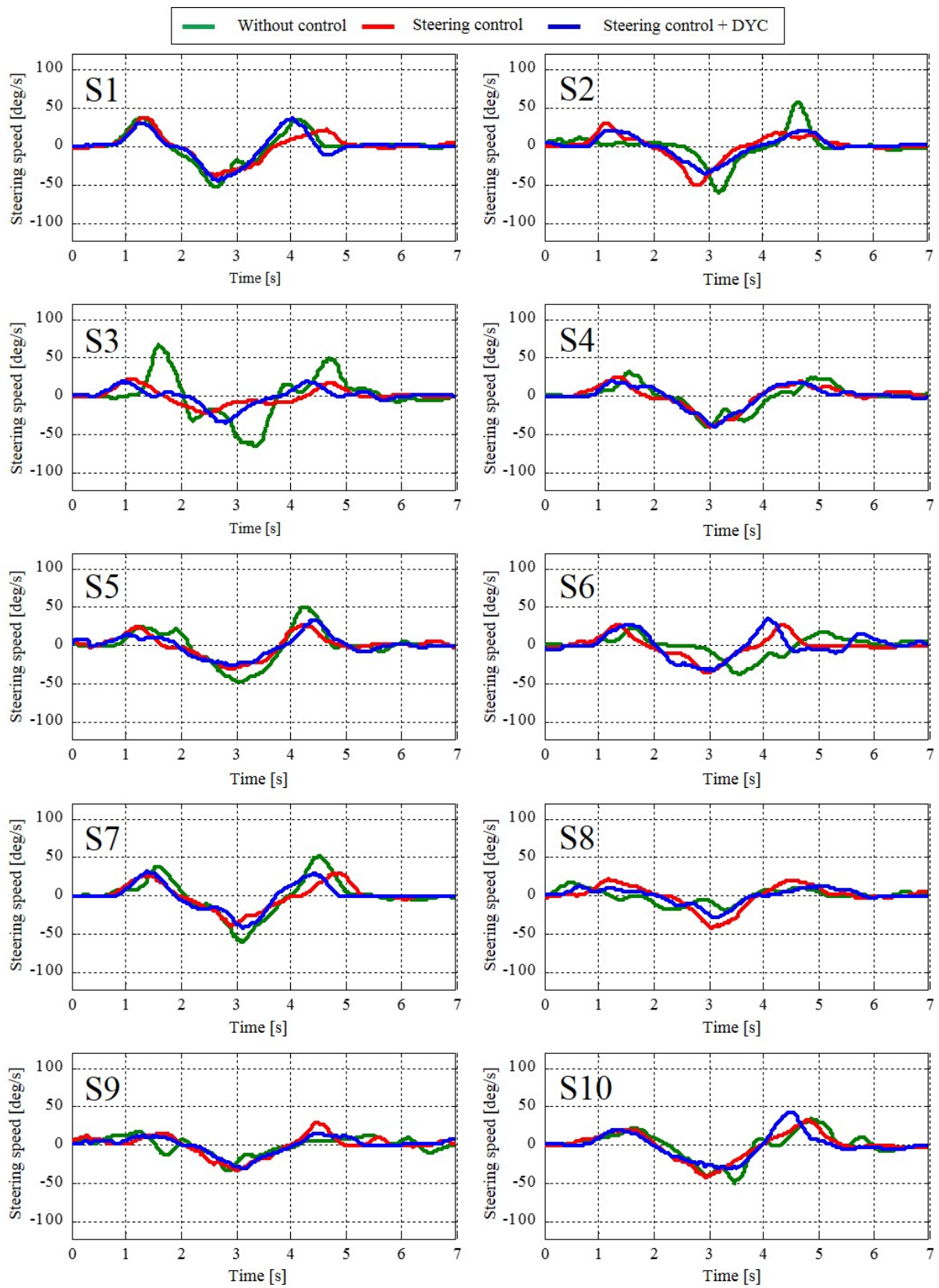


図 3.30 ステアリング舵角速度の時刻歴応答(若年ドライバ)

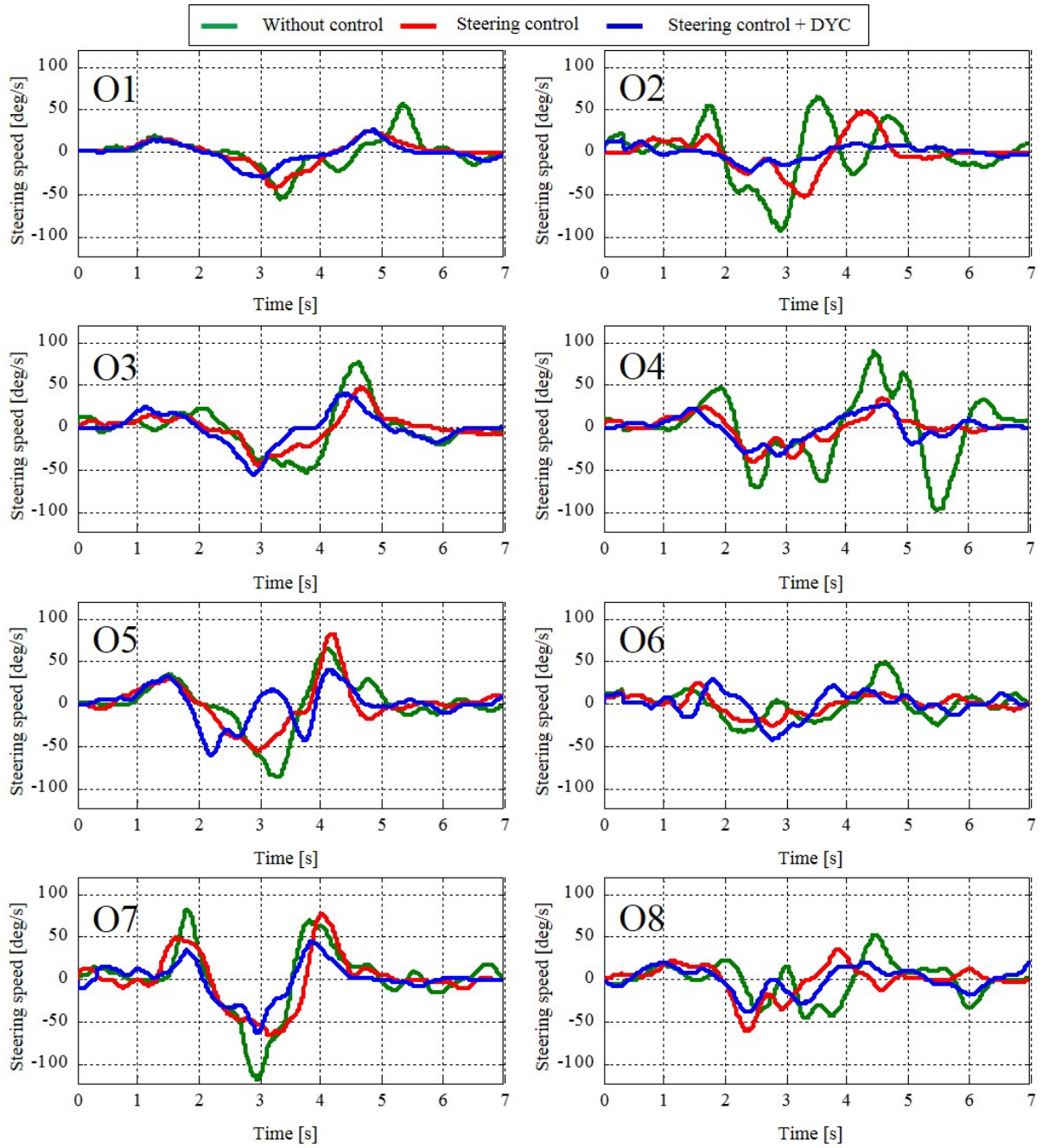
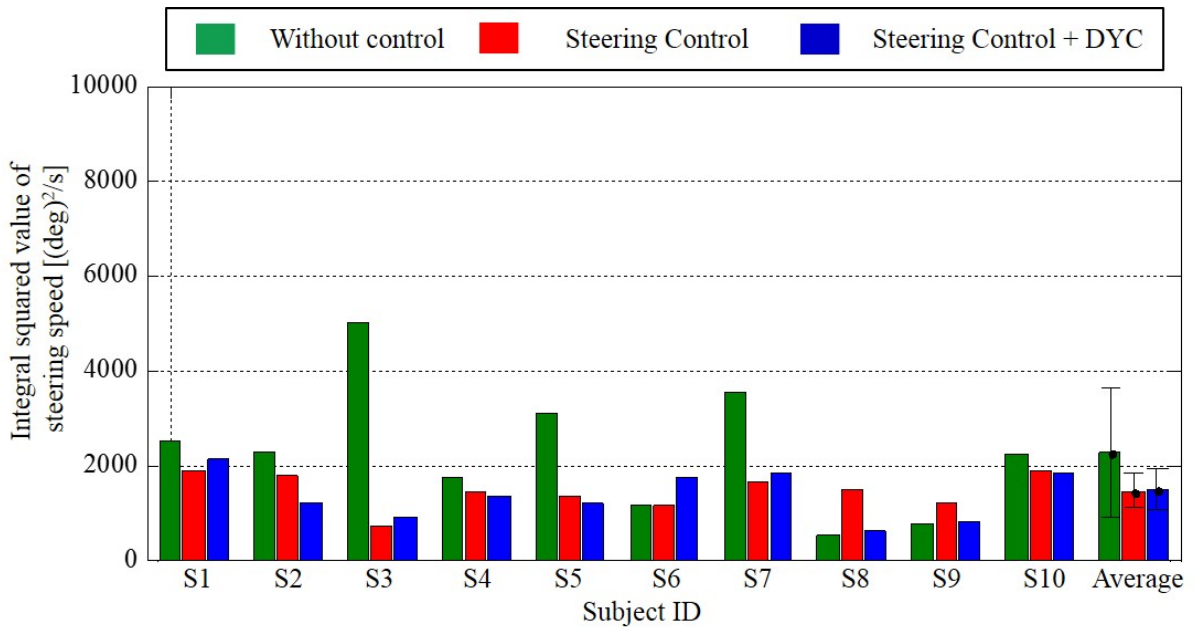
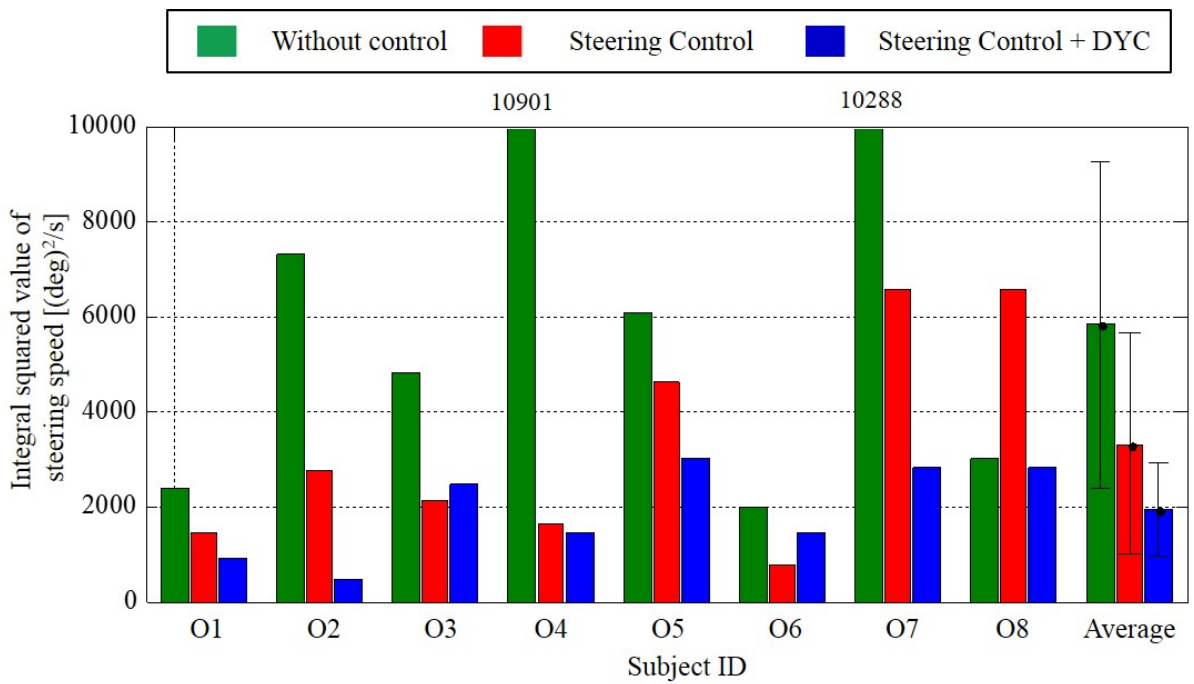


図 3.31 ステアリング舵角速度の時刻歴応答(高齢ドライバー)



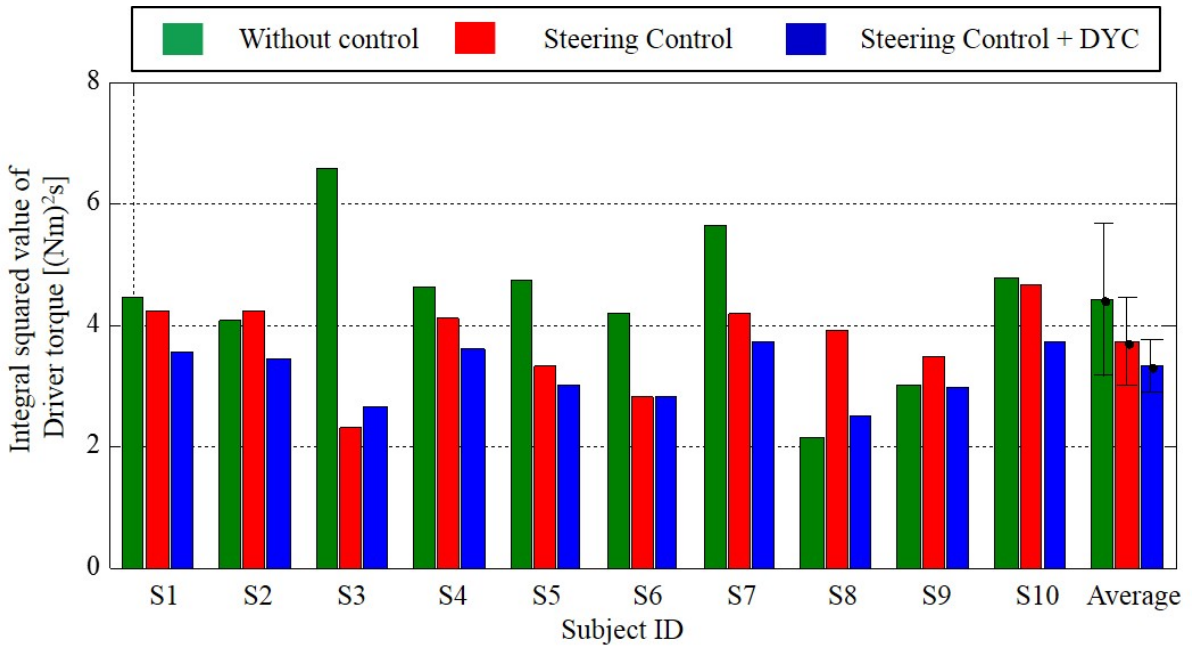
(a) Young driver



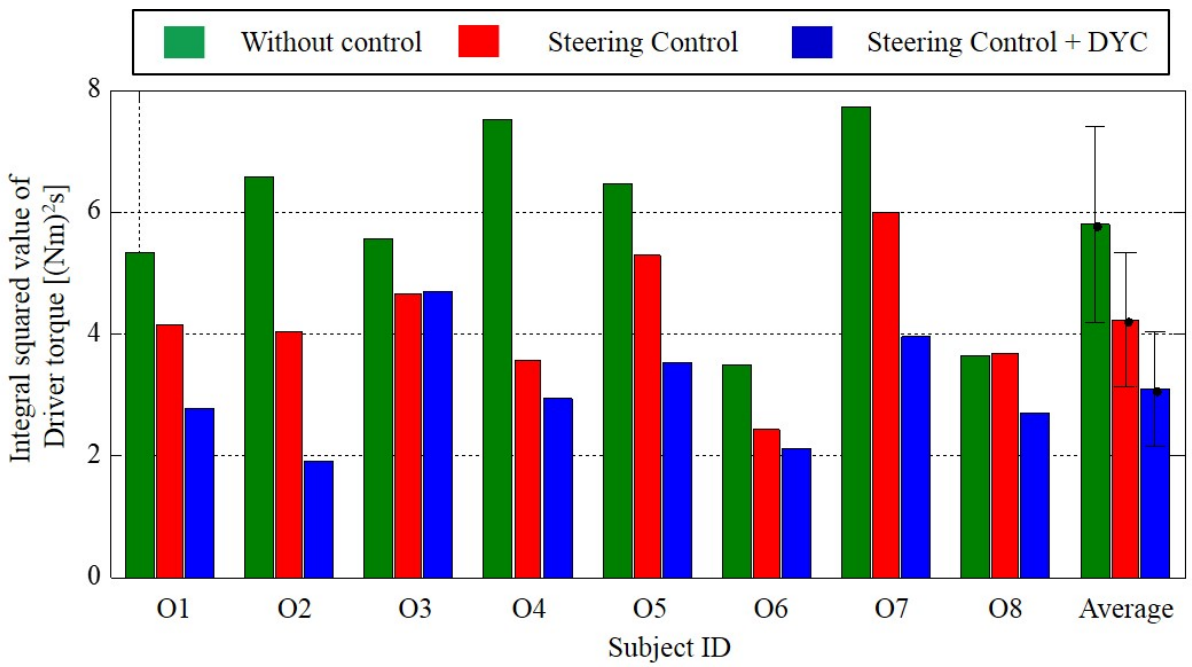
(b) Elderly driver

図 3.32 運転の滑らかさの評価 (ステアリング舵角速度の二乗積分値)

次に、操舵負担量の評価を行う。本研究ではドライバの操舵トルクの二乗積分値を用い、シングルレーンチェンジにおける操舵負担量を評価する。この値が小さいほど操舵負担量が小さいと考える。全被験者の操舵トルクの二乗積分値の計算結果および平均値と標準偏差を図 3.33 に示す。ただし、積分区間は同じく時刻 0 s から 7 s とした。図 3.33 の平均値より、若年ドライバと高齢ドライバ共に操舵反力制御を行うことでドライバの操舵負担量は減少している。操舵負担量が減少する要因は、反力制御トルクがタイヤにも仕事をするためである。Shared control システムにおける操舵反力制御部の役割は、ドライバへの規範運転教示の役割と共に、必要な操舵量の一部を分担するという両方の役割を有する。規範教示によって、ドライバの目標軌跡が制御システムが描く目標軌跡に一致すれば、目標軌跡を追従させるために必要な操作量は一意に決まる。その操作量を、ドライバと制御システムが適切に分担することができれば、ドライバトルクは減少することが可能である。例えば高齢ドライバの被験者 O1, O3, O5, O6, O8 は、横変位の二乗積分値と(図 3.29)と、ドライバトルクの二乗積分値(図 3.33)が同時に減少している。このようなドライバは、反力制御トルクが有する 2 つの役割を適切に利用しながら運転をおこなっていると考察できる。DYC が加わると、さらに操舵負担量が減少する傾向が確認できる。その要因は、横運動の一部を DYC が負担するという効果と、DYC によってステアリング舵角入力に対する車両の定常ゲインが増加するためにドライバの操作量が小さくなり運転しやすい車両が得られるという効果の両方が作用しているためと考えられる。この傾向は、被験者 O3 を除いたすべての高齢ドライバから確認できる。



(a) Young driver



(b) Elderly driver

図 3.33 操舵負担量の評価
(ドライバトルクの上乗積分値)

最後にドライバの操舵感について考察を行う。操舵感は、ドライバの操舵トルクを横軸、横加速度を縦軸にプロットしたリサージュ波形を用いて評価する。若年および高齢ドライバの操舵トルクを横軸、横加速度を縦軸にプロットしたリサージュ波形をそれぞれ図 3.34, 図 3.35 に示す。各象限におけるリサージュ波形の車両状態を図 3.36 に示す。グラフ内の第 2, 4 象限の領域は、ドライバの操舵トルクに対して逆方向に横加速度が発生する状態であり、ドライバの入力方向と車両挙動は異調関係にあることを示している。通常の場合においてはドライバの操舵トルクに対しヨーレイトはある遅れ系を持ちながら同調方向に発生するため、通常操舵ではリサージュ波形が第 1, 3 象限に伸びた輪の形になる。図 3.34, 図 3.35 をみると、第 2, 4 象限に向かうような入力波形は、若年ドライバ、高齢ドライバともに確認されない。このことから、提案システムにおけるドライバと制御システムの関係は、同調関係を有しているといえる。次に制御有無の影響を考察する。非制御の場合、リサージュ波形は大きく膨らむ傾向を示す被験者が確認できる(例えば若年ドライバの被験者 S3, 高齢ドライバの被験者 O2, O3, O5, O7 など)。今回の実験では、車線変更幅を規定したレーンチェンジの実験であることから、この膨らみは車両のふらつきをあらわしている。これに対し制御時の場合、リサージュ波形はヒステリシスが小さく、安定的なものに変化している。ここで横軸をドライバの入力、横軸をドライバと制御システムの合算入力に対する車両応答結果とみれば、この結果は、ドライバと制御システムが互いに協調していること、また協調することによって安定的な車両挙動が実現されることを示していると考えられる。

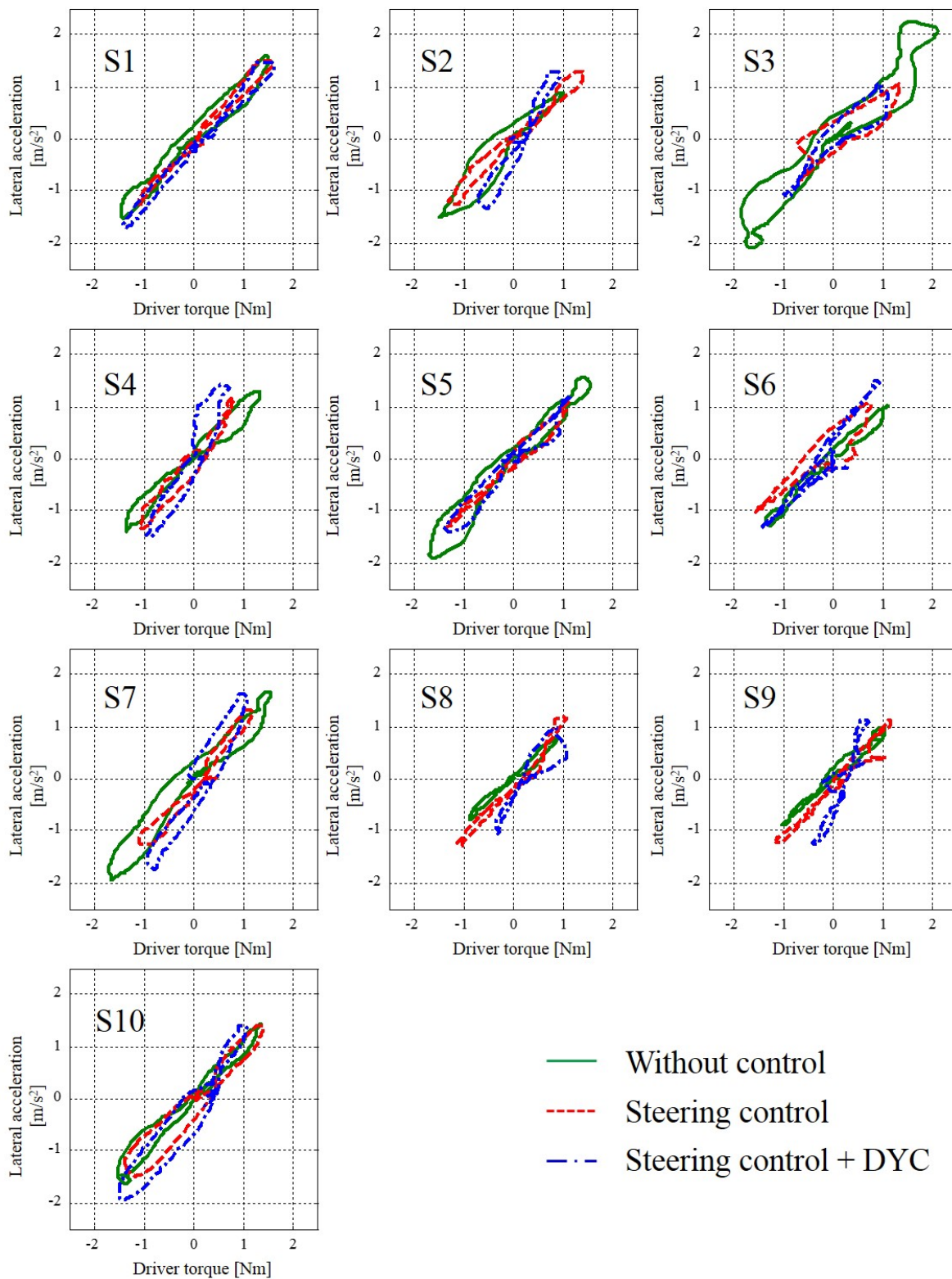


図 3.34 ドライバトルクに対する横加速度のリサージュ波形(若年ドライバ)

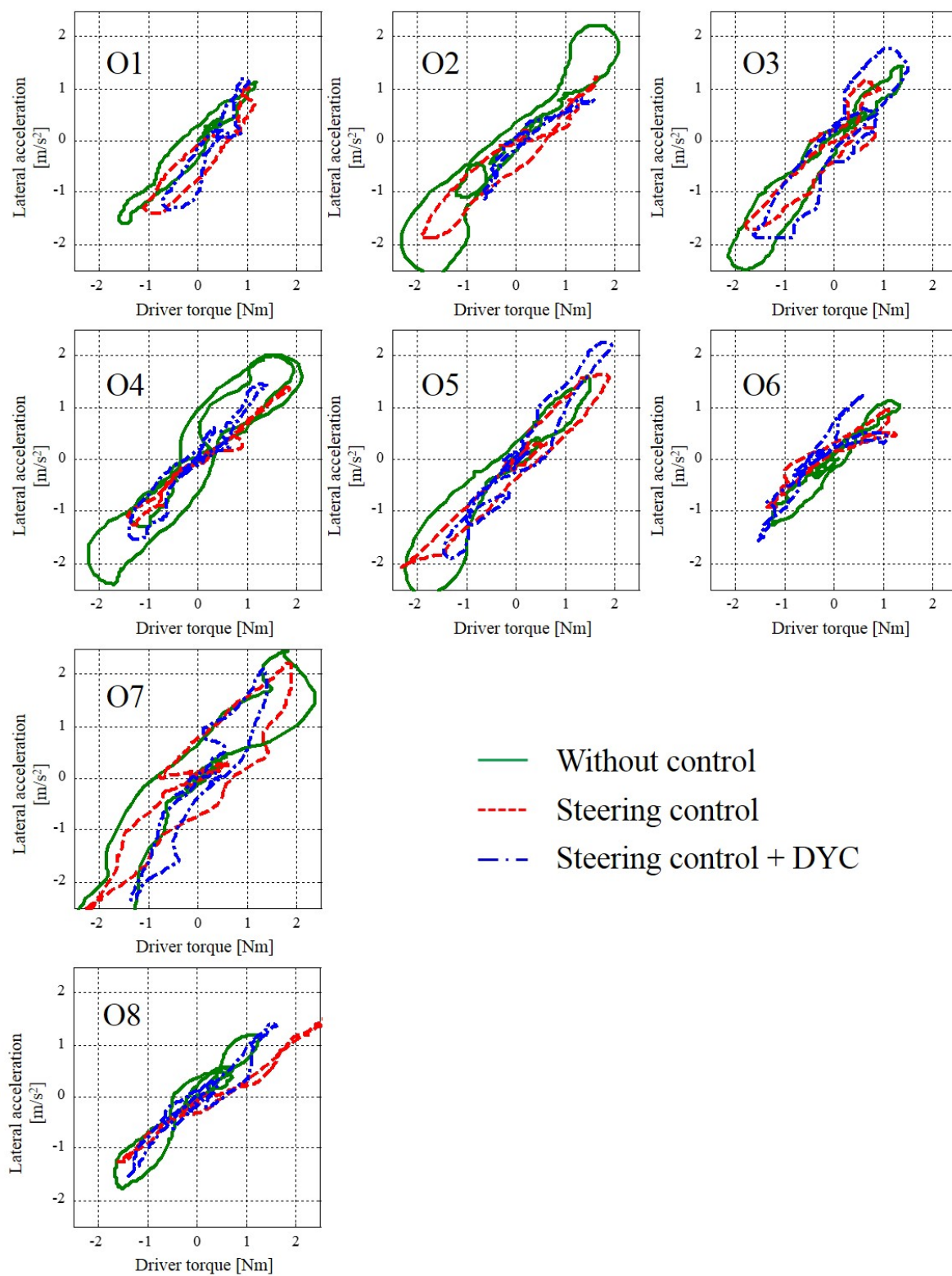


図 3.35 ドライバトルクに対する横加速度のリサージュ波形(高齢ドライバ)

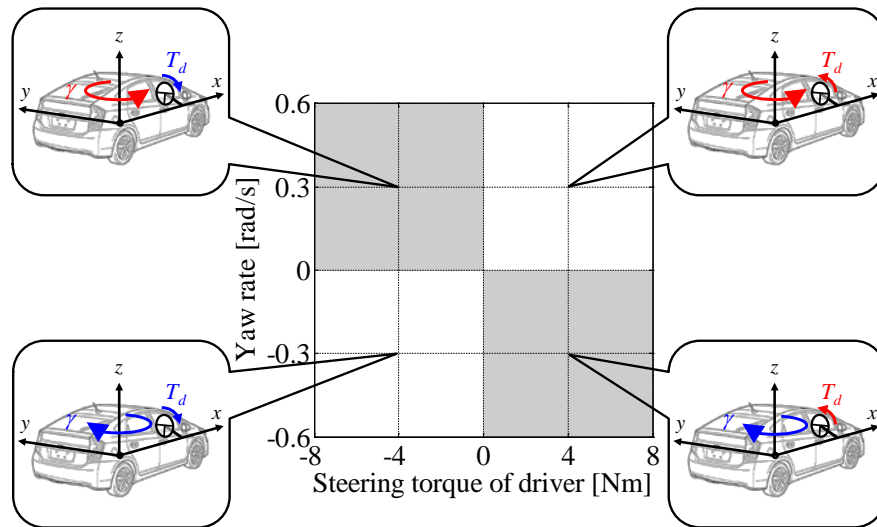


図 3.36 各象限におけるリサージュ波形の車両状態

3.5 まとめ

本章では，第 2 章で構築した Shared control の制御設計について，ドライビングシミュレータを用いた実験検討の結果を示した．若年ドライバと高齢ドライバの実験結果を比較しながら，制御介入時の運転行動の変容を丁寧に考察した．得られた主な知見は次の通りである．

- (1) 提案する操舵反力制御によって，ドライバの運転は規範ドライバに近づく．特に，遅れやすいレーンチェンジの開始タイミングが，規範ドライバに導かれる効果がある．
- (2) 若年ドライバと比較すると，高齢ドライバの方が操舵反力制御の効果が顕著である．高齢ドライバの運転は，マニュアル運転においてより大きくふらつく傾向があった．上記の効果は，高齢ドライバが反力制御トルクを使いながら，この大きなふらつきを抑えるように運転操作を変化したためと考えられる．

(3) **DYC** を組み合わせると、上記の傾向がより強まる。また、ドライバトルクと反力制御トルクの相互作用はより滑らかに変化する。一方で、今回選定した舵角比例の **DYC** 制御則では、軌跡追従性能は悪化するドライバも存在した。

(4) 実験結果から、ドライバと制御システムの関係は、同調関係を有していることが確認された。ドライバと制御システムが互い協調することで、人間—機械閉ループ系で安定的な車両挙動が実現される。

本章で示した結果から、提案する操舵反力制御を用いた **Shared control** システムの有効性は示された。また **DYC** を組み合わせた複合入力による協調制御について、その基礎的評価が示された。得られた知見を用いて、次章では提案システムを潜在リスク予測運転シーンに拡張適用させる。

第 4 章

潜在リスク予測型シェアード・コントロール の設計と理論解析

4.1 はじめに

本章では，提案する Shared control を潜在リスク予測運転シーンに対して適用することを目的とする．図 4.1 は事故発生に至るまでの運転状態を，衝突余裕時間 TTC (Time To Collision) [101]で整理したものである．運転状態は，大きく 3 つの運転領域で定義することができる．1 つめは通常運転領域 (Normal driving) である．これは 5s から 10s 手前の時間軸に相当し，ドライバは道路形状や遠方の交通状況などを元に，基本となる運転を決めている時間領域である．2 つめは，1s から 5s 手前の潜在リスク予測運転領域 (Risk predictive driving) である．この時間領域では，先行車や駐車車両，または交差点の歩行者など，他の交通対象物の状態を読み解き，それらに付随する潜在的なリスク(例えば歩行者が飛び出してくるかもしれない等)を下げるように運転行動を変化させている領域である．この変化は，まさに先読み運転またはかもしれない運転とも呼ばれるものである．そして事故発生まで 1s を切ると，潜在リスクは回避しなければならない顕在リスクに変化し，ドライバは衝突回避のための減速または急操作をおこなう．この時間領域は，緊急回避運転領域 (Emergency driving) と定義できる．

熟練ドライバが有する特徴の一つは，潜在リスク予測運転領域における適切なリスク評価である[102] [103]．熟練ドライバは，これまでの豊富な運転経験を元に，そのシーンにおける潜在的なリスクを適切に評価し，運転状態が緊急回避運転領域に陥らないように運転行動を変化させている．ここで，Shared control はこのような潜在リスクが存在するような運転シーンに対して有効度がさらに期待できる．制御システムが熟練ドライバのように潜在リスクを正しく読み，それに応じた規範操作を適切にドラ

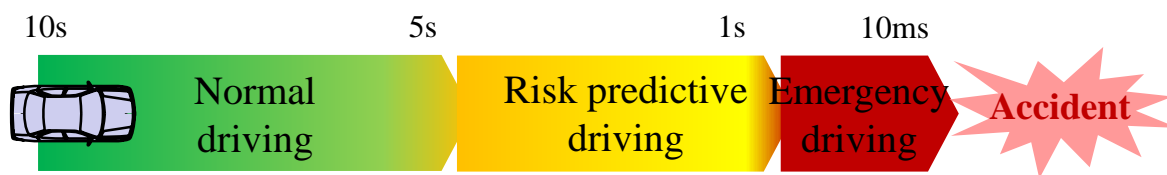


図 4.1 事故発生の対象物に至るまでの運転状態

イバに教示することができれば、また、ドライバがその教示を適切に運転操作に反映することができれば、より安全でかつ滑らかな運転が、人間機械の閉ループ系で実現できると考えられるためである。

そこで第 4 章では、潜在リスクの運転シーンの一つである駐車車両回避シーンを題材に、その駐車車両を安定的に回避し、かつ側方間隔を正しく取るように誘導する機能として、提案する Shared control システムを拡張する。

4.2 ポテンシャルに基づく横運動計画

第 2 章および第 3 章で示した経路追従走行では、規範ドライバモデルとして前方注視型のドライバモデルを用いた[104]。このモデルには、目標軌跡を予め決定する必要がある。車線追従制御やレーンチェンジなど、比較的簡単に目標軌跡が決定できる場合は非常に実用的なモデルであるが、駐車車両回避や自転車追い越しシーンなどの道路形状以外が目標軌跡に影響を及ぼすようなシーンについては、その目標軌跡を一意に決定することが難しい場合がある。複雑な目標軌跡の決定方法としては、例えば加藤らが、車線変更シーンに対してその目標軌跡を短冊状に細かく分ける方法を考案している[105]。短冊上に分けた目標軌跡要素を急激な姿勢角の変化を招かないように徐々に移動させることで、滑らかな目標軌跡を作成することを特徴としている。また西羅らは、モデル予測制御を用いて最適経路を生成する方法を提案している[106]。さらに角川らは、車両モデルを用いて舵角操作から車両の走行軌跡を予測し、その時のステアリング舵角に対して評価関数を設定することで、その評価値が最小となるようにステアリング舵角の目標時系列を決定する手法を提案している[107]。これらの先行研究は、シミュレーションまたは実車検討によって、提案手法の有効性が確認されているが、解くべき数式が多く、また複雑であるため計算負荷の問題が懸念される。ま

た潜在リスクの組み込み方に特別な言及がなく、ステアリングを介して潜在リスクを教示するという提案システムの基本的な設計思想を制御設計に適切に反映しにくい課題もある。そこで本研究では、これらの課題を打開すべく、長谷川らが提案するリスクポテンシャル最適化理論に基づいた横運動制御則を応用利用する[108]。なお本横運動制御は、完全自動運転を前提として、シミュレーション検討がおこなわれ、正しく自動走行が行われることが検証されている。本論文は、これを **Shared control** の規範ドライバモデルとして応用利用する点が特徴である。

図 4.2 を用いて、ポテンシャル階層構造の基本的な考え方を説明する。階層は基本走行ポテンシャル、顕在リスクポテンシャル、潜在リスクポテンシャルの 3 層から構成される。まず基本走行ポテンシャルは、道路の直線や曲線形状に対応したポテンシャルであり、道路形状を表現するためのものである。2 層目の顕在リスクポテンシャルは、駐車車両や歩行者など見えている(顕在化している)物標に対して与えられるポテンシャルである。そして 3 層目は、歩行者が急に飛び出してくるかもしれない等、潜在的なリスクに対して定義されるポテンシャルである。4.1 節の運転状態と各層の関係は、1 層目が通常運転領域を表現するための階層であり、一方、3 層目は潜在リスク予測運転領域を表現するための階層である。2 層目は両運転領域を表現する中間階層と定義することができる。実際の走行における本階層構造の作動イメージは次の通りである。1 層目の基本走行ポテンシャルは、地図情報や認識情報をもとに常時作用するポテンシャルであり、このポテンシャルに基づき、横運動制御はコーストレース制御を連続的に実行している。この制御状態に対して、認識系が例えば駐車車両を検知しその位置情報を取得すると、その位置情報に基づいて 2 層目の顕在リスクポテンシャルが 1 層目の基本走行ポテンシャルと重ね合わされる。さらに見通しの悪い交差点や駐車車両の陰からの人の飛び出しなどが予見されれば(予見には、データ駆動型 AI シーン予測技術等との統合が望まれる)、3 層目の潜在リスクポテンシャルが重ね合わされる。車両制御の結果、これらのリスクが回避され、顕在リスクや潜在リスクが無くなれば、ポテンシャルの総和は、元の基本走行ポテンシャルのみに戻る。このように、本階層構造は、運転場面に応じて各ポテンシャルを重ね合わせることで、

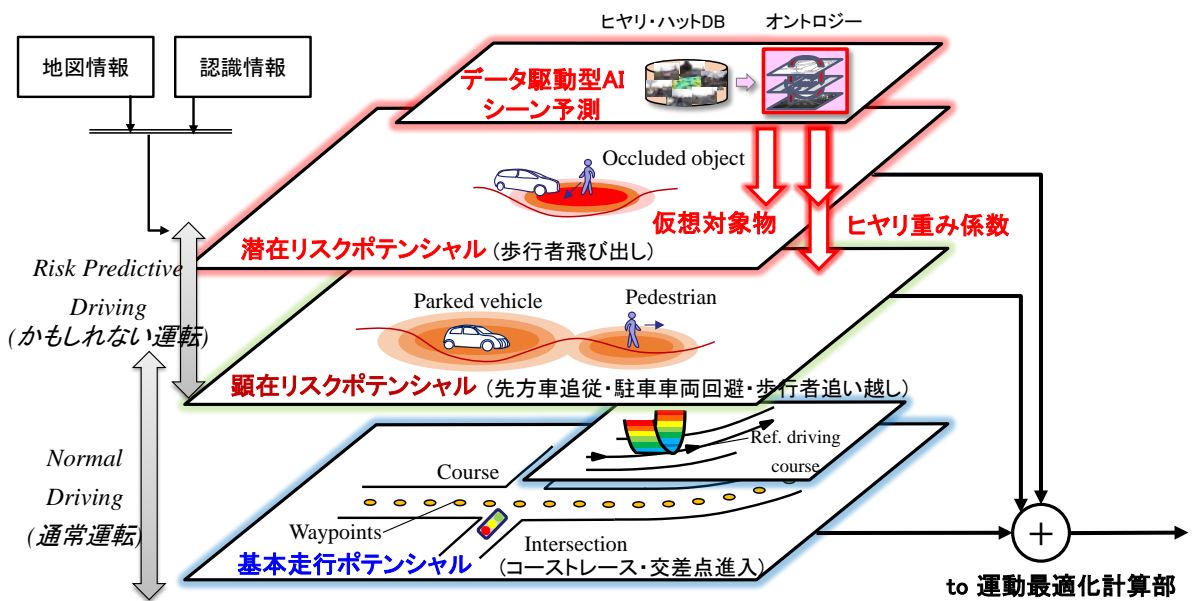


図 4.2 ポテンシャルの階層構造

その場면을体系的に表現できることが特徴である。

具体的なポテンシャルの定義方法、およびポテンシャルに応じた規範ステアリング舵角の算出方法について、その手順を説明する。はじめに、ポテンシャルの定義方法を述べる。ポテンシャルフィールド法は、主にロボットの経路計画で用いられる手法の一つである(例えば、島倉らの研究[109])。この手法の概念は、あるフィールド内において移動物体の経路計画に影響を及ぼす要素を中心とした引力あるいは斥力が発生していると仮定した際、それらの力によって形成されるポテンシャル場の作用力により移動物体の速度ベクトルの大きさ及び向きを決定し、経路計画を行う手法である。ポテンシャルを設定する運転場面として、直線道路に駐車車両が止まっている場面を想定する。この場面において定義すべきポテンシャルは、道路境界に対する基本走行ポテンシャルと、駐車車両に対する顕在リスクポテンシャルの2要素である。これらの2要素に対し人工的なポテンシャルを定義することで、ドライバーが感じる危機感を模擬する。具体的なポテンシャルの定義は次の通りである。

[道路境界の斥力ポテンシャル]

道路境界の斥力ポテンシャル U_r は式(4.1)で定義される。

$$U_r(X, Y) = w_r \left[1 - \exp \left\{ - \frac{(Y - Y_{rc})^2}{2\sigma_r^2} \right\} \right] \quad (4.1)$$

ただし w_r , σ_r はそれぞれ道路境界の斥力ポテンシャルの重み, 分散を示す。また Y_{rc} は道路中心の位置を示す。道路境界の斥力ポテンシャルの形状例を図 4.3 に示す。道路境界に対しては, 道路中心が最もポテンシャルが低い形状となる。

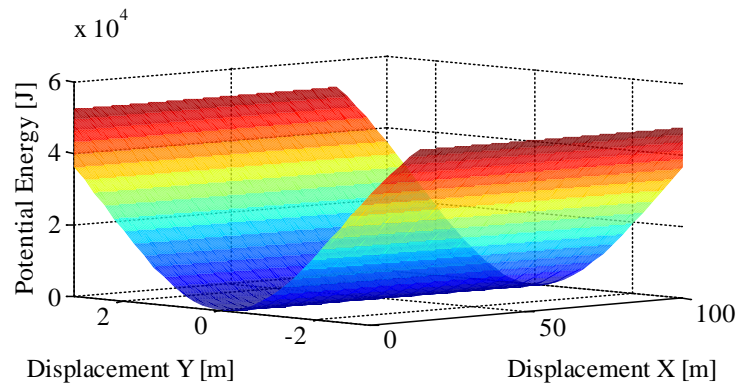


図 4.3 道路境界の斥力ポテンシャル(U_r)

【駐車車両の斥力ポテンシャル】

駐車車両の長さが既知であることを前提とし, 駐車車両の斥力ポテンシャル U_o は式(4.2)で定義される。

$$U_o(X, Y) = \begin{cases} w_o \exp \left\{ - \frac{(X - X_{or})^2}{\sigma_{oX}^2} - \frac{(Y - Y_o)^2}{\sigma_{oY}^2} \right\} & (X \leq X_{or}) \\ w_o \exp \left\{ - \frac{(Y - Y_o)^2}{\sigma_{oY}^2} \right\} & (X_{or} < X < X_{of}) \\ w_o \exp \left\{ - \frac{(X - X_{of})^2}{\sigma_{oX}^2} - \frac{(Y - Y_o)^2}{\sigma_{oY}^2} \right\} & (X \geq X_{of}) \end{cases} \quad (4.2)$$

ただし, w_o は駐車車両の斥力ポテンシャルの重み, σ_{oX} , σ_{oY} はそれぞれ X 方向の分散, Y 方向の分散を示す。また X_{or} , X_{of} はそれぞれ駐車車両後端の X 座標, 前端の X 座標

を示し、 Y_o は駐車車両の重心点の Y 座標を示す。駐車車両の斥力ポテンシャルの形状例を図4.4に示す。駐車車両の位置が最もポテンシャルが高い形状となる。

ここで、式(4.1)、式(4.2)に含まれる w_r 、 σ_r 、 σ_{oX} 、 σ_{oY} はポテンシャルの高さや形状を変更するパラメータとなっている。これらは、実際の熟練ドライバの運転行動に基づき最適化する。この最適化によって、熟練ドライバが読む潜在リスクは、ポテンシャルに内包される。

以上より、各ポテンシャルの総和をそのシーンにおける全体のポテンシャルとし、式(4.3)で定義する。

$$U_t(X,Y) = U_r(X,Y) + U_o(X,Y) \quad (4.3)$$

ただし、 U_t は全体ポテンシャルである。全体のポテンシャル形状を図4.5に示す。

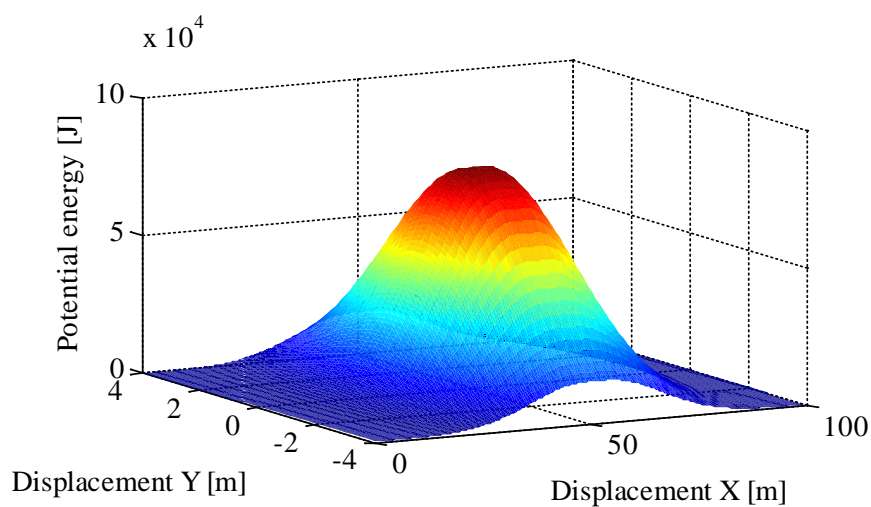


図 4.4 駐車車両の斥力ポテンシャル(U_o)

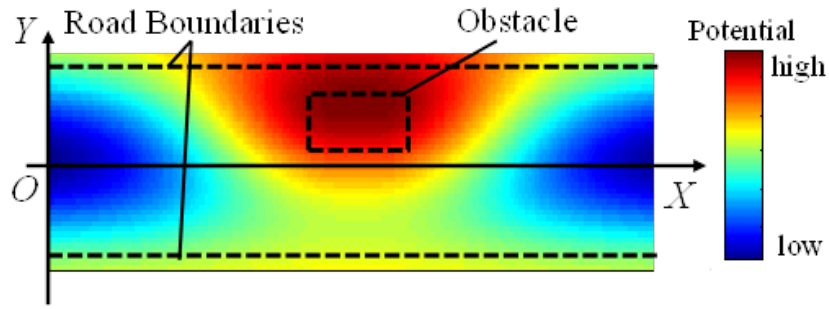


図 4.5 全体のポテンシャル($U_r + U_o$)

次に目標ヨーレイトの算出法を述べる．その算出法は，サンプリングタイムごとに複数の予測経路を算出し，リスクポテンシャルと入力値を考慮した評価関数が最小となる予測経路を選択することで，車両の目標軌跡を演算するものである．

まず，複数の目標ヨーレイト候補 $\gamma_p(i_y)$ の範囲を式(4.4)で定義する．

$$\gamma + \gamma_{p_min} \leq \gamma_p(i_y) \leq \gamma + \gamma_{p_max} \quad (4.4)$$

ただし γ_{p_max} , γ_{p_min} はそれぞれ現在のヨーレイトと目標ヨーレイト候補の差の最大値，最小値を示し， $i_y = 0, 1, 2, \dots, M_y$ とする．また M_y は予測ホライズンを示す．ここで目標ヨーレイト候補の探索範囲は，現在のヨーレイトに応じて変化する．これは，車両の運動のダイナミクスを考えた場合，横運動は連続したものであることから，現在のヨーレイトを基準に探索することで，過小な，または過剰な探索を行わないための工夫である．この工夫は，実車実験において，計算負荷の低減に大きく寄与する．

予測時間は式(4.5)で定義する．

$$t_{p_y}(j_y) = \Delta t_{p_y} j_y \quad (j_y = 0, 1, 2, \dots, N_y) \quad (4.5)$$

ただし Δt_{p_y} はサンプリング周期， N_y は予測ホライズンを示す．

自車の予測位置 X_{p_y} , Y_{p_y} は，自車の重心点での横滑り角が微小であると仮定することで，式(4.6)，(4.7)で定義する．

$$X_{p-y}(i_y, j_y) = X_e(t) + \int_t^{t+t_{p-y}(j_y)} (V(t) + a_x(t)t) \cos(\psi(t) + \gamma_p(i_y)t) dt \quad (4.6)$$

$$Y_{p-y}(i_y, j_y) = Y_e(t) + \int_t^{t+t_{p-y}(j_y)} (V(t) + a_x(t)t) \sin(\psi(t) + \gamma_p(i_y)t) dt \quad (4.7)$$

ただし、 X_e 、 Y_e はそれぞれ自車の X 、 Y 座標、 V は自車速度、 a_x は自車前後加速度、 ψ は自車ヨー角を示す。

以上の手順で求められる予測位置の概要図を図 4.6 に示す。サンプリングタイムごとの予測位置を算出することで、各目標ヨーレイト候補に基づく予測経路が決定される。

最後に、各目標ヨーレイトに基づく経路候補に対し、式(4.8)で定義される評価関数の評価値 J を求める。

$$J = \sum_{j=1}^{N_y} (U_t(X_{p-y}(i_y, j_y), Y_{p-y}(i_y, j_y)) + r_y \gamma_p^2) \quad (4.8)$$

ただし r_y はヨーレイト入力に対する重みを示す。

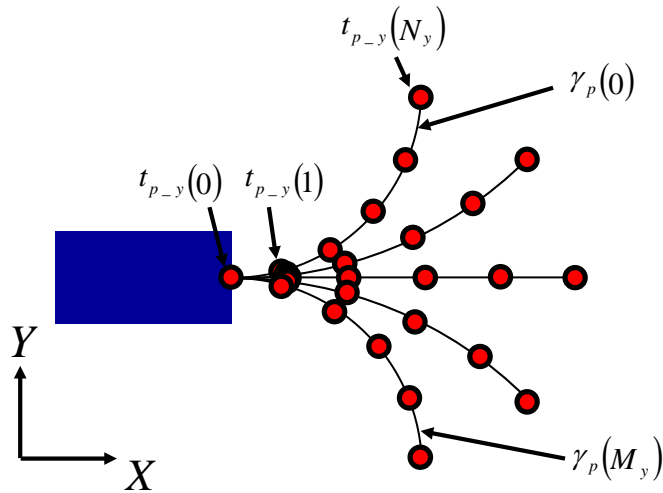


図 4.6 各目標ヨーレイト候補に基づく予測経路

得られた評価値を比較し，最小の値となる目標ヨーレイト候補をそのステップでの規範ヨーレイト γ^* とする(式(4.9)).

$$\gamma^*(t) = \min_{\gamma_p(i,y)}(J) \quad (4.9)$$

ここで，式(4.8)の右辺第1項はポテンシャルの大きさを，右辺第2項は，目標ヨーレイト候補の大きさをあらわしている．すなわち，式(4.9)で得られた目標ヨーレイトは，ポテンシャルの最小と運動の滑らかさを両立する指令値となる．

4.3 操舵反力制御部の設計

横運動計画部で得られた規範ヨーレイトを用いて，規範ステアリング舵角を式(4.10)で定義する．

$$\theta_{sw}^* = nG_{\delta}^{\gamma}(0)^{-1}(\gamma^* - G_M^{\gamma}(0)M_z) \quad (4.10)$$

ただし， n はステアリングギヤ比， M_z は DYC 入力量である（その他の係数は，参考文献[91]を参照のこと）．

得られた規範ステアリング舵角は，第2章の式(2.2)と同じ形式で，操舵反力制御部の反力制御トルク演算に用いられる．

$$T_a = K_a(\theta_{sw}^* - \theta_{sw}) \quad (2.2)$$

ドライバは反力制御トルクを用いながら自身の運転操作を変容させることができ，これによって規範ドライバの運転操作に近づくことができる．実ドライバの運転がより適切な操作になることで，人間—機械の閉ループ系で安全で滑らかな運転操作を実現することが，提案システムの狙いである．

4.4 DYC 制御部の設計

DYC については，第2章で採用した舵角比例制御を発展させ，式(4.11)にて DYC 入力量を決定する．

$$M_z = K_{mz1} \times \frac{\theta_{sw}}{n} + K_{mz2} (\gamma^* - \gamma) \quad (4.11)$$

ただし、 K_{mz1} 、 K_{mz2} はDYCゲイン、 γ は実ヨーレートである。ここでDYCゲイン K_{mz1} は車速依存性を有する。しかしながら本報では、高齢ドライバーのステアリング操作の変容に特に注目するために、車速は市街地路を想定とした40km/hの一定値のみを扱う。そこで今回はDYCゲイン K_{mz1} についても一定値として扱う。右辺第一項は、舵角比例制御であり、ステアリング舵角に応じた横滑り角、ヨーレートの定常ゲインを変化させるためのDYCである。右辺第二項は、ヨーレート偏差フィードバック制御であり、規範ヨーレートと実ヨーレートの僅差分に対して追従性能を確保するためのDYCである。第1報の実験結果からは、操舵誘導制御および舵角比例DYCによって、高齢ドライバーは運転操作を変容させようとすることを確認している。一方で、高齢ドライバーによっては、ステアリングを用いた規範教示を理解するものの、的確に倣うことが出来ない場合があることも知見として得ている。こうした背景から、本報ではDYCに安定化制御を追加し、人間機械の協調度合を安定的に高めることを狙う。

以上を纏めると、駐車車両回避におけるShared controlの制御系設計のブロック図は図4.7となる。

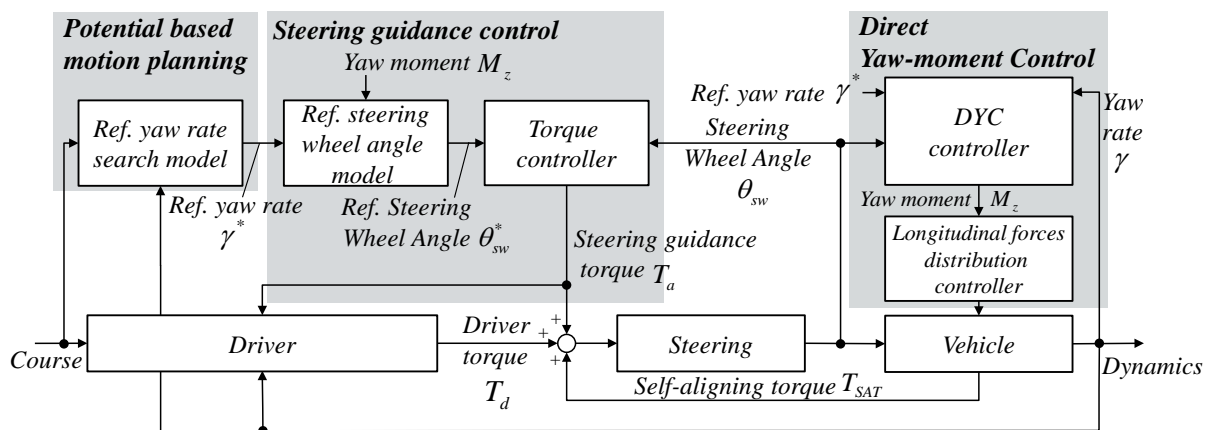


図 4.7 駐車車両回避における Shared control ブロック図

4.5 シミュレーションによる制御設計の有効性評価

4.5.1 シミュレーション条件

提案する制御系の有効性を評価するために，駐車車両回避シミュレーションをおこなった．題材とする駐車車両回避場面を図 4.8 に示す．またシミュレーションに用いたパラメータを表 4.1，表 4.2 に示す． $K_a=4.0$ Nm/rad は，手放し運転による駐車車両回避を行うことが出来なく，あくまで操舵誘導としてドライバが主体的に運転できる強さである．DYC ゲインのうち舵角比例 DYC のゲインについては $K_{mz1}=40 \times 10^3$ Nm/rad とし，第 2 章と同じ大きさとした．一方，ヨーレイト偏差フィードバック DYC のゲインについては， $K_{mz2}=10 \times 10^3$ Nms/rad とし，舵角比例 DYC とヨーレイト偏差フィードバック DYC の絶対量が同程度となるように試行錯誤的に求めたものである．ポテンシャルに関するパラメータは，長谷川らの先行研究で決定された熟練ドライバの運転行動解析に基づいた値を用いた[108]．なお，操舵反力ゲインは，操舵反力制御，操舵反力制御+DYC とともに $K_a=4$ Nm/rad で固定した．

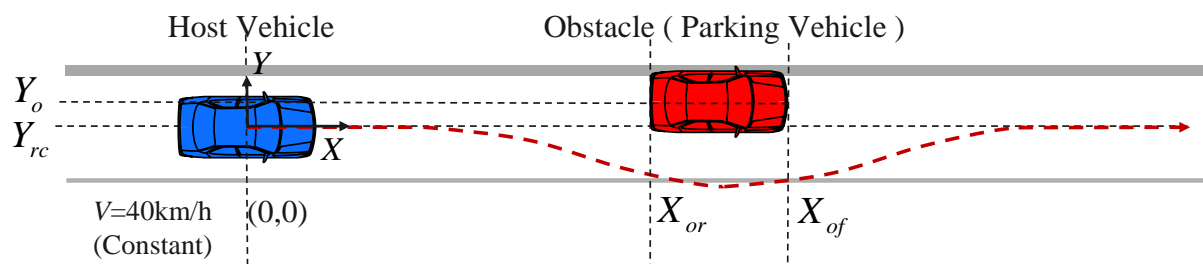


図 4.8 シミュレーションで検討する駐車車両回避シーン

表 4.1 計算条件

<i>Type</i>	$K_a[Nm/rad]$	$K_{mz1}[Nm/rad]$	$K_{mz2}[Nms/rad]$
Without control	0	0	0
Steering control	4.0	0	0
Steering control + DYC	4.0	40×10^3	10×10^3

表 4.2 ポテンシャル関係のパラメータ

<i>Definition</i>	<i>Symbol</i>	<i>Value</i>	<i>unit</i>
X-axis of the obstacle rear end	X_{or}	67.58	m
X-axis of the obstacle front end	X_{of}	72.42	m
Y-axis of the obstacle gravity center	Y_o	0.9	m
Y-axis of the road center	Y_{rc}	0	m
Weight of U_r	w_r	7.4×10^4	—
Y-variance of U_r	σ_r	2.4	—
Weight of U_o	w_o	9.9×10^4	—
X-variance of U_o	σ_{oX}	25.0	—
Y-variance of U_o	σ_{oY}	2.8	—
Minimum value of $\gamma_p - \gamma$	γ_{p_min}	-0.3	rad/s
Maximum value of $\gamma_p - \gamma$	γ_{p_max}	0.3	rad/s
Sampling cycle of γ_p	$\Delta\gamma_p$	0.001	rad/s
Predictive horizon of γ_p	M_y	600	—
Sampling cycle of t_{p-y}	Δt_{p-y}	0.1	s
Predictive horizon of t_{p-y}	N_y	15	—
Weight of γ_p	r_y	70	—

ステアリングモデルは、式(2.6)の線形ステアリングシステムとし、車両モデルは、線形2輪モデルを用いた。使用した車両パラメータは第2章の表2.4と同じである。

実際のドライバを模擬するドライバモデルには、第2章で示した式(2.15)の前方注視ドライバモデルを用いた。選定したドライバモデルのパラメータを表4.3に示す。本前方注視ドライバモデルは、ドライバの目標軌跡を定義する必要がある。そこで本シミュレーションでは、ドライバの操舵が39m手前から回避を始め、2.5mの側方間隔を取りながら駐車車両を回避すると仮定し(図4.9)、またそのための操舵入力はsin波であると仮定することで、これらの仮定条件から解析的な計算をおこなうことで目標軌跡を決定した。

表 4.3 ドライバモデルパラメータ

Definition	Symbol	Value	Unit
Visual time constant	τ_v	0.2	s
Preview time	T_p	1.2	s
Visual steering gain	H	1.1	N
Haptic time constant	τ_h	0.05	s
Haptic steering gain	K_h	-1.0	-
Vehicle velocity	V	40	km/h

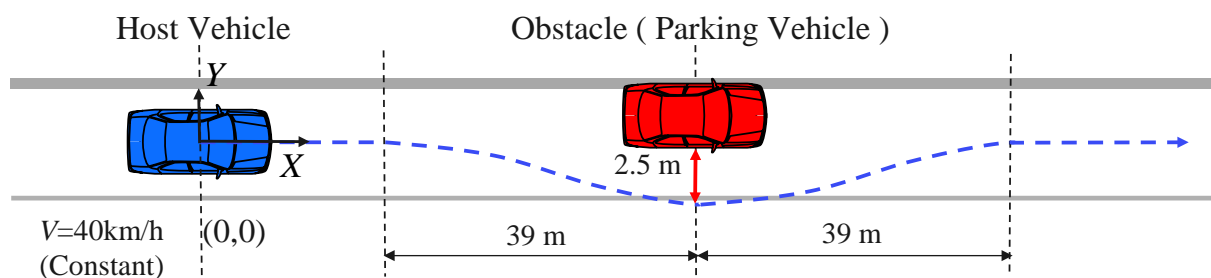
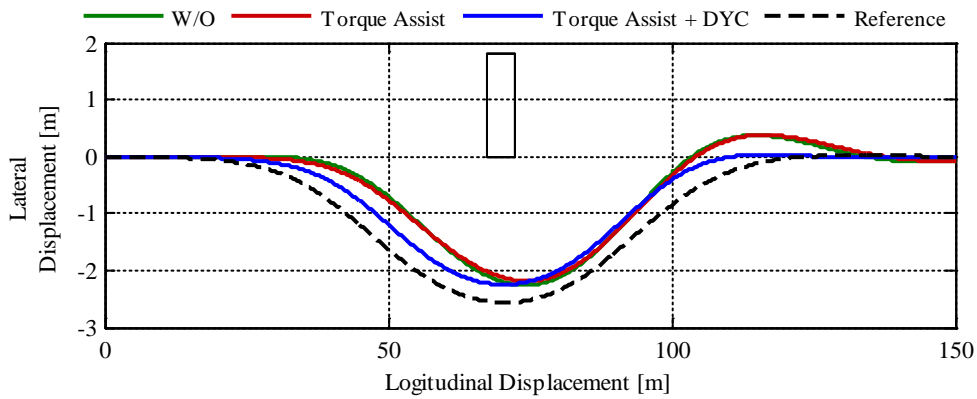


図 4.9 ドライバの目標軌跡の与え方

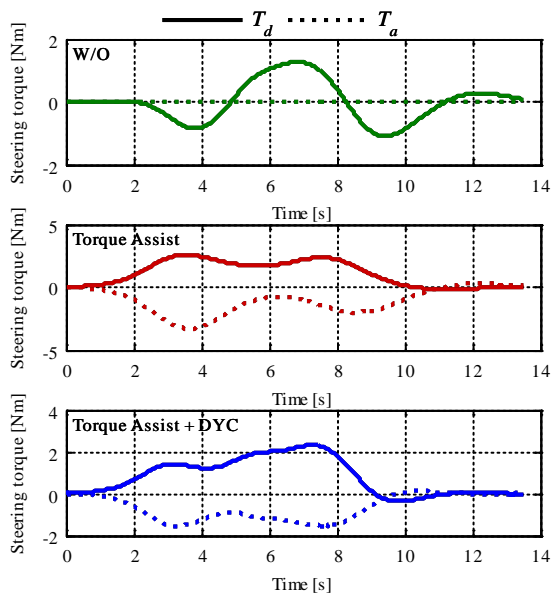
4.5.2 シミュレーション結果

非制御，操舵反力制御，操舵反力制御+DYCの3条件について，計算結果を図4.10に示す．ここで，黒色実線の四角は駐車車両を表す．はじめに非制御と操舵反力制御を比較すると，車両軌跡(a)に大きな違いが見られない．これは，ドライバの目標軌跡が操舵反力トルクを与えても変化しないことに起因する．ステアリングまわりのトルク(b)をみると，ドライバトルクは非制御に比べ大きな入力に変化している．これは，前方注視ドライバモデルの第一項の視覚トルクに起因する．本論文で示した前方注視ドライバモデルは，反力制御トルクによって第二項の力覚トルク入力は変化するが，目標軌跡は固定のため，第一項の視覚トルクは，反力制御トルクを相殺し事前に設定したドライバの目標軌跡に近づくように発生する．

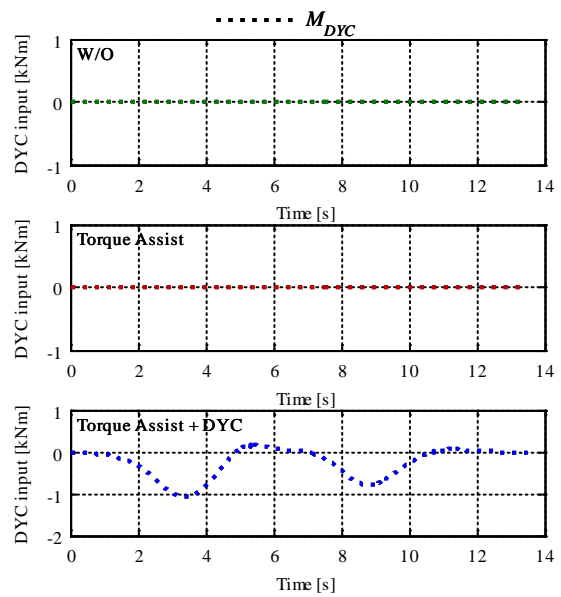
操舵反力制御+DYCに注目すると，車両軌跡(a)に変化が確認できる．これはDYC制御則のうち右辺第2項のヨーレイト偏差フィードバック制御が効果を発揮していると考えられる．第1項のステアリング舵角比例制御は，ドライバの運転操作に比例した入力であるが，第2項はドライバの運転操作に直接的な影響を受けない．このためDYCを加えた場合，ヨーレイト偏差フィードバック制御の効果によって車両軌跡が規範軌跡に一致する方向に変化したと説明することができる．DYCを加えることで，100mから130mで発生していた車両横変位のオーバーシュートが低減されていることは特筆される．DYC入力の時刻歴応答(c)をみると，100mの位置をピークとして負の制御量が発生している．負の制御量とは，車両をより規範軌跡に近づける方向の制御であると共に，車両横変位のオーバーシュートを抑制する方向でもある．操舵反力制御の条件で発生した車両横変位のオーバーシュートが，ステアリングから伝わる規範教示にドライバが的確に倣うことが出来ていない結果に起因すると仮定すれば，DYCは狙い通り，人間機械の協調度合いを安定側に高めるために作用していると考えられる．



(a)車両軌跡



(b)ステアリングまわりのトルク



(c)DYC 入力量

図 4.10 駐車車両回避シミュレーションの時刻歴応答

最後にドライバトルクと操舵支援トルクの差の二乗積分の結果を図 4.11 に示す. ここで, 積分区間はシミュレーション開始時($t=0s$)から終了時($t=13.5s$)とした. ドライバトルクと操舵支援トルクでは両者の差が小さいほどドライバの感じる誘導感が小さいことを示すが DYC を加える事で, 同じ操舵反力トルクゲインでありながら, その誘導感が低減していることが確認される.

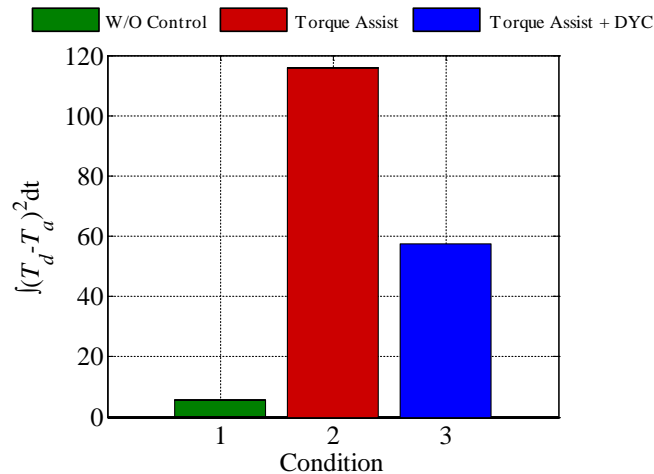


図 4.11 ステアリングの二乗積分値

(ここで、1: 非制御, 2: 操舵反力制御, 3: 操舵反力制御+DYC をしめす)

4.6 まとめ

本章では、提案する Shared control システムを潜在リスク予測運転シーンに拡張応用するために、リスクポテンシャル最適化に基づいた横運動制御を用いて制御系を構築した。具体的には、駐車車両回避を題材に制御系の設計を行い、駐車車両を安定的に回避し、かつ側方間隔を正しく取るように誘導するための機能として、提案するシステムを評価した。本章で示した主な設計法は次の通りである。

- (1) 基本走行ポテンシャル、顕在リスクポテンシャル、潜在リスクポテンシャルの 3 層を有するポテンシャルの階層構造を示し、その基本的な動作原理を示した。
- (2) 駐車車両回避の場合、道路境界に対する斥力ポテンシャルと、駐車車両に対する斥力ポテンシャルを重ね合わせ、そのシーンにおける道路環境を表現する。ポテンシャルの高さや形状は熟練ドライバーの運転行動データに基づき最適化されることで、熟練ドライバーが読む潜在リスクをポテンシャルに内包させる。

- (3) 規範ステアリング舵角は，設定されたポテンシャル場に対して目標ヨーレイトを探索的に決定することで演算される．この演算は，ポテンシャルの最小化と運転の滑らかさを両立する評価関数をサンプリング周期ごとに解くことでおこなわれる．
- (4) DYC 制御部には，第 2 章で得られた知見を反映し，舵角比例制御とヨーレイト偏差フィードバック制御を組み合わせた．ヨーレイト偏差フィードバック制御は，規範ヨーレイトと実ヨーレイトの偏差分に対して追従性能を確保するための DYC である．DYC に安定化制御を追加することで，人間機械の協調度合いを安定化させることを目的とする．
- (5) 人間・機械協調系のモデルを用いて，駐車車両回避シミュレーションをおこなった．シミュレーションの結果からは，DYC を加えることで，ドライバの運転操作によって発生していた車両軌跡のオーバーシュートが抑制されることが確認された．この結果は，DYC が狙い通りに安定化制御として働いていることを示すものである．

第 5 章

潜在リスク予測型シェアード・コントロール の実験的検討

5.1 はじめに

第 4 章で提案したシステムの有効性を検証するために、第 3 章と同じく東京農工大学のドライビングシミュレータ(以下、DS とする)を用いて実験をおこなう。第 3 章では、若年ドライバ 10 名と高齢ドライバ 8 名によるシングルレーンチェンジ実験をおこない、年齢層による支援効果の違いについて考察をおこなった。実験の結果からは、高齢ドライバの方がその効果が顕著であることが示された。そこで第 5 章では、高齢ドライバの運転行動の変化について、より詳細な評価をおこなう。13 名の高齢ドライバを被験者とした駐車車両回避実験をおこない、操舵反力制御および DYC が人間—機械系の協調特性に与える影響を検討する。

提案する Shared control システムの作用を正しく理解するためには、ドライバと制御システムの協調関係について、その基本原理を解明しなければならない。そこで本章では次の 2 つを考察する。1 つ目に反力制御トルクゲインの大きさと協調特性の関係を考察する。第 2 章で述べたように、操舵支援ゲインを大きくすると経路追従性能などの制御成績は良くなるが、操舵干渉が大きくなる課題が知られている。このように操舵支援ゲインは、その協調特性を整理する上で重要なパラメータであると考えられる。既往研究では、操舵支援ゲインの大きさと支援効果の関係性については評価が行われているものの、操舵支援のゲインそのものがどのような物理的な意味を持っているのかは丁寧に考察されていない[55] [56] [67]。そこで本章では、車両の運動のダイナミクスを考慮した理論解析をおこない、反力制御トルクゲインの大きさに対して、物理的な意味づけをおこなう。2 つ目にドライバの運転操作の変容に関わる内部パラメータの変化についての考察する。提案システムでは、反力

制御トルクを積極的に使って、ドライバに規範運転を教示し、ドライバの運転操作の変容を促すことを狙っている。その変容がドライバの内部でどのようなメカニズムで起きているのかを正しく整理することが出来れば、Shared control システムの作用メカニズムを、より理論的に説明することができると考えられる。そこで本章では、ドライビングシミュレータ実験で得られた実測値を使って、ドライバモデルの内部パラメータを同定する。制御有無での同定値の変化を評価し、ドライバの運転操作の変容メカニズムを定量的に整理する。

なお、ドライバモデルのパラメータを同定することで、ドライバの運転特性を定量的に評価しようとする試みは、幾つかの代表的な研究がある。例えば阿部らはレーンチェンジの実験をおこない、若年ドライバと高齢ドライバのパラメータ同定をおこなっている[110]。パラメータ同定の結果を用いて、ステアバイワイヤシステムの設計値を最適化すると、人-自動車系のパフォーマンスが改善することを報告している。Ishio らはステアリング系の操舵特性の評点と、パラメータ同定値の関係を評価しており、それらに相関があることを報告している[111]。田中らは腕に重りを付け、身体的負担を与えた場合の操舵実験をおこなっている。身体的負担を与えると、ドライバの伝達関数モデルの周波数応答特性に変化が生じることを明らかにしている[112]。吉田らは、車線変更と横風外乱の2種類の走行パターンに対して、パラメータ同定の差を検証している[113]。被験者5名のデータを解析したところ、横風外乱の走行パターンの方が、位相進み時間と比例ゲインがともに平均値が小さく、ばらつきも小さいことを報告している。堀内らは、横風外乱が作用する環境での操舵支援システムの効果をパラメータ同定値の変化で検証している[92]。操舵支援がある場合と無い場合の2種類を比較すると、操舵支援がある場合は、ドライバの精神的作業負担の指標である微分動作が低減されることを示している。これら上記のドライバモデル同定に関する既往研究は、第1章の図1.22で示したドライバと制御システムの関係で整理すれば、いずれも(a)の車両性能向上、または(b)の制御システム介入に該当する。一方で、本章で示すパラメータ同定の考察は、(c)のShared controlに該当する。このような整理に基づけば、本研究で示す結果は新規性があるといえる。

5.2 実験概要

5.2.1 実験場面

実験場面を図 5.1 に示す。直線路に 3 台の駐車車両が存在する構成である。3 台の駐車車両について、その配置方法は同じとした。このような実験コースを設定した理由は、Shared control によってドライバの運転操作が滑らかで安全なものに変容するかという主題の観点だけではなく、システムが連続的に働く場合に 3 台とも同じような運転ができるのかについても評価をおこなうためである。

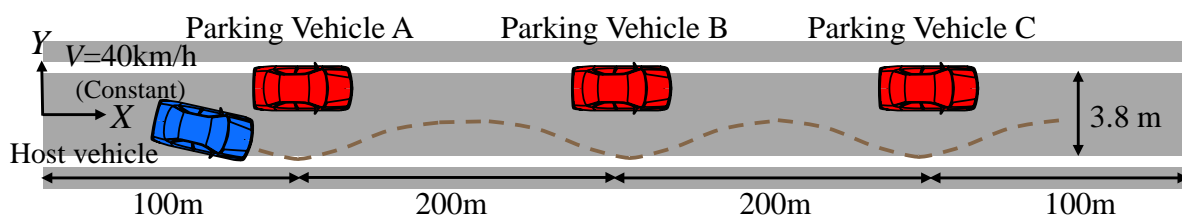


図 5.1 駐車車両回避・コース図

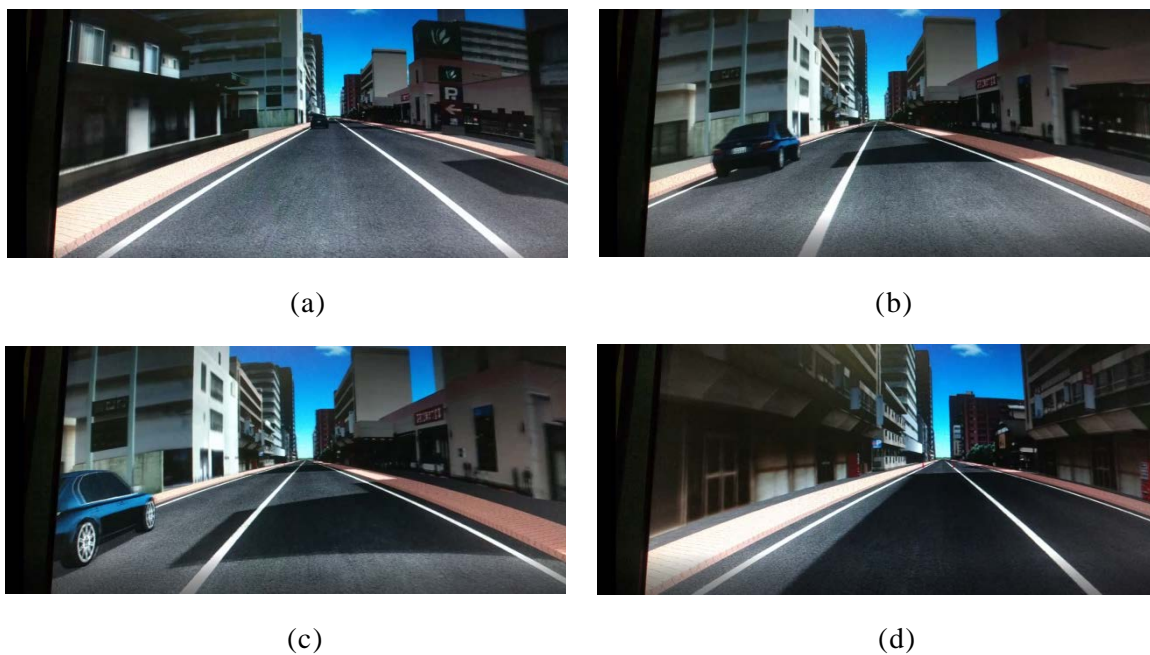


図 5.2 ドライビングシミュレータの前方映像((a)→(b)→(c)→(d))

5.2.2 実験条件・手順

実験は、以下の条件および手順で行う。なお、本実験の実施については、東京農工大学研究倫理委員会の承認を得ている。また、トヨタ自動車株式会社内規「人を対象とする研究倫理ガイドライン運営要領」に従い、倫理審査を受け事前の承認を得て実施された。さらに、被験者からは、インフォームドコンセントを得て実験を行った。具体的には研究の内容、想定される危険性、個人情報管理方法および参加の同意を撤回する権利があることなどを事前に説明し、同意を得た。

実験参加者は、現在も自動車の運転を行っている健康な高齢者 13 名(平均年齢 71 歳)である(表 5.1)。実験では、規範運転を教示するための操舵誘導制御があることを説明し、またその教示に対して、どの程度適切に運転操作を変容できるかを評価することが、本実験の主目的であることを説明した。また、操舵支援のみ(いわゆる手放し運転)では駐車車両を回避できないため、操舵誘導を適切に利用したうえで、主体的に運転するように指示した。実験条件および設定したゲインを表 5.2 にしめす。制御なし、操舵誘導、操舵誘導+DYC の 3 条件をおこなった。制御の有無はドライバーに伝えるものとした。なお、制御演算周期は 0.01s である。

表 5.1 被験者一覧

<i>Subject ID</i>	<i>Age</i>	<i>Sex</i>	<i>Possession term of driver license [year]</i>	<i>Driving frequency [days per a month]</i>	<i>Experiment day</i>
A	66	Male	48	10	2016/2/26
B	66	Female	40	20	2016/2/26
C	66	Male	43	10	2016/2/29
D	76	Male	40	30	2016/2/29
E	68	Male	40	30	2016/3/1
F	77	Male	60	20	2016/3/1
G	68	Female	40	4-5	2016/3/1
H	79	Male	40	4-5	2016/3/1
I	72	Female	50	4-5	2016/3/2
J	42	Male	42	40	2016/3/2
K	70	Female	30	8	2016/3/2
L	70	Female	44	12	2016/3/2
M	70	Female	36	15	2016/3/3

表 5.2 実験条件

<i>Type</i>	<i>Control torque gain K_a [Nm/rad]</i>	<i>DYC gain K_{mz1} [Nm/rad]</i>	<i>DYC gain K_{mz2} [Nms/rad]</i>
Without control	0	0	0
Steering control	4	0	0
Steering control+DYC	4	4×10^4	1×10^4

5.3 実験結果

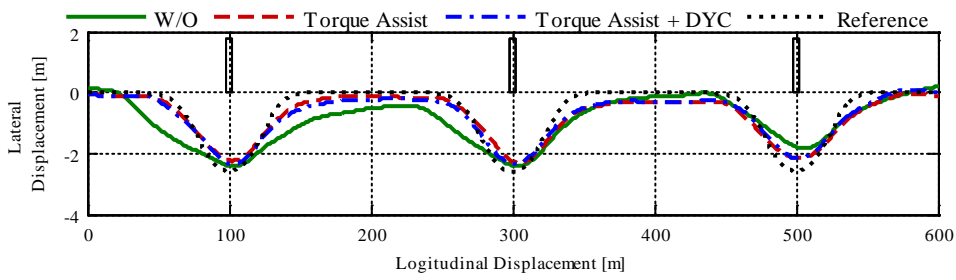
5.3.1 時刻歴応答

若年層の各被験者（被験者 S1～S10）の実験結果のうち，車両軌跡，ヨーレイト，ステアリング舵角，ステアリングトルク，DYC 入力を図 5.3(a)，(b)，(c)，(d)，(e)から図 5.15(a)，(b)，(c)，(d)，(e)に示す。

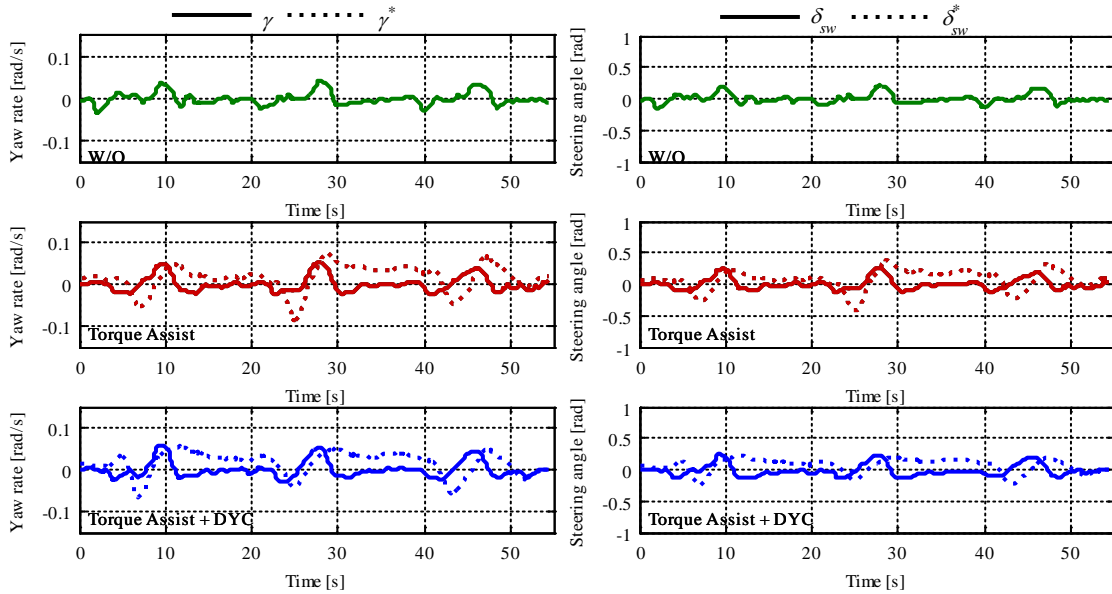
実験結果の代表例として，ドライバ B(左図)とドライバ K(右図)の時系列結果を考察する．はじめに操舵反力制御の効果を確認する．まず走行軌跡(a)に着目する．ここで図中の破線は，ポテンシャル形状を決定する際に用いた規範ドライバの車両軌跡である(本実験では，規範ドライバとして，教習所の運転指導員による実験結果を用いた．以下，規範軌跡 Y_s とする)．ドライバ B は，非制御の場合 3 台の駐車車両に対する回避軌跡には，ばらつきが見られる．特に，駐車車両回避御の道路中心への戻り方に差異が見られる．一方，反力制御トルクが加わると回避軌跡が安定化し，側方間隔の取り方が規範軌跡 Y_s に近づく結果が得られている．ドライバ K は，ドライバ B に比べると非制御における 3 台の駐車車両の回避軌跡は安定的である．ドライバ K については，反力制御トルクが加わることで，側方間隔の取り方が減少側に誘導されていることが特筆できる．

次にステアリングまわりのトルク入力(d)に注目する．ドライバ B，ドライバ K ともに，反力制御トルクによってドライバトルクに変容が起きていることが確認できる．この効果によって，3 段目にしめすステアリング舵角は，微小なふらつきが減り，滑らかな波形に変化している．

次に DYC の効果を確認する．改めて回避軌跡(a)に注目すると，ドライバ B は，例えば 280m 付近の 2 台目の駐車車両回避に対して，その開始タイミングに改善が確認できる．またドライバ L では，例えば 500m から 600m 付近の車線中央に戻る部分に対して，誘導成績が向上している．またステアリングまわりのトルク(d)に着目すると，DYC を組み合わせることで，ドライバ B，ドライバ K ともに，トルク入力の滑らかさがより増大している．さらにステアリング舵角(c)では，その絶対値が小さくなっていることも確認できる．

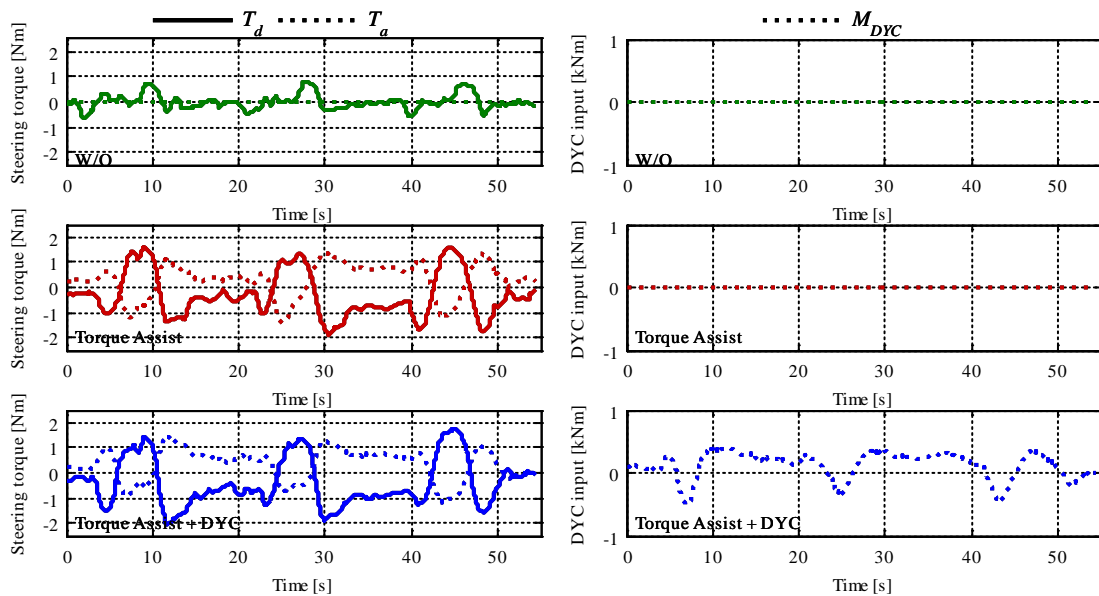


(a) Vehicle trajectory



(b) Time history of yaw rate

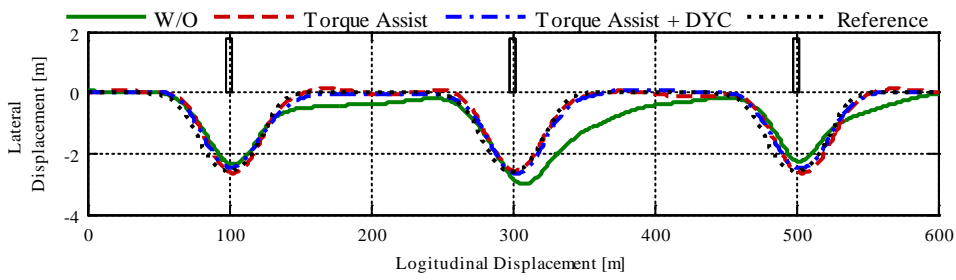
(c) Time history of steering angle



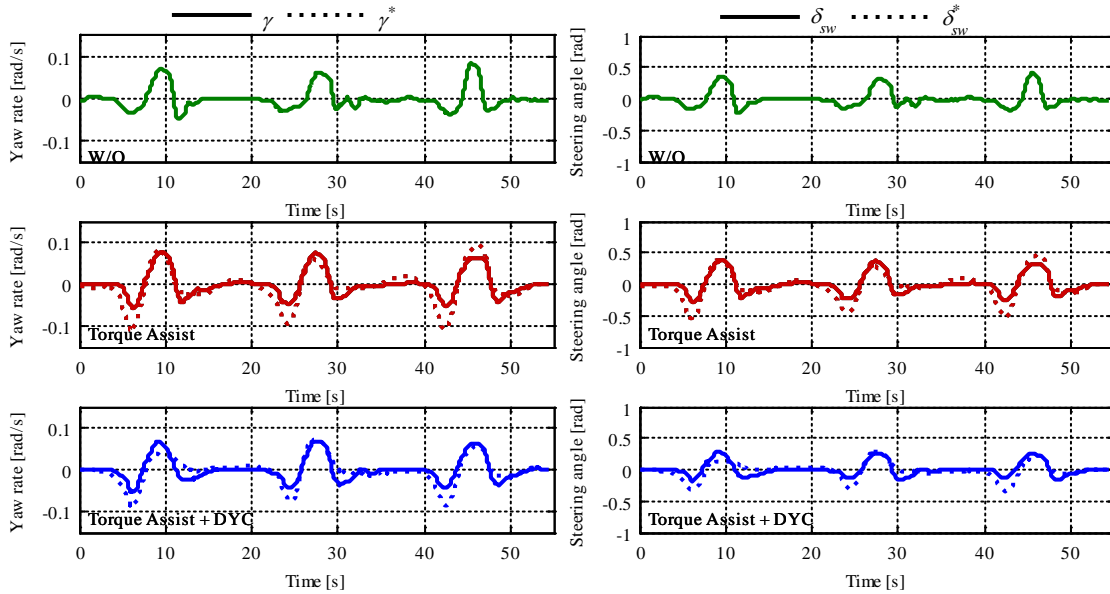
(d) Time history of steering torque

(e) Time history of DYC input

図 5.3 時刻歴応答 (高齢ドライバ Subject A)

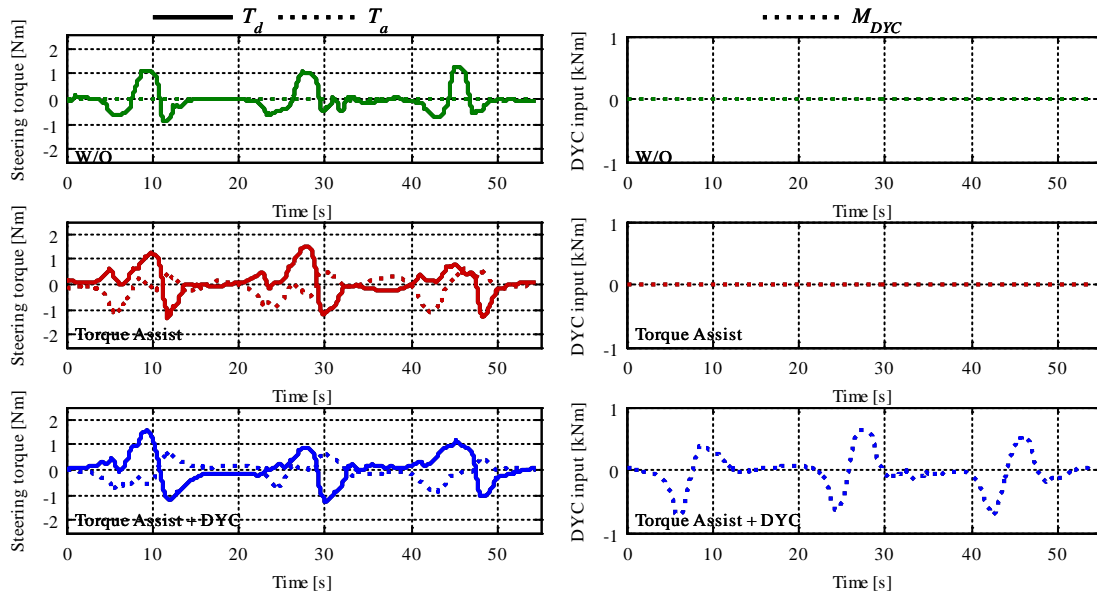


(a) Vehicle trajectory



(b) Time history of yaw rate

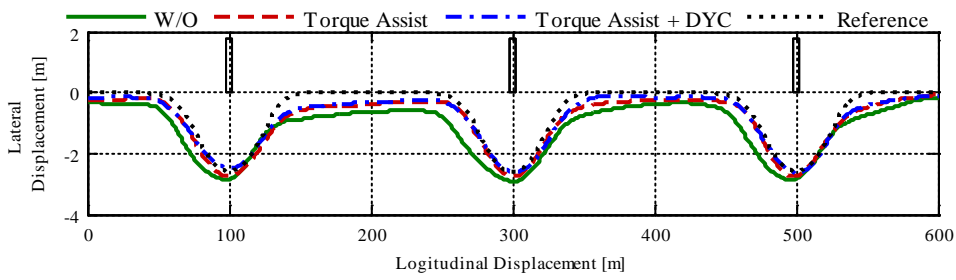
(c) Time history of steering angle



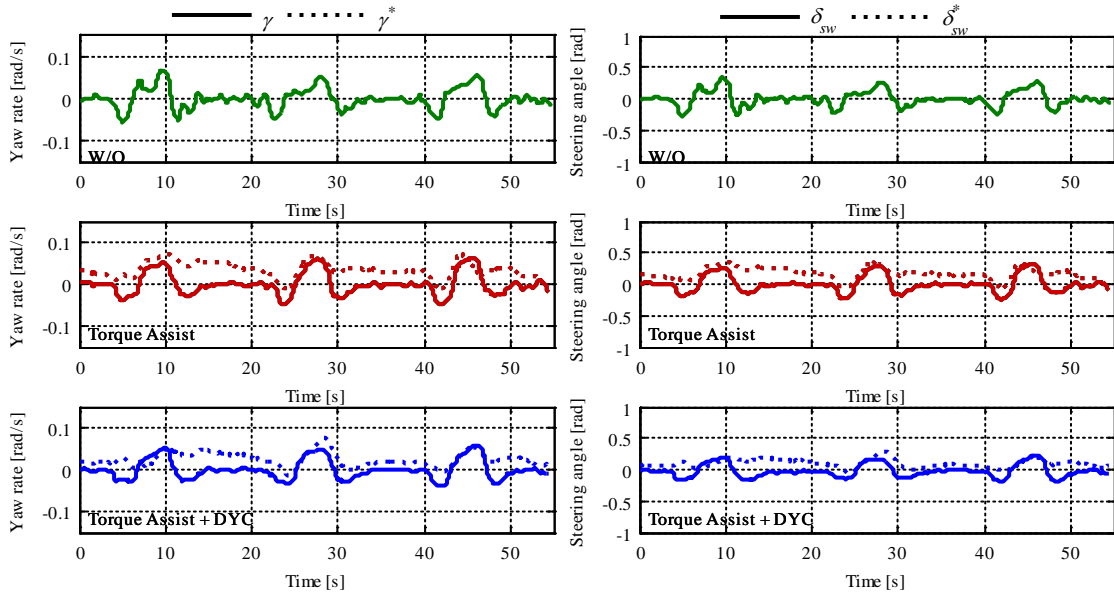
(d) Time history of steering torque

(e) Time history of DYC input

図 5.4 時刻歴応答 (高齢ドライバ Subject B)

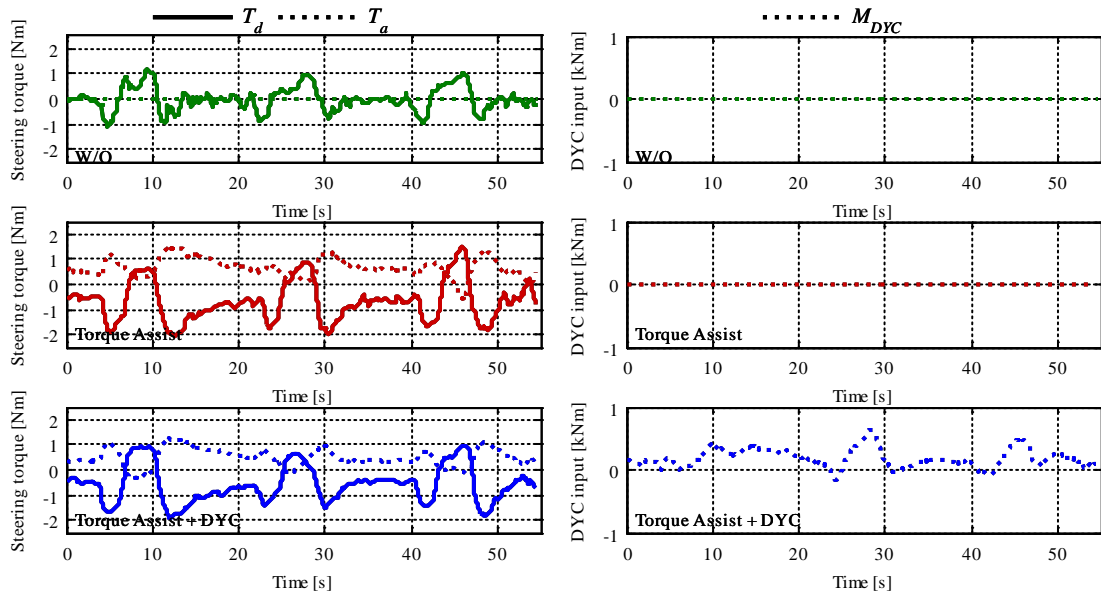


(a) Vehicle trajectory



(b) Time history of yaw rate

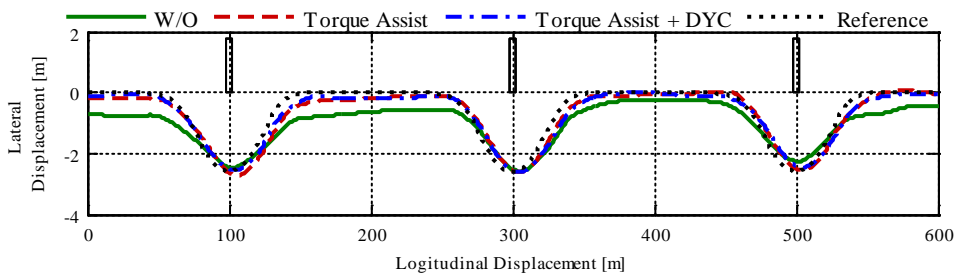
(c) Time history of steering angle



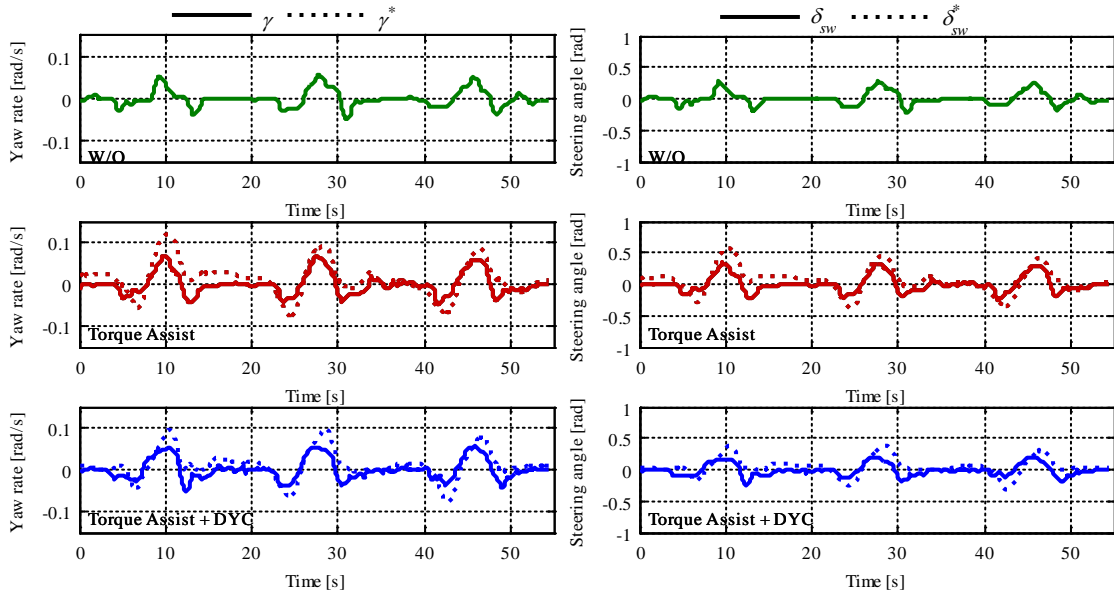
(d) Time history of steering torque

(e) Time history of DYC input

図 5.5 時刻歴応答 (高齢ドライバ Subject C)

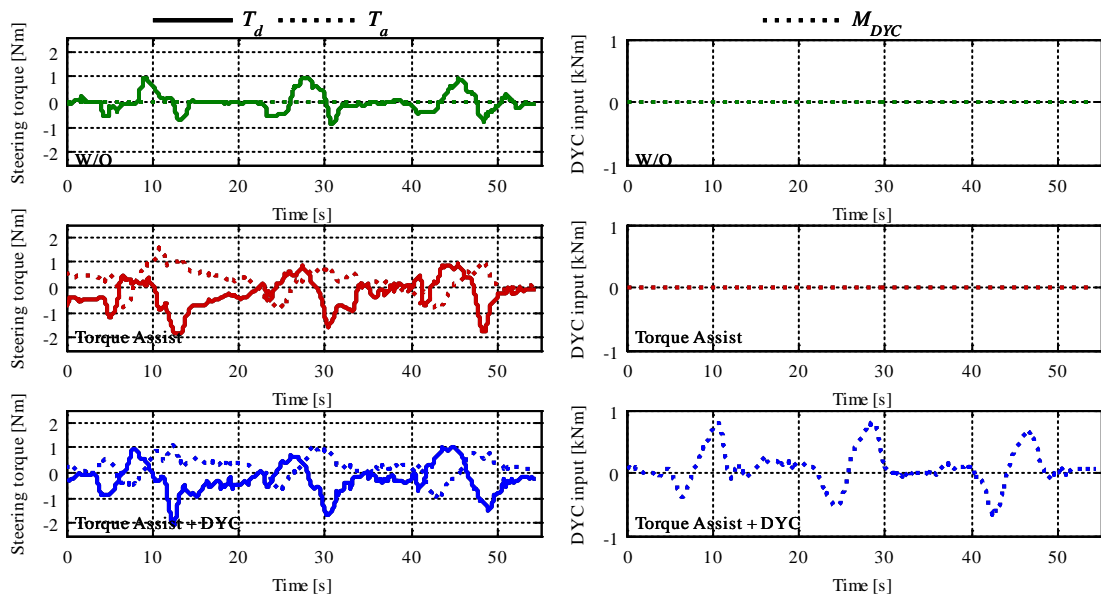


(a) Vehicle trajectory



(b) Time history of yaw rate

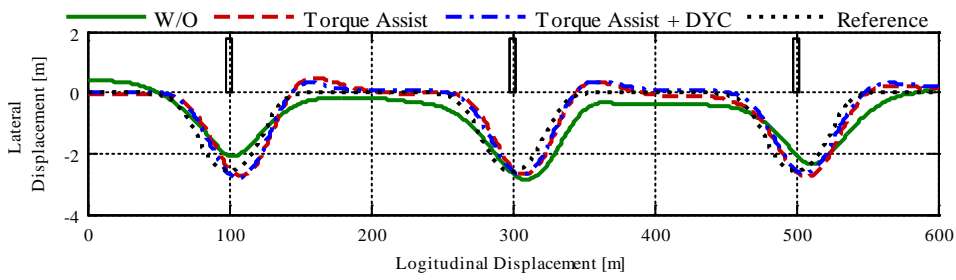
(c) Time history of steering angle



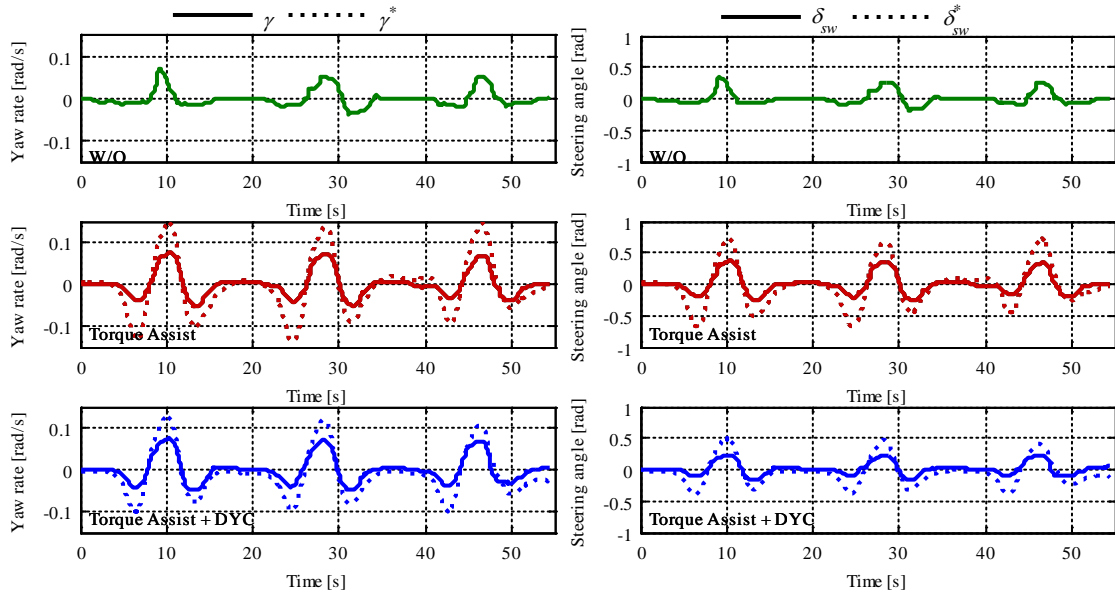
(d) Time history of steering torque

(e) Time history of DYC input

図 5.6 時刻歴応答 (高齢ドライバ Subject D)

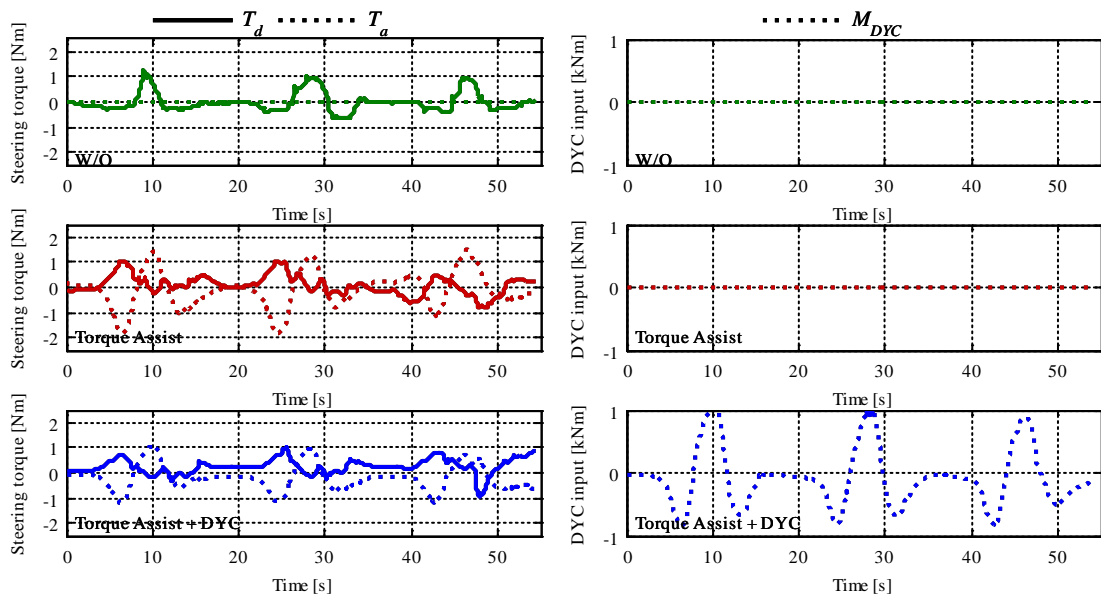


(a) Vehicle trajectory



(b) Time history of yaw rate

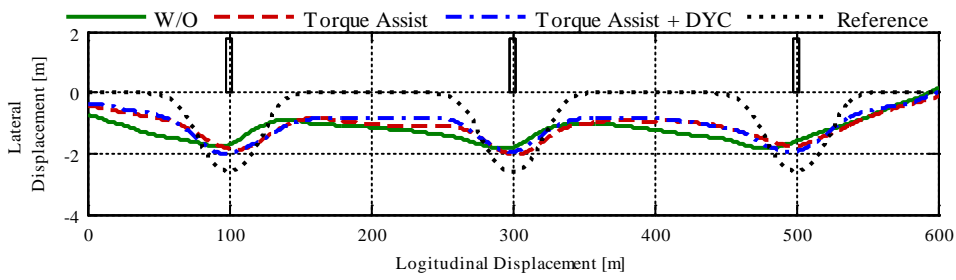
(c) Time history of steering angle



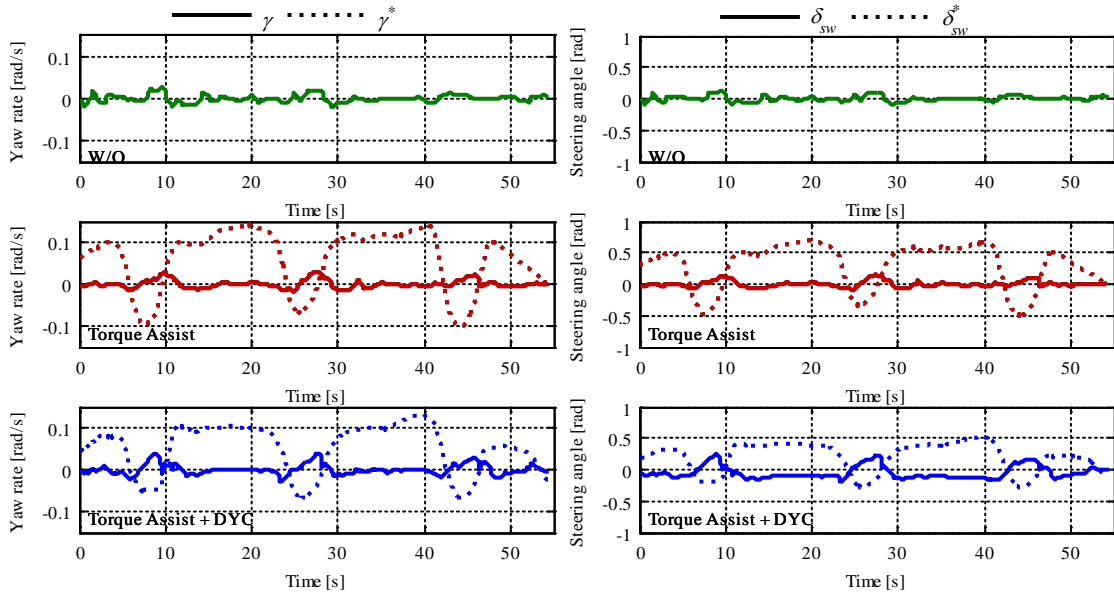
(d) Time history of steering torque

(e) Time history of DYC input

図 5.7 時刻歴応答 (高齢ドライバ Subject E)

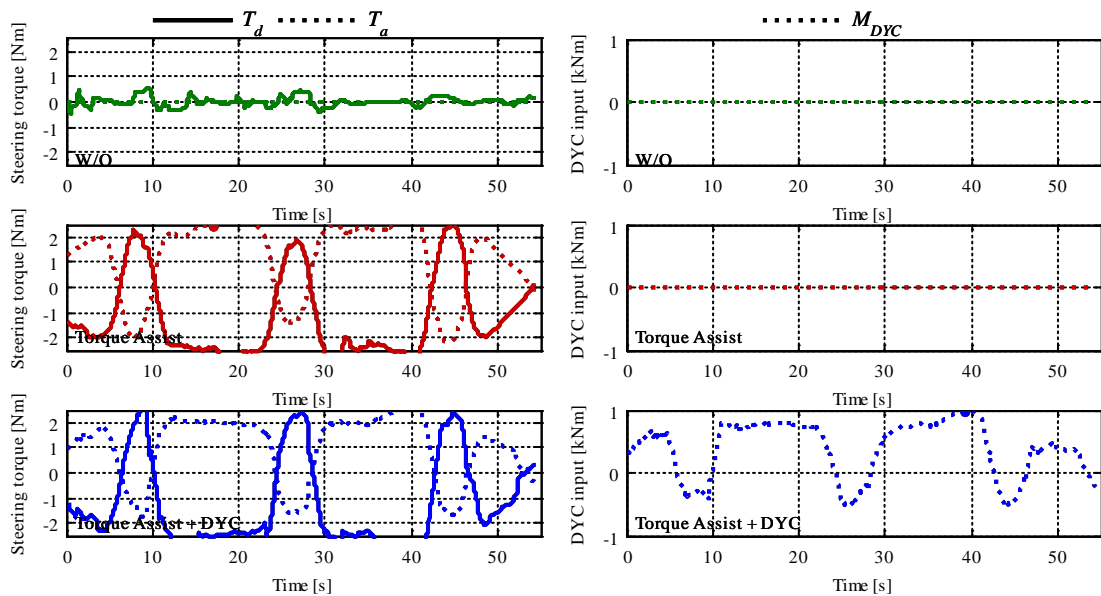


(a) Vehicle trajectory



(b) Time history of yaw rate

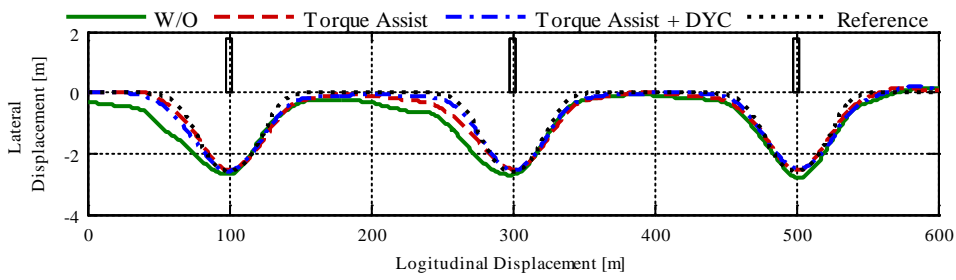
(c) Time history of steering angle



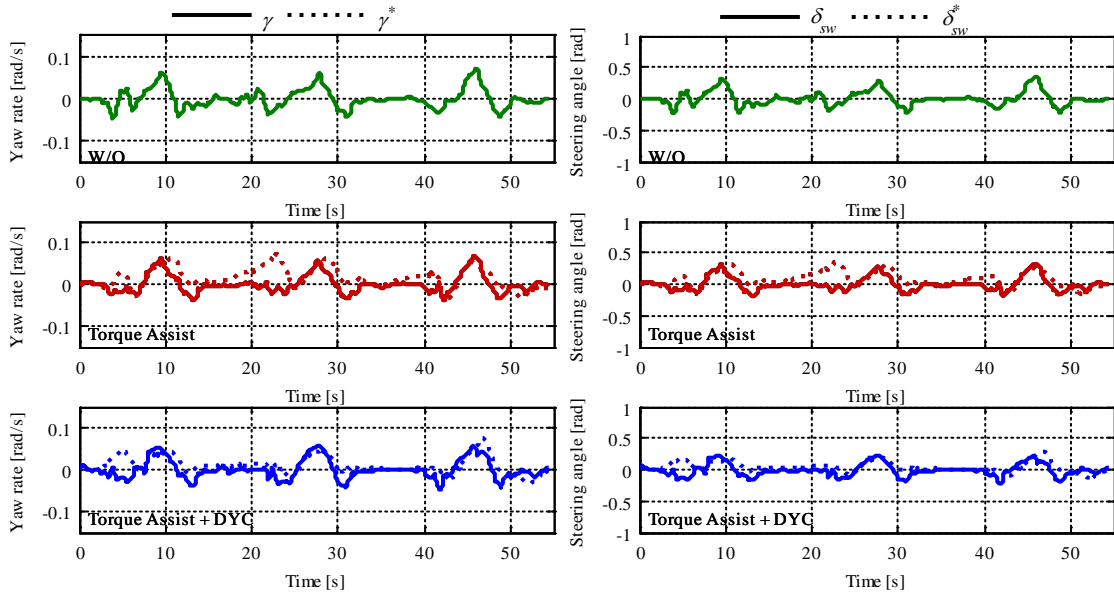
(d) Time history of steering torque

(e) Time history of DYC input

図 5.8 時刻歴応答 (高齢ドライバ Subject F)

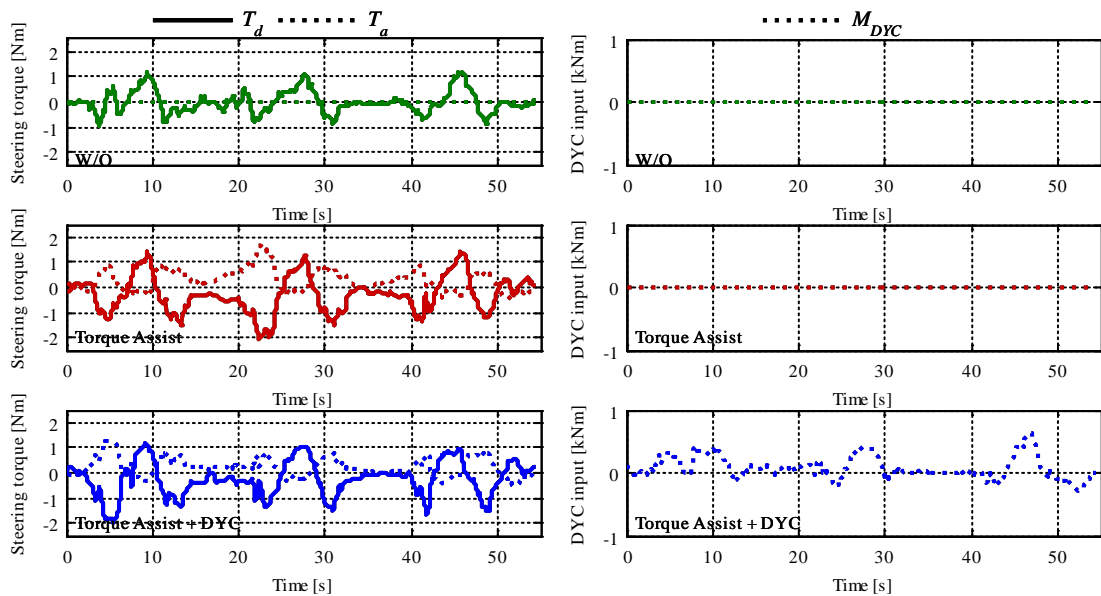


(a) Vehicle trajectory



(b) Time history of yaw rate

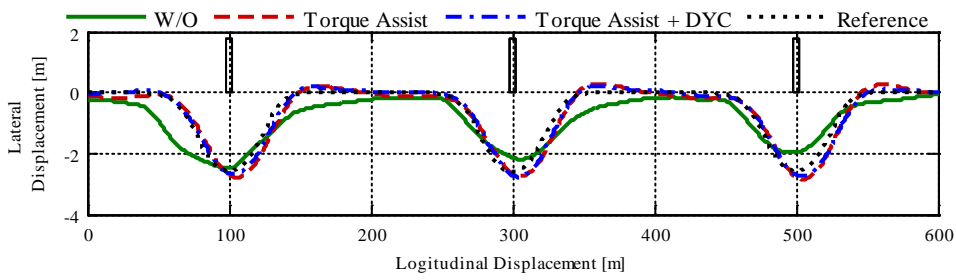
(c) Time history of steering angle



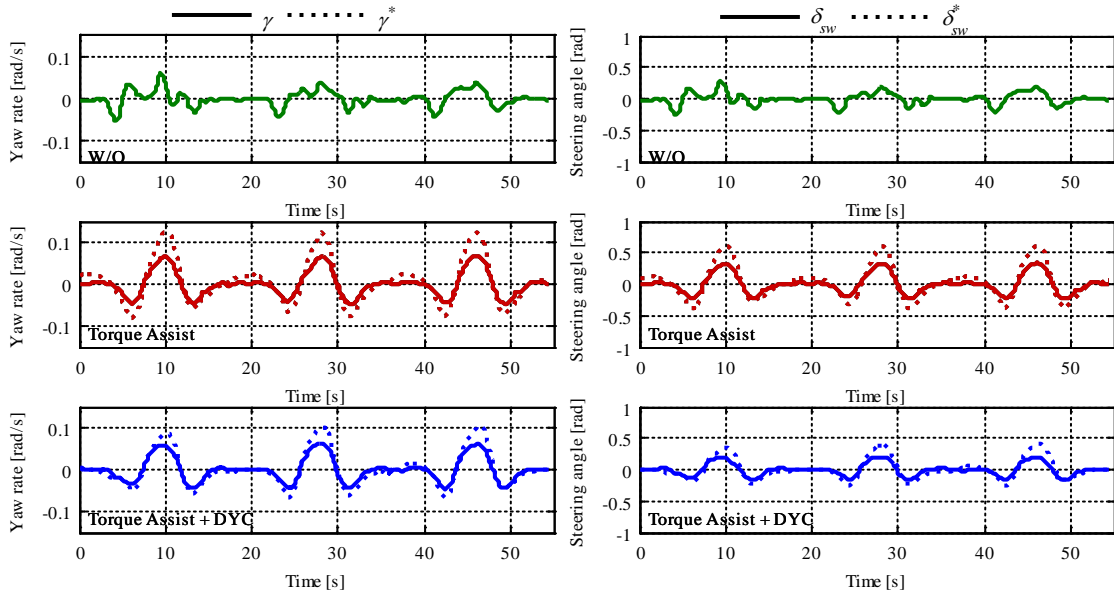
(d) Time history of steering torque

(e) Time history of DYC input

図 5.9 時刻歴応答 (高齢ドライバ Subject G)

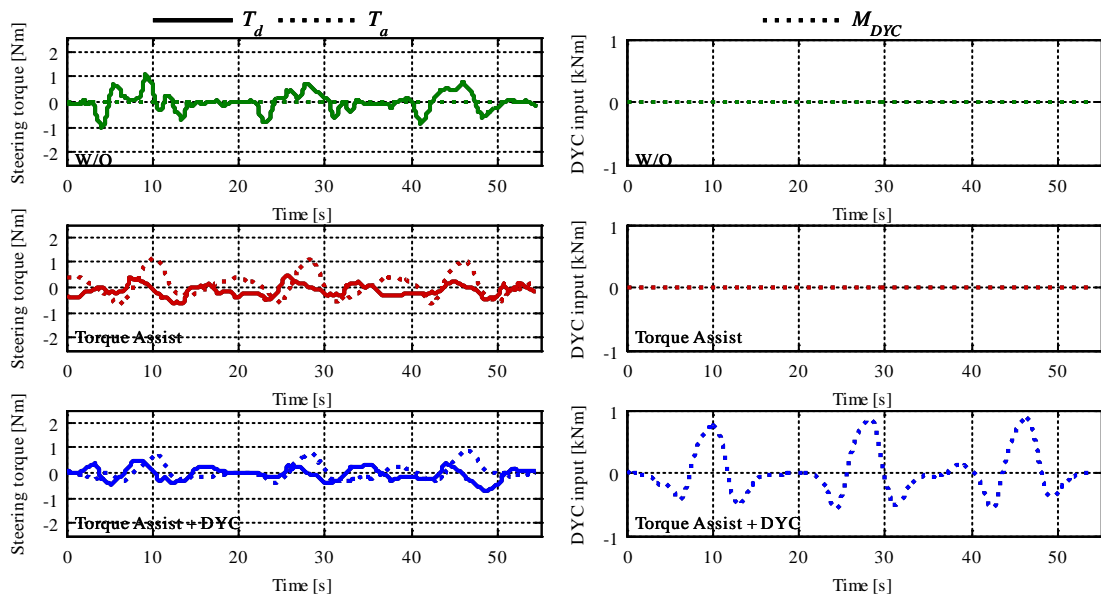


(a) Vehicle trajectory



(b) Time history of yaw rate

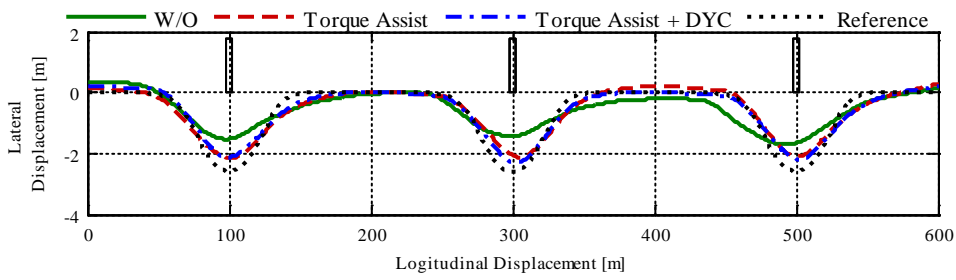
(c) Time history of steering angle



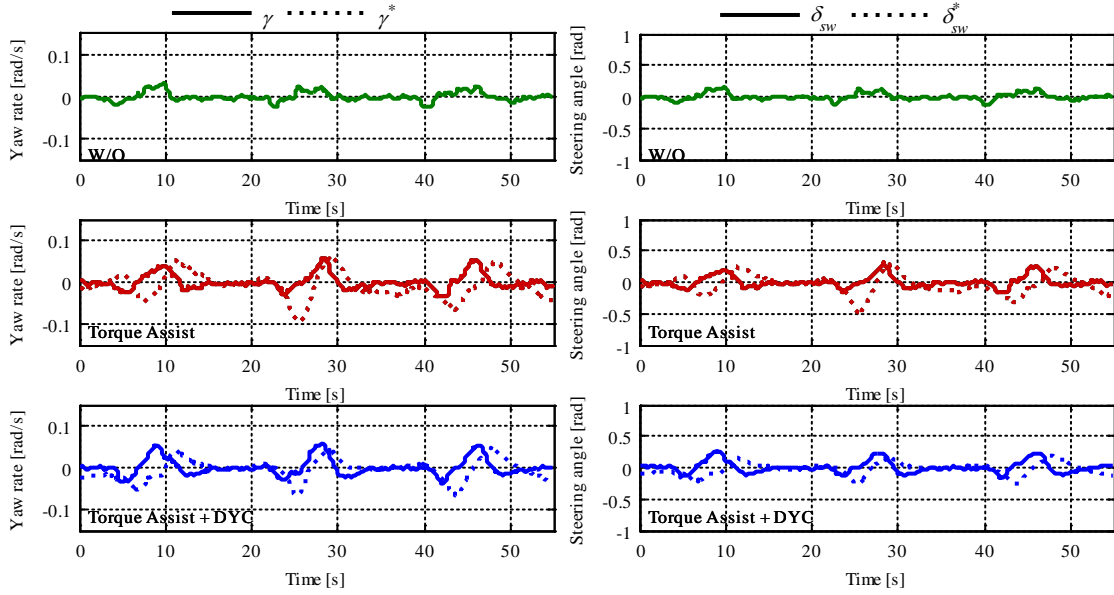
(d) Time history of steering torque

(e) Time history of DYC input

図 5.10 時刻歴応答 (高齢ドライバ Subject H)

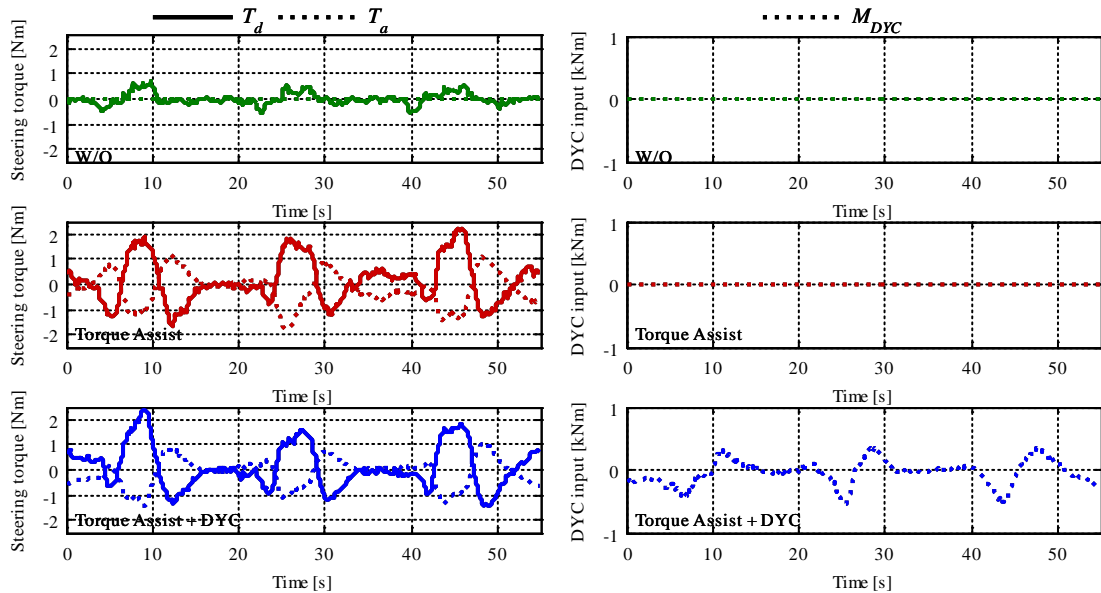


(a) Vehicle trajectory



(b) Time history of yaw rate

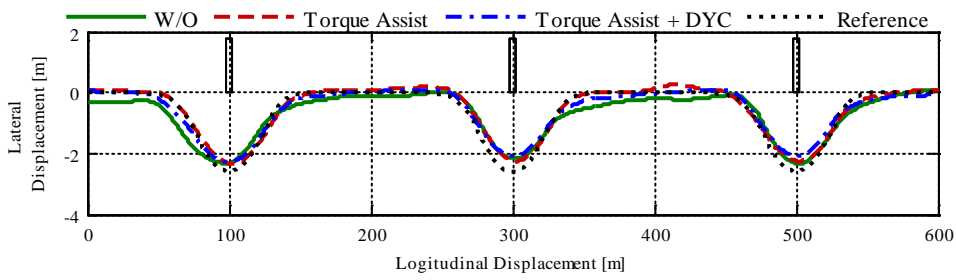
(c) Time history of steering angle



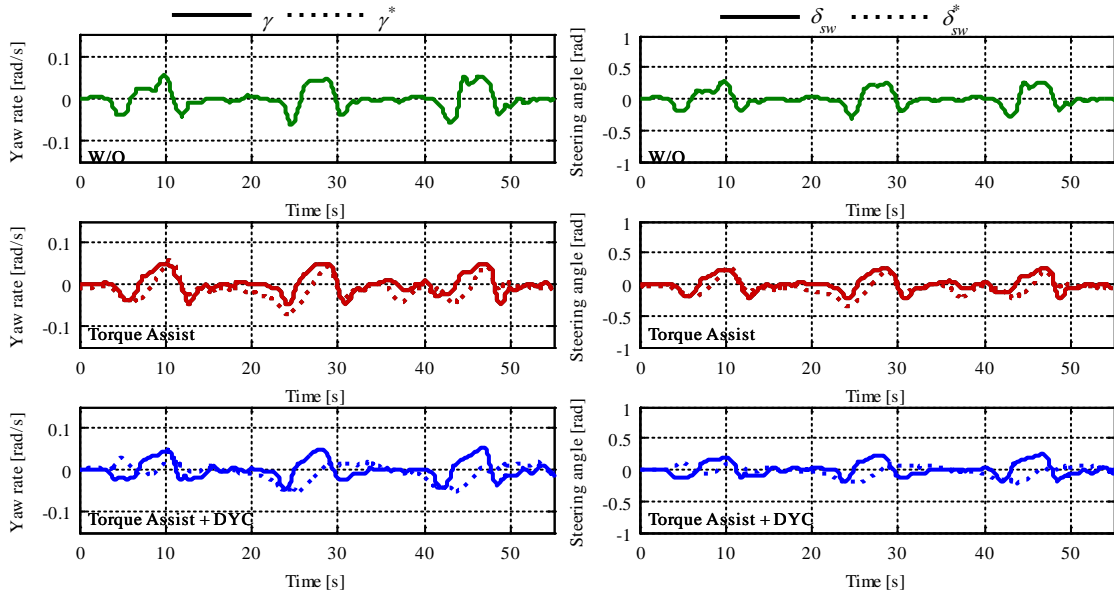
(d) Time history of steering torque

(e) Time history of DYC input

図 5.11 時刻歴応答 (高齢ドライバ Subject I)

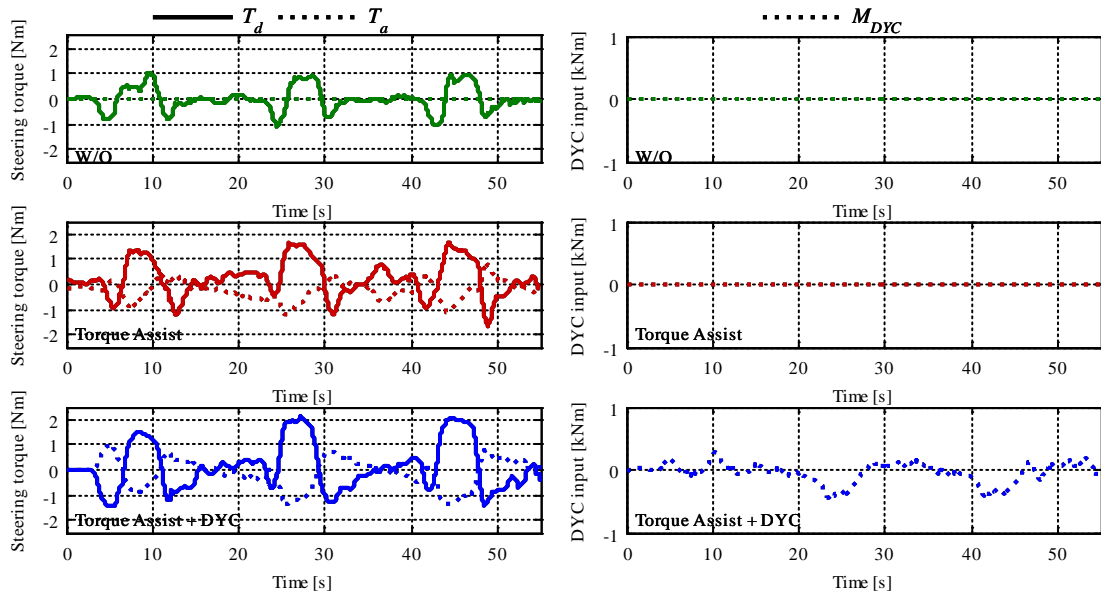


(a) Vehicle trajectory



(b) Time history of yaw rate

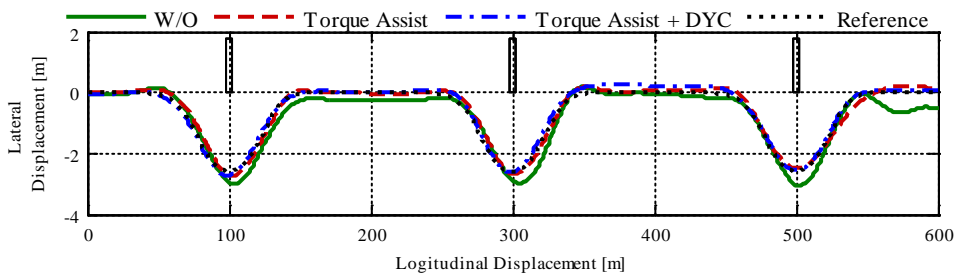
(c) Time history of steering angle



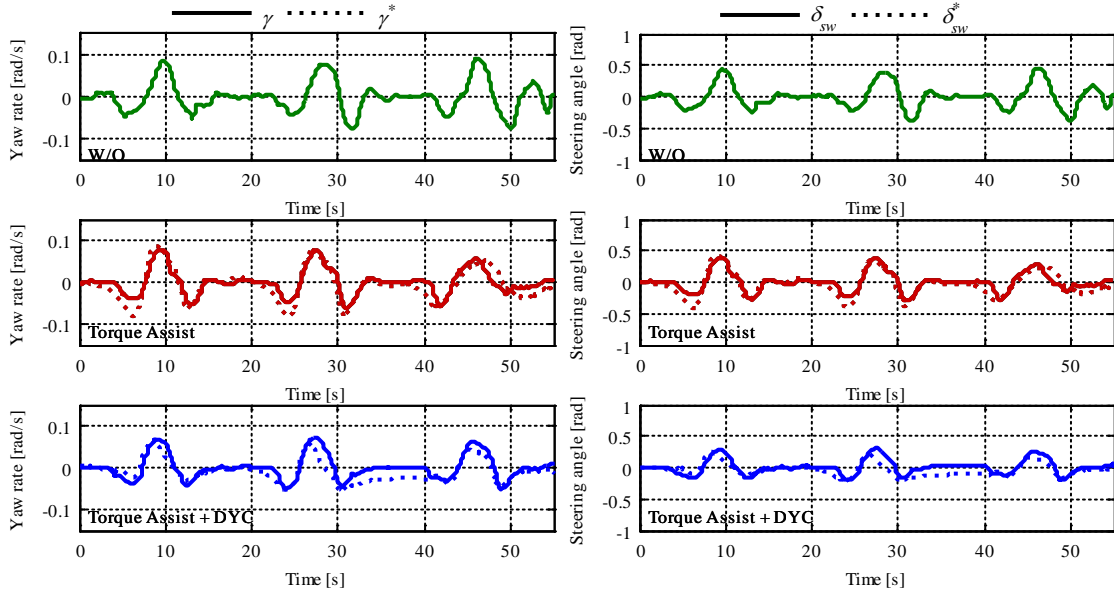
(d) Time history of steering torque

(e) Time history of DYC input

図 5.12 時刻歴応答 (高齢ドライバ Subject J)

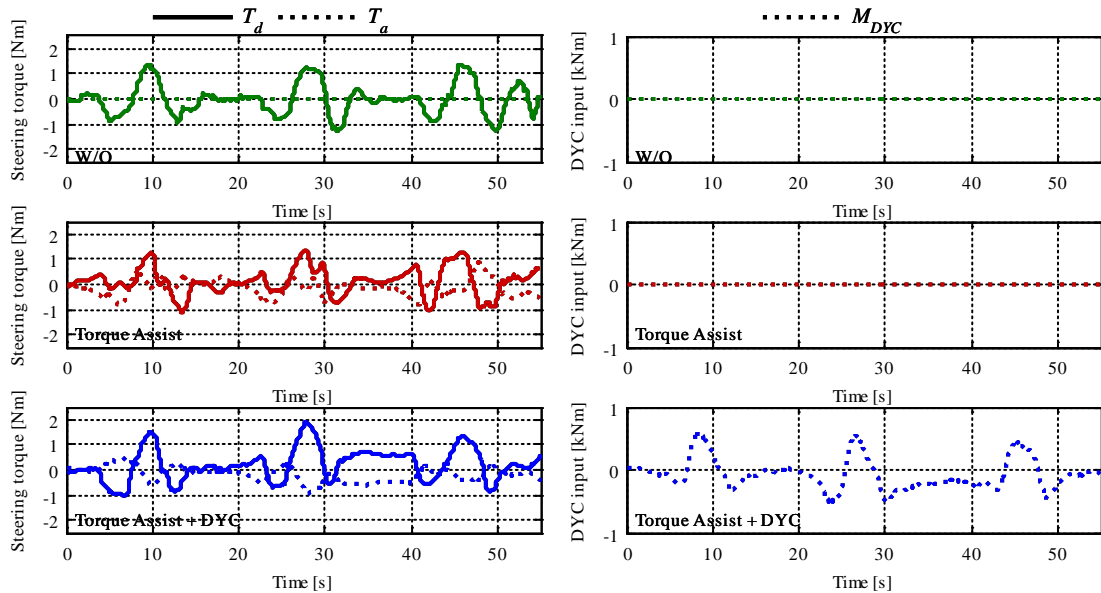


(a) Vehicle trajectory



(b) Time history of yaw rate

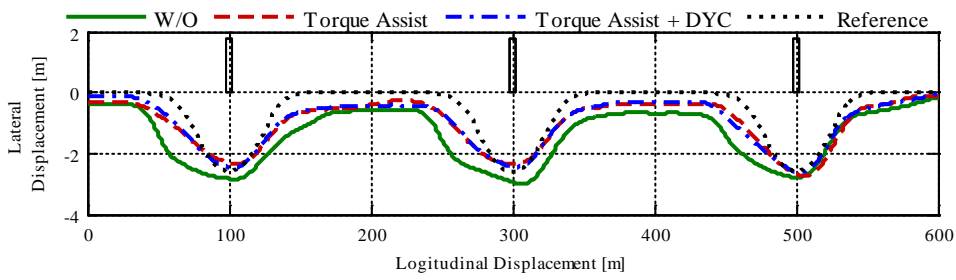
(c) Time history of steering angle



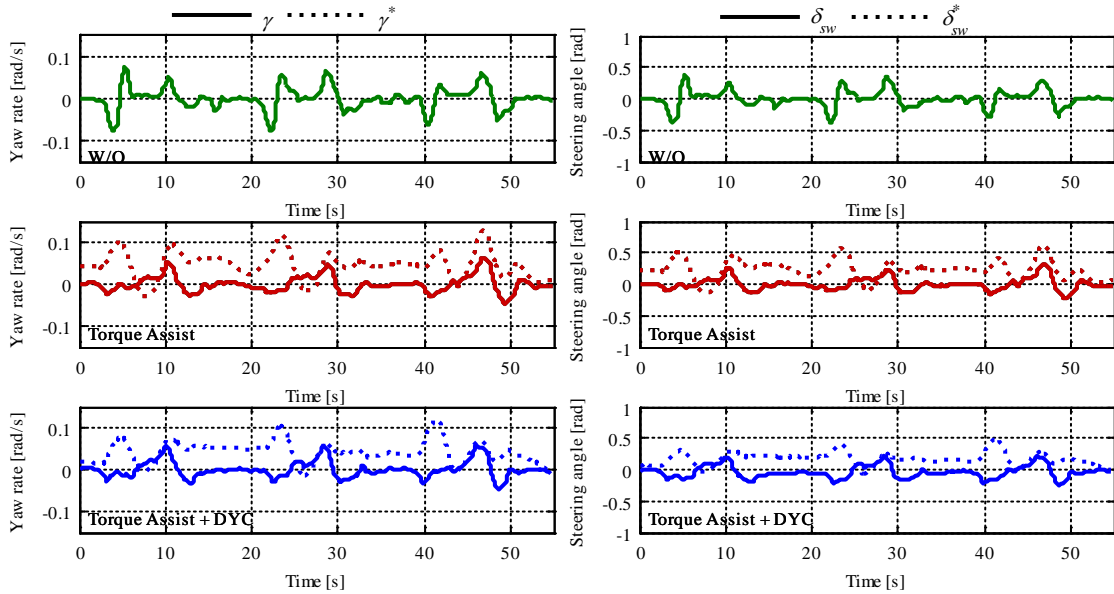
(d) Time history of steering torque

(e) Time history of DYC input

図 5.13 時刻歴応答 (高齢ドライバ Subject K)

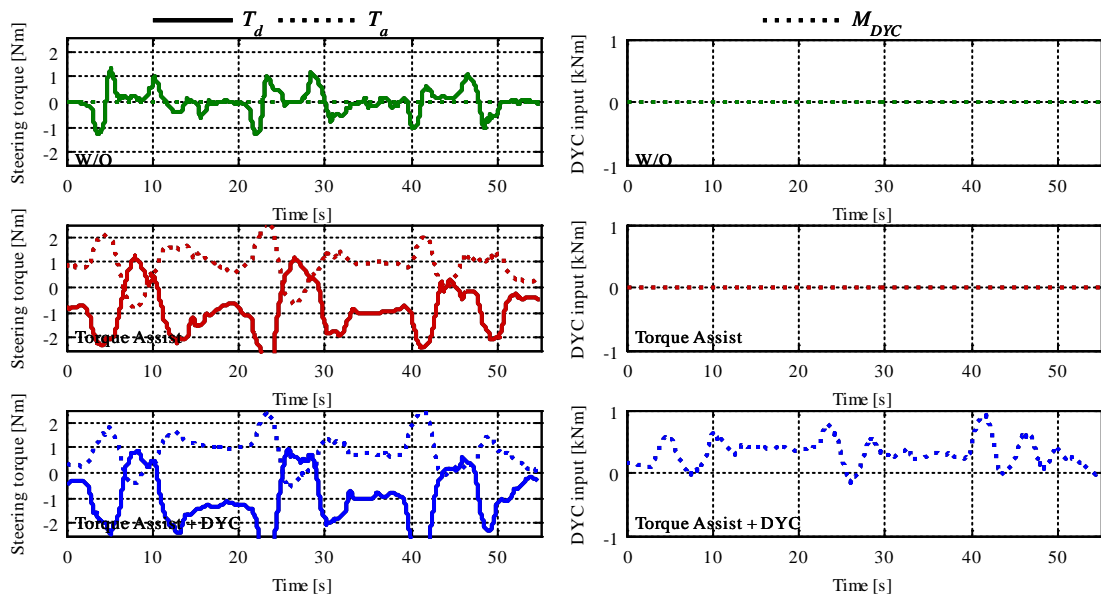


(a) Vehicle trajectory



(b) Time history of yaw rate

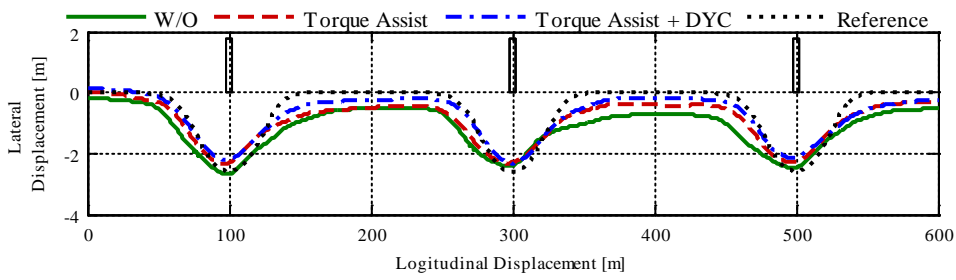
(c) Time history of steering angle



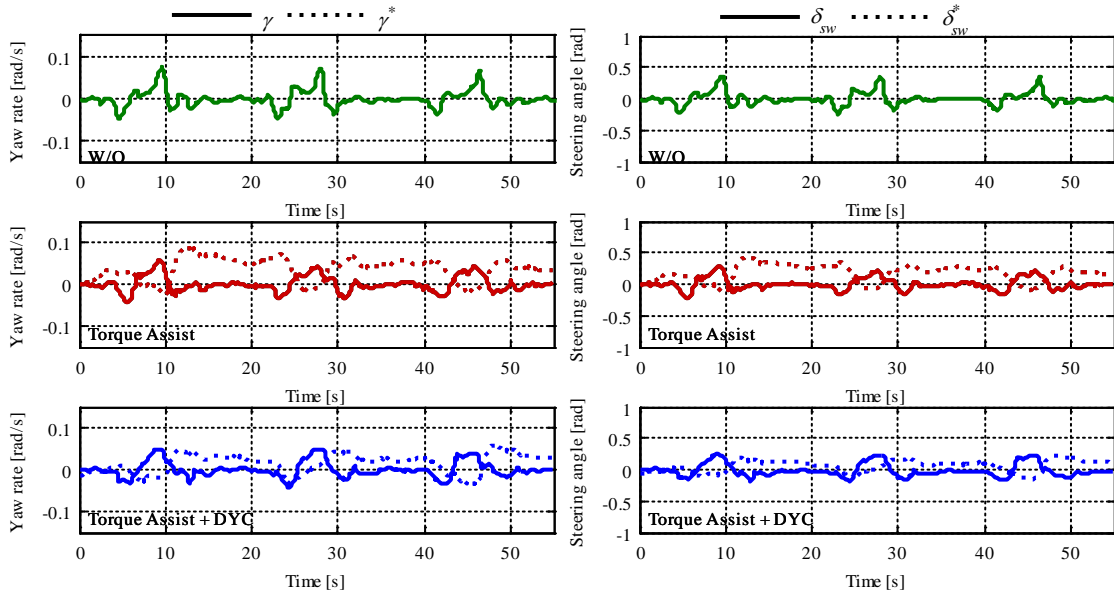
(d) Time history of steering torque

(e) Time history of DYC input

図 5.14 時刻歴応答 (高齢ドライバ Subject L)

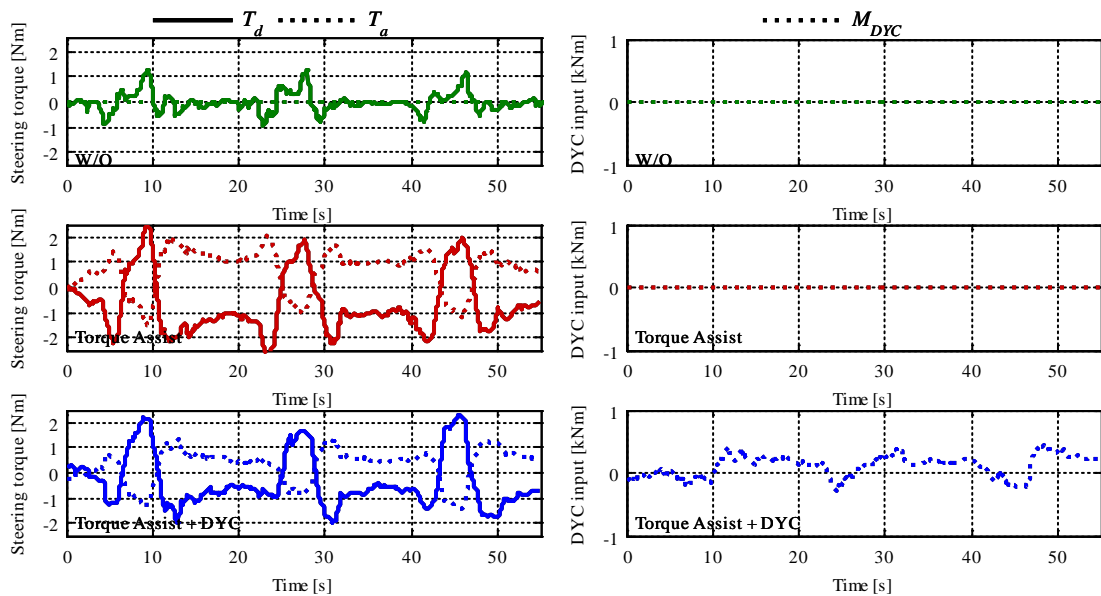


(a) Vehicle trajectory



(b) Time history of yaw rate

(c) Time history of steering angle



(d) Time history of steering torque

(e) Time history of DYC input

図 5.15 時刻歴応答 (高齢ドライバ Subject M)

5.3.2 実験結果の解析

規範操作への誘導度合いを考察するために、制御条件違いにおける側方距離の取り方を評価する。図 5.16 はドライバ B における駐車車両の側方通過時の Y 方向変位である。操舵反力制御によって、側方距離の取り方が安定的になっている。さらに DYC を組み合わせると、より規範運転に近づく傾向が得られている。

次に規範運転への誘導レベルとトルク干渉の関係を評価する。誘導レベルについては、規範軌跡と実軌跡の差に対する二乗平均平方根(以下、RMS とする)にて、トルク干渉については、ドライバトルクと反力制御トルクの差に対する RMS で評価する。ここで積分区間は、X 方向軌跡の 0m から 600m とした。図 5.17 は、全 13 名のドライバの平均である。まず上段の誘導レベルに着目すると、操舵反力制御または DYC との組み合わせによって車両実軌跡は規範軌跡に近づく傾向が確認できる。次に下段の操舵トルクに着目すると、操舵反力制御の場合はトルク干渉が増大している。一方で、DYC を組み合わせることで、トルク干渉が低減しながらも規範軌跡への誘導レベルは向上している。これらは第 3 章に則した結果であり、DYC を組み合わせた効果の一つである。以上の結果から、操舵反力制御または DYC を加えることで、ドライバは、規範運転に導かれることが確かめられた。

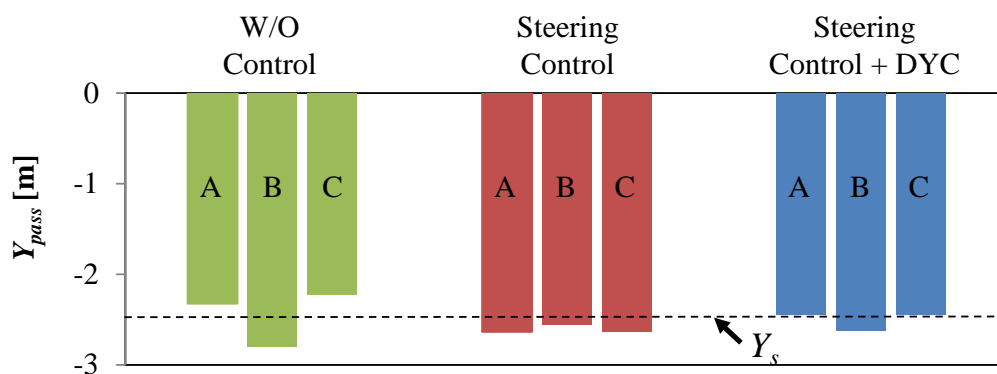


図 5.16 側方間隔の取り方 (高齢ドライバ Subject B)

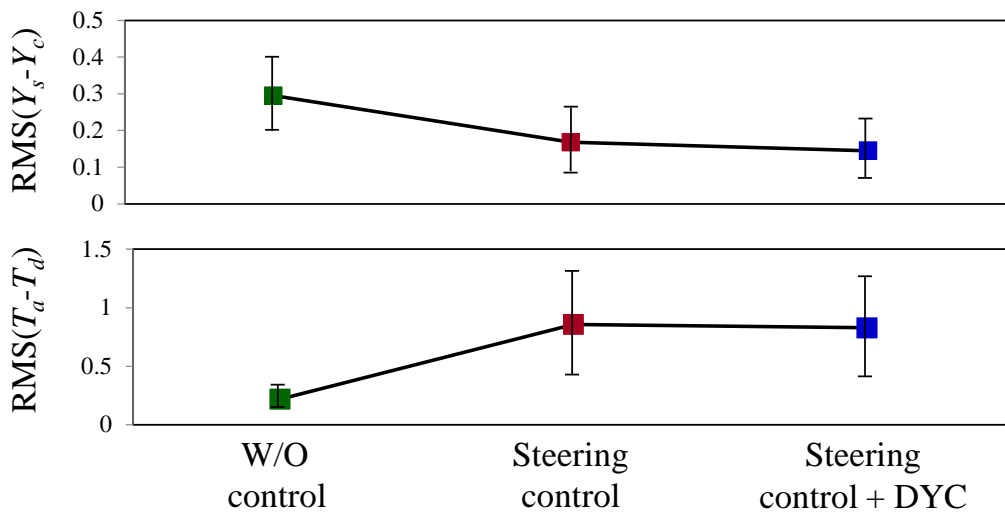


図 5.17 軌跡追従性能と操舵トルク干渉の二乗平方根 (全ドライバ平均値)

操舵の滑らかさを検討するために、ステアリングホイールの操舵角速度を評価する。評価結果を図 5.18 にしめす。まず操舵反力制御に注目すると、ドライバ D やドライバ E のように操舵角速度が増大する結果もあった。これは反力制御トルクによって、駐車車両の側方間隔距離を大きく取るように運転操作が変化したため、ステアリングホイール舵角の絶対値が増大したと考えられる。一方、DYC を加えることで、ドライバ F を除くすべてのドライバにおいて、操舵角速度が小さくなっている。これは式(4.10)で定義された DYC 入力のうち、横運動の一部を DYC 入力で負担する右辺第一項の効果と、安定化制御を組み入れた右辺第二項の効果の両方が作用していると考えられる。両方が作用し操舵角速度が顕著に小さくなることで、ドライバは運転しやすい車両が得られていると考えられる。

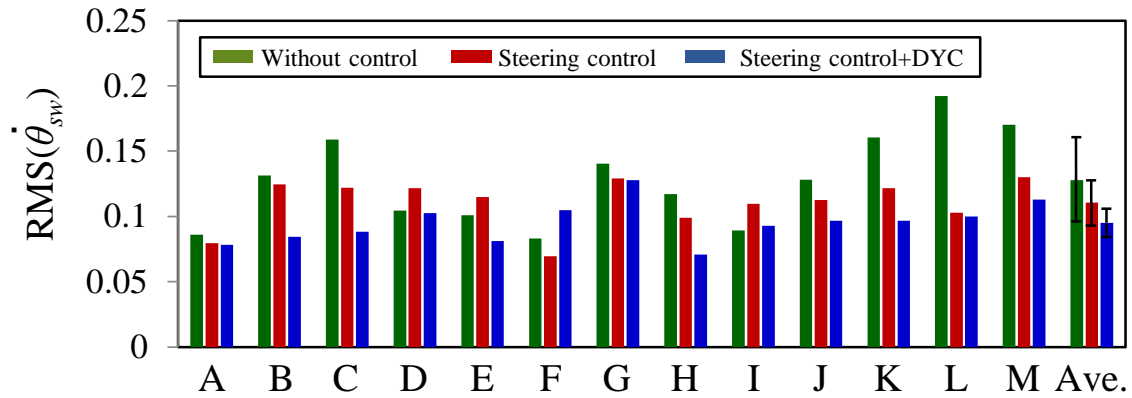


図 5.18 ステアリングホイールの操舵角速度

5.4 反力制御トルクゲインまたはDYCゲインの物理的解釈

前節までに、操舵誘導またはDYCが、人間機械協調特性に肯定的な効果があることを確認した。この効果は、各ゲインの設定値と関係があると考えられる。そこで本節では、理論解析を組み合わせ、選定したゲインの意味合いを、人間機械協調特性の観点から考察する。

ステアリング舵角およびDYC入力量に対するヨーレイトの関係は式(5.1)で定義される。

$$\gamma = G_{\delta}^{\gamma}(s) \frac{\theta_{sw}}{n} + G_M^{\gamma}(s) M_z \quad (5.1)$$

式(5.1)より、ステアリング舵角または規範ステアリング舵角は、式(5.2)または式(5.3)で定義できる。

$$\frac{\theta_{sw}}{n} = G_{\delta}^{\gamma^{-1}}(s) (\gamma - G_M^{\gamma}(s) M_z) \quad (5.2)$$

$$\frac{\theta_{sw}^*}{n} = G_{\delta}^{\gamma^{-1}}(s) (\gamma^* - G_M^{\gamma}(s) M_z) \quad (5.3)$$

次にステアリングまわりの運動方程式を考える。ステアリングを、複雑なパワーステ

アリング機構および操舵系のねじれ剛性を考慮しない線形モデルで仮定すると、その運動方程式は式(2.6)で定義できる。

$$\theta_{sw} = G_s(s) \left(T_d + T_a - \frac{T_{SAT}}{n} \right) \quad (2.6)$$

ただし、 G_s はステアリングに関する2次の伝達関数、 T_{SAT} はセルフアライニングトルクである。

式(2.6)内のセルフアライニングトルク T_{SAT} は式(2.8)で定義できる。

$$T_{SAT} = 2\xi C_f \left(\frac{\theta_{sw}}{n} - \beta - \frac{l_f}{V} \gamma \right) \quad (2.8)$$

ただし、 ξ はトレイル、 K_f は前輪コーナリングパワー、 β は車体スリップ角、 l_f は前輪-重心間距離、 V は車速である。

式(2.8)内の車体スリップ角 β は式(5.4)で定義できる。

$$\beta = G_\delta^\beta(s) \frac{\theta_{sw}}{n} + G_m^\beta(s) M_z \quad (5.4)$$

ここで、式(2.6)に、式(5.2)、式(5.3)、および式(5.4)を代入し、反力制御トルクがヨーレイト発生に及ぼす影響に注目するためにドライバトルクをゼロとすると、式(5.5)が得られる。

$$T_a = \left\{ \frac{1}{nG_s(s)} + \frac{2\xi K_f}{n} (1 - G_\delta^\beta(s)) \right\} \frac{\theta_{sw}}{n} - \frac{2\xi K_f}{n} \left(\frac{l_f}{V} \gamma + G_m^\beta(s) M_z \right) \quad (5.5)$$

最後に式(5.2)、式(5.3)および式(5.5)を式(2.2)に代入し、さらに式(4.10)のDYCの定義式を用いて整理することで、目標ヨーレイト γ^* に対する実ヨーレイト γ の伝達関数は式(5.6)となる。

$$\frac{\gamma}{\gamma^*} = \frac{1 + P(s)}{1 + Q(s)} \quad (5.6)$$

ただし、 $P(s)$ は式(5.6.1)で、 $Q(s)$ は式(5.6.2)であらわされる。

$$P(s) = \frac{G_\delta^\gamma(s)K_{mz2}}{G_s(s)K_a(G_M^\gamma(s)K_{mz1} + G_\delta^\gamma(s))} \left[\frac{2G_s(s)\xi K_f}{n^2} \{G_M^\gamma(s)(1 - G_\delta^\beta(s)) + G_\delta^\gamma(s)G_M^\beta(s)\} + G_M^\gamma(s) \right] \quad (5.6.1)$$

$$Q(s) = \frac{1}{G_s(s)K_a} + \frac{2\xi K_f}{n^2 K_a} \left\{ (1 - G_\delta^\beta(s)) - \frac{l_f G_\delta^\gamma(s)}{V} \right\} - \frac{K_{mz1} - G_\delta^\gamma(s)K_{mz2}}{G_s(s)K_a(G_M^\gamma(s)K_{mz1} + G_\delta^\gamma(s))} \left[\frac{2G_s(s)\xi K_f}{n^2} \{G_M^\gamma(s)(1 - G_\delta^\beta(s)) + G_\delta^\gamma(s)G_M^\beta(s)\} + G_M^\gamma(s) \right] \quad (5.6.2)$$

式(5.6)の s 項をゼロとして解くことで，その定常ゲインは式(5.7)で定式化できる．

$$\frac{\gamma}{\gamma^*} = \frac{1 + \frac{2\xi K_f}{n^2 K_a} \left[\frac{G_\delta^\gamma(0)K_{mz2}}{G_M^\gamma(0)K_{mz1} + G_\delta^\gamma(0)} \{G_M^\gamma(0)(1 - G_\delta^\beta(0)) + G_\delta^\gamma(0)G_M^\beta(0)\} \right]}{1 + \frac{2\xi K_f}{n^2 K_a} \left[\left(1 - G_\delta^\beta(0) - \frac{l_f}{V} G_\delta^\gamma(0) \right) - \frac{K_{mz1} - G_\delta^\gamma(0)K_{mz2}}{G_M^\gamma(0)K_{mz1} + G_\delta^\gamma(0)} \{G_M^\gamma(0)(1 - G_\delta^\beta(0)) + G_\delta^\gamma(0)G_M^\beta(0)\} \right]} \quad (5.7)$$

得られた式(5.7)を用いて，選定したゲインの意味合いを考察する．はじめに，反力制御トルクゲイン K_a を考察する．図 5.19 の実線は，DYC ゲイン K_{mz1} および K_{mz2} をゼロとし，反力制御トルクゲインを変化させた時の定常ゲインである．ただし車両諸元は DS の諸元を用いており，車速は DS 実験と同じ 40km/h とした．本報の DS 実験で選定した操舵誘導トルクゲイン $K_a = 4.0 \text{ Nm/rad}$ の場合，定常ゲインは 0.55 となる．これは，操舵誘導トルク T_a が直接的にステアリングを操作し，実ヨーレイトを目標ヨーレイトに漸近させる機能を，0.55 の割合でおこなっていることを意味している．ここで，ドライバが操舵誘導制御を適切に受け入れ，ドライバと機械が同じプロファイルを有するという前提を置けば，式の導出過程でドライバトルクをゼロとしているので，残りの 0.45 はドライバ自身が操作する割合を意味している．すなわち，この定常ゲインは機械と人間のタスク分担率を表現していると捉えることができる．緊急回避を題材にした岩野らの既往研究によると，人間と機械の分担率を 0.5 に設定すると，回避

性能とドライバ操舵感が高いレベルで両立することが報告されている[114]. このような既往研究と照らし合わせると, 今回選定した反力制御トルクゲイン $K_a = 4.0 \text{ Nm/rad}$ は, 高い協調特性が期待できるゲイン設定であったと考えられる.

次に **DYC** の効果を考察する. 図 5.19 の破線は, **DYC** ゲイン $K_{mz1} = 4 \times 10^4 \text{ Nm/rad}$, $K_{mz2} = 1 \times 10^4 \text{ Nms/rad}$ とした場合の定常ゲインである. 誘導トルクゲイン $K_a = 4.0 \text{ Nm/rad}$ の場合, **DYC** を組み合わせることで, 機械の分担率がさらに 0.22 の割合だけ高まり, 0.77 に設定されることが確認できる.

5.3.2 節で得られた効果は, 上記で示した分担率の考え方をを用いれば, 次のように説明することができる. まず, 機械側は, その分担率が 0.77 と高いために, 機械の目標通りに車両がコントロールできたといえる. 一方でドライバ側は, ステアリングの力覚による直接的な教示が, 分担率 0.5 という協調しやすい適切な強さで示されたことで, 自身の運転操作を違和感小さく機械目標に漸近できたといえる. さらに, 機械との相互作用の度合いに応じて **DYC** が作用することで, 機械が教示する規範運転に対して安定的に運転操作を変容できたと考えられる.

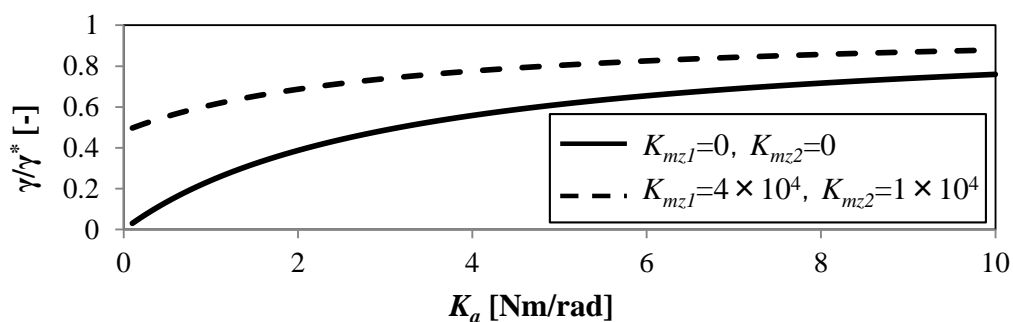


図 5.19 反力制御トルクゲインとヨーレイト追従性の関係

5.5 制御システムの軌跡追従性能に対してDYCが及ぼす影響解析

5.4節では、規範ヨーレイト γ^* に対する実ヨーレイト γ の伝達関数を導出し、またその定常ゲインから人間と機械の操舵の分担率を考察した。本節ではこの考え方を発展させ、DYCが制御システムの軌跡追従性能に対してどのような効果を与えるかを考察する。なお本節では、DYCはステアリング舵角比例制御のみに焦点を絞る。

図5.20は解析に用いた制御システムのブロック線図である。制御システムに対するDYCの効果に注目するために、ここではドライバ入力は考えない。

はじめに、ステアリングまわりの運動方程式を式(5.8)で定義する。

$$J_s \ddot{\theta}_{sw} + C_s \dot{\theta}_{sw} = \frac{2\xi C_f}{n} \left(\frac{l_f}{V} \gamma + \beta - \frac{\theta_{sw}}{n} \right) - K_a (\theta_{sw}^* - \theta_{sw}) \quad (5.8)$$

ここで、規範ヨーレイトと実ステアリング舵角の関係は式(4.10)であった。

$$\begin{aligned} \theta_{sw}^* &= nG_\delta^\gamma(0)^{-1} (\gamma^* - G_M^\gamma(0)M_z) \\ &= nG_\delta^\gamma(0)^{-1} \left(\gamma^* - G_M^\gamma(0)K_{mz} \frac{\theta_{sw}}{n} \right) \end{aligned} \quad (4.10)$$

式(5.8)に式(4.10)を代入すれば、式(5.8)は式(5.9)のように変形できる。

$$J_s \ddot{\theta}_{sw} + C_s \dot{\theta}_{sw} = \frac{2\xi C_f}{n} \left(\frac{l_f}{V} \gamma + \beta - \frac{\theta_{sw}}{n} \right) - K_a \left(\frac{n}{G_\delta^\gamma(0)} \gamma^* + \frac{G_\delta^\beta(0)}{G_\delta^\gamma(0)} K_{mz} \theta_{sw} - \theta_{sw} \right) \quad (5.9)$$

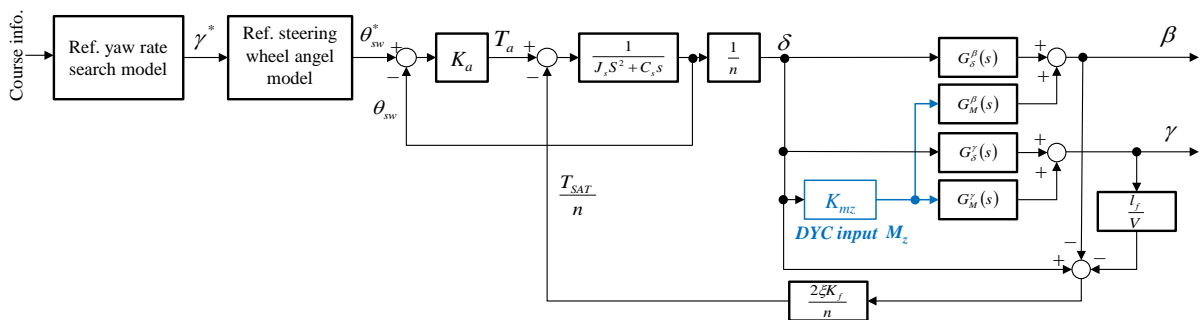


図 5.20 解析用のシステムブロック線図

次に，車両特性を定義する．解析の見通しを良くするために，本節ではヨーレイト γ および車体スリップ角 β を式(5.10)，式(5.11)のように車両の動特性を一次遅れの特性で表現する．

$$\gamma = \frac{1}{1 + \tau_\gamma s} \left(G_\delta^\gamma(0) + K_{mz} G_M^\gamma(0) \right) \frac{\theta_{sw}}{n} \quad (5.10)$$

$$\beta = \frac{1}{1 + \tau_\beta s} \left(G_\delta^\beta(0) + K_{mz} G_M^\beta(0) \right) \frac{\theta_{sw}}{n} \quad (5.11)$$

ここで， τ_γ は実舵角に対する車体ヨーレイトの一次遅れ時定数， τ_β は車体スリップ角の一次遅れ時定数である．式(5.10)，式(5.11)を式(5.9)に代入し，伝達関数型に変形すると，式(5.12)式が得られる．

$$\frac{\frac{\theta_{sw}}{n}}{\gamma^*} = \frac{\frac{K_a}{G_\delta^\gamma(0)}}{J_s s^2 + \left[C_s + \frac{2\xi C_f}{n^2} \left(\frac{l_f}{V} K'_\gamma \tau_\gamma + K'_\beta \tau_\beta \right) \right] s + \left[K_a \left(1 + \frac{G_M^\gamma(0)}{G_\delta^\gamma(0)} K_{mz} \right) + \frac{2\xi C_f}{n^2} \left(1 - \frac{l_f}{V} K'_\gamma - K'_\beta \right) \right]} \quad (5.12)$$

ここで， $K'_\gamma = G_\delta^\gamma(0) + K_{mz} G_M^\gamma(0)$ であり， $K'_\beta = G_\delta^\beta(0) + K_{mz} G_M^\beta(0)$ である．また式変形の途中過程で τ_r^2 および τ_β^2 が出てくるが，これらは微小値として無視する．

式(5.12)左辺の実ステアリング舵角の項に式(5.10)の関係式を代入すれば，規範ヨーレイト γ^* に対する実ヨーレイト γ の伝達関数は，最終的に式(5.13)で定式化できる．

$$\frac{\gamma}{\gamma^*} = \frac{1}{1 + \tau_\gamma s} \times \frac{K_a \left(1 + K_{mz} \frac{G_M^\gamma(0)}{G_\delta^\gamma(0)} \right)}{J_s s^2 + \left[C_s + \frac{2\xi C_f}{n^2} \left(\frac{l_f}{V} K'_\gamma \tau_\gamma + K'_\beta \tau_\beta \right) \right] s + \left[K_a \left(1 + \frac{G_M^\gamma(0)}{G_\delta^\gamma(0)} K_{mz} \right) + \frac{2\xi C_f}{n^2} \left(1 - \frac{l_f}{V} K'_\gamma - K'_\beta \right) \right]} \quad (5.13)$$

ここで右辺は，後述する固有振動数および減衰比を考察できるように，一次遅れと二次遅れの伝達関数に分解して整理する．

得られた伝達関数を用いて **DYC** の効果を考察する．はじめに定常ゲインを考える．操舵支援のみの場合の定常ゲインは，式(5.13)の s 項をゼロとし，また **DYC** ゲイン K_{mz} をゼロとすることで式(5.14-a)のように得られる．一方操舵支援に **DYC** を組み合わせた場合は式(5.14-b)となる．

【操舵支援のみの場合】

$$\frac{\gamma}{\gamma^*} = \frac{1}{1 + \frac{2\xi C_f}{n^2 K_a} \left\{ (1 - G_\delta^\beta(0)) - \frac{l_f}{V} G_\delta^\gamma(0) \right\}} \quad (5.14-a)$$

【操舵支援に **DYC を組み合わせた場合】**

$$\frac{\gamma}{\gamma^*} = \frac{1}{1 + \frac{2\xi C_f}{n^2 K_a} \left[\left\{ (1 - G_\delta^\beta(0)) - \frac{l_f}{V} G_\delta^\gamma(0) \right\} - \frac{K_{mz}}{G_M^\gamma(0)K_{mz} + G_\delta^\gamma(0)} \left\{ G_M^\gamma(0)(1 - G_\delta^\beta(0)) + G_\delta^\gamma(0)G_M^\beta(0) \right\} \right]} \quad (5.14-b)$$

はじめに，操舵支援のみの場合を考察する．式(5.14-a)の分母には $2\xi C_f$ の項が存在する．これは前輪 2 つ分のセルフアライニングトルク項である．ここで制御システムの軌跡追従性能の観点からは，定常ゲインが 1 となることが最も性能が高いが，定常ゲイン 1 の実現には，反力制御トルクゲイン K_a を大きく設定してセルフアライニングトルク項を補償する必要がある．しかしながら第 2 章でも述べたように，反力制御トルクゲインを大きく設定してしまうと，強すぎる規範教示が発生しドライバに違和感を与える原因となってしまう．一方，**DYC** を組み合わせた式(5.14-b)の場合，**DYC** がセルフアライニングトルク項を補償するように作用することが数式的に確認できる．このように，制御システムの軌跡追従性能は，**DYC** を組み合わせることで，反力制御トルクゲインの大きさを変えずとも向上させることが出来る．これが適度な強さの規範教示を保ちながら，制御システムとして軌跡追従性能を向上させることができるメカニズムである．これらの関係を図 5.21 に示す．ここで車速は 40km/h であり，車両諸元は表 2.4 を用いている．例えば反力制御トルクゲインを $K_a = 4$ [Nm/rad] に設

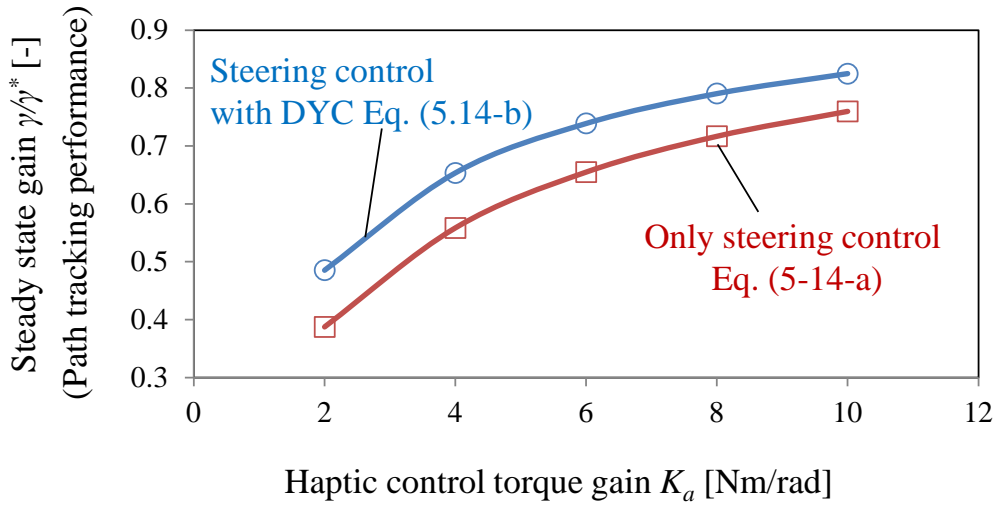


図 5.21 反力制御トルクゲインと制御システムの軌跡追従性能の関係

定した場合，軌跡追従性能をあらわす定常ゲインは 0.55 程度であるが，DYC ゲイン $K_{mz}=4 \times 10^4$ Nm/rad を組み合わせた場合は，その定常ゲインは 0.65 程度まで向上する。

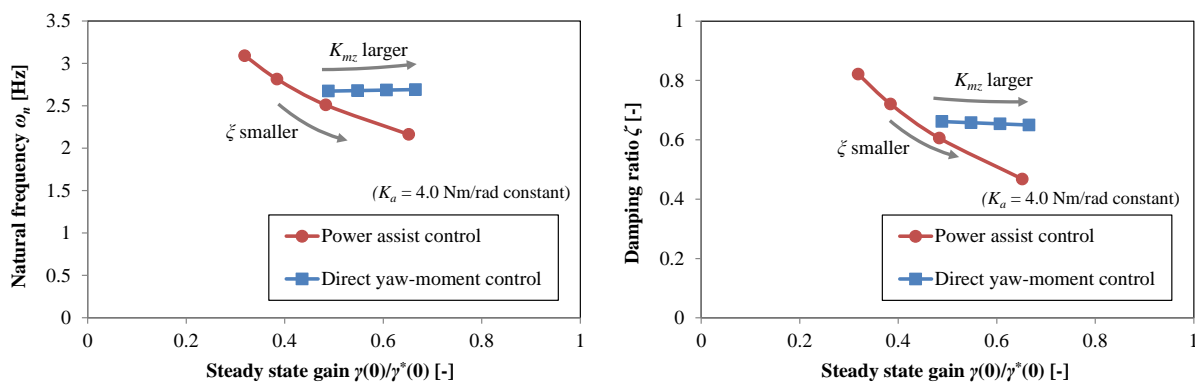
セルフアライニングトルクを補償する別の手段としては，ステアリングモータを用いて，パワーアシストを強く設定する方法が考えられる．そこで次にこの方法との違いを考察する．式(5.13)の第二項の二次遅れ要素を標準形と比較すれば，その固有振動数および減衰比は，式(5.15)，式(5.16)のように定式化できる．

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{J_s} \left[K_a \left(1 + \frac{G_M^\gamma(0)}{G_\delta^\gamma(0)} K_{mz} \right) + \frac{2\xi C_f}{n^2} \left(1 - \frac{l_f}{V} K_\gamma - K_\beta \right) \right]} \quad (5.15)$$

$$\zeta = \frac{1}{2J_s} \left[C_s + \frac{2\xi C_f}{n^2} \left(\frac{l_f}{V} K'_\gamma \tau_\gamma + K'_\beta \tau_\beta \right) \right] \sqrt{\frac{1}{J_s} \left[K_a \left(1 + \frac{G_M^\gamma(0)}{G_\delta^\gamma(0)} K_{mz} \right) + \frac{2\xi C_f}{n^2} \left(1 - \frac{l_f}{V} K'_\gamma - K'_\beta \right) \right]} \quad (5.16)$$

得られた関係式を使って，パワーアシストを強くする場合と DYC を用いる場合の 2 種類に対して，定常ゲインを評価する．なお本解析では，パワーアシストの強さはトレイルの大きさを変えることで等価的に表現する．図 5.22(a)は固有振動数に関する評価結果である(計算条件は，図 5.21 と同様)．ここで反力制御トルクゲイン K_a は 4.0

Nm/rad に設定されている。赤線は **DYC** ゲインを $K_{mz}=0$ Nm/rad とし、トレイル ζ を 0.05 m から 0.01 m まで変化させた場合であり(アシストを強くする方向)、青線はトレイル ζ を 0.025 m に固定した状態で、**DYC** ゲイン K_{mz} を 0 Nm/rad から 80000 Nm/rad まで変化させた場合である。図 5.22(b)は同様の計算条件における減衰比に関する評価結果である。図 5.22 からは、制御システムの軌跡追従性能を高めようとする場合、パワーアシストを強くしていく方法では固有振動数が小さくなり、また減衰比が低下していくことが確認できる。これはパワーアシストを強くしていくと、モータトルク入力に対するタイヤ反力が単純に小さくなってしまうため、ステアリングまわりの運動は不安定な傾向に向かってしまうと考えられる。一方で **DYC** を強めていく方法は、目標の定常ゲイン量を達成するためのタイヤ実舵角は減少するが、その時のタイヤ反力自体は変化しないため、ステアリングまわりの運動は安定的であると考えられる。以上の関係より、**DYC** によってセルフライニングトルク項を補償することは、パワーアシストを単純に強くする方法に比べ安定的な制御系が構築できると考察できる。



(a)定常ゲインと固有振動数の関係

(b)定常ゲインと減衰比の関係

(ζ の場合は ζ を 0.05m から 0.01m まで、**DYC** の場合は K_{mz} を 10000Nm/rad から 80000Nm/rad まで変化)

図 5.22 パワーアシストと **DYC** の比較

最後に、セルフアライニングトルクに対する基本的な考察を示す。セルフアライニングトルクの関係式は、式(2.8)であった。

$$T_{SAT} = 2\xi C_f \left(\frac{\theta_{sw}}{n} - \beta - \frac{l_f}{V} \gamma \right) \quad (2.8)$$

式(2.8)のヨーレイトおよび車体スリップ角の項に、式(5.10)および式(5.11)の定常ゲインを代入すれば、式(2.8)は式(5.17)のように変形される。

$$T_{SAT} = 2\xi C_f \left[\left(1 - \frac{l_f}{V} G_\delta^\gamma(0) - G_\delta^\beta(0) \right) - K_{mz} \left(\frac{l_f}{V} G_M^\gamma(0) - G_M^\beta(0) \right) \right] \frac{\theta_{sw}}{n} \quad (5.17)$$

次に、ステアリング舵角に対する横加速度の定常ゲインは、式(2.8)より式(5.18)で定式化できる。

$$A_y = \left(V G_\delta^\gamma(0) + K_{mz} \times V G_M^\gamma(0) \right) \frac{\theta_{sw}}{n} \quad (5.18)$$

式(5.17)に式(5.18)を代入すれば、横加速度に対するセルフアライニングトルクの定常ゲインとして式(5.19)が定式化できる。

$$\frac{T_{SAT}}{A_y} = \frac{2\xi C_f \left[\left(1 - \frac{l_f}{V} G_\delta^\gamma(0) - G_\delta^\beta(0) \right) - K_{mz} \left(\frac{l_f}{V} G_M^\gamma(0) + G_M^\beta(0) \right) \right]}{V \left(G_\delta^\gamma(0) + K_{mz} G_M^\gamma(0) \right)} \quad (5.19)$$

式(5.19)を用いて、DYCがセルフアライニングトルクの大きさに及ぼす影響を解析する。DYCが加わると、式(5.19)の右辺の分母は大きくなり、一方で分子は小さくなる。この増減によって、DYCはステアリング舵角で発生するセルフアライニングトルクを低減する方向に作用する。図5.23はその関係を図示したものである。ここで上段は車速40km/hの場合、下段は車速60km/hの場合である。またDYCゲインは $K_{mz} = 4 \times 10^4 \text{ Nm/rad}$ で共通設定である。いずれの車速でも、DYCによってセルフアライニングトルクが小さくなっていることが確認できる。図5.24に示すようにDYC入力に対する車体スリップ角の定常ゲイン $G_M^\beta(0)$ は、車速に応じて正負が反転する。このため、式(5.19)の右辺の分子第二項は車速に応じて正負が反転することになる。但し、今回の車両諸元では、 $G_M^\beta(0)$ はヨーレイトに関する定常ゲイン $G_M^\gamma(0)$ と比較して一桁オ

一ダが小さい。従って上記の正負反転に伴う分子の増減に比べて分母が大きくなる効果が強いため、図 5.23 に示す通り、いずれの設定車速でも **DYC** はセルフアライニングトルクを低減する方向に作用する。

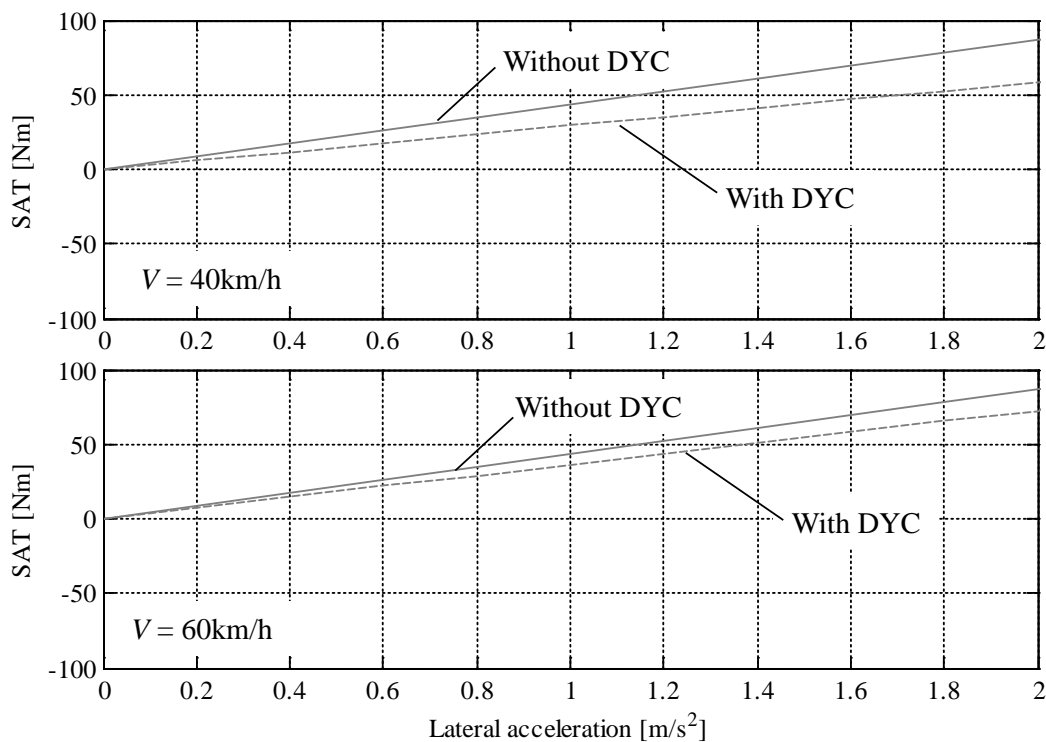


図 5.23 **DYC** 有無での横加速度とセルフアライニングトルクの関係

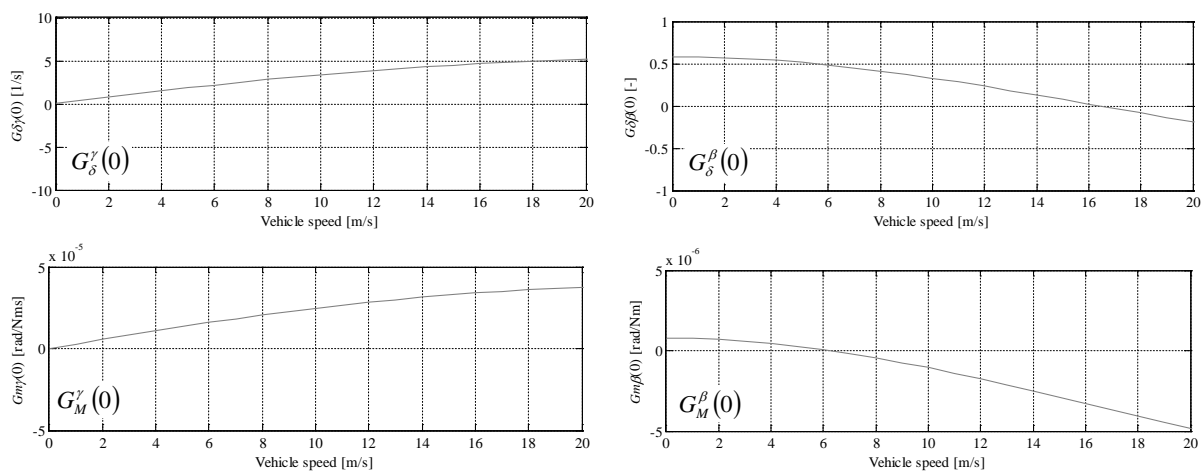


図 5.24 車速と各定常ゲインの関係

5.6 ドライバモデルのパラメータ同定による操舵特性変化の考察

支援が加えることでドライバの特性はどのように変化しているのだろうか。このことを解明するために、実ドライバを前方注視ドライビングモデルであると仮定し、非線形多変数関数の最小化問題に基づきパラメータ同定をおこなう。式(2.15)は本研究で用いる前方注視ドライバモデルである(第2章で既出)。

$$T_d = \frac{H}{1 + \tau_v s} \{Y_d - (Y_c + T_p V \psi)\} + \frac{K_h}{1 + \tau_h s} T_a \quad (2.15)$$

ただし、右辺第一項は視覚由来を、右辺第二項は力覚由来をあらわす。また、 H は視覚由来の操舵ゲイン、 τ_v は視覚由来の一次遅れ時定数、 Y_d はドライバ目標軌跡、 T_p は前方注視時間、 V は車速、 ψ はヨー角、 K_h は力覚由来の操舵ゲイン、 τ_h は力覚由来の一次遅れ時定数である。

同定するパラメータは操舵ゲイン、一次遅れ時定数、前方注視時間である。式(2.16)で計算されるドライバトルクと、実験結果で得られたドライバトルクが、式(5.20)で示される誤差 E を最小とするパラメータを選ぶ。

$$E = \int_{t_1}^{t_2} (T_d - T_{dm})^2 dt \quad (5.20)$$

ただし同定区間は、0 から 200m、200m から 400m、400m から 600m の 3 区間とし、得られた結果を平均化した。

パラメータ同定を行った際のドライバ B とドライバ K の同定結果を図 5.25 の(a)、(b)に示す。図 5.25 より、パラメータ同定により得られた推定値は実験値と良く一致しており、本手法によるパラメータ同定は有効であると考えられる。

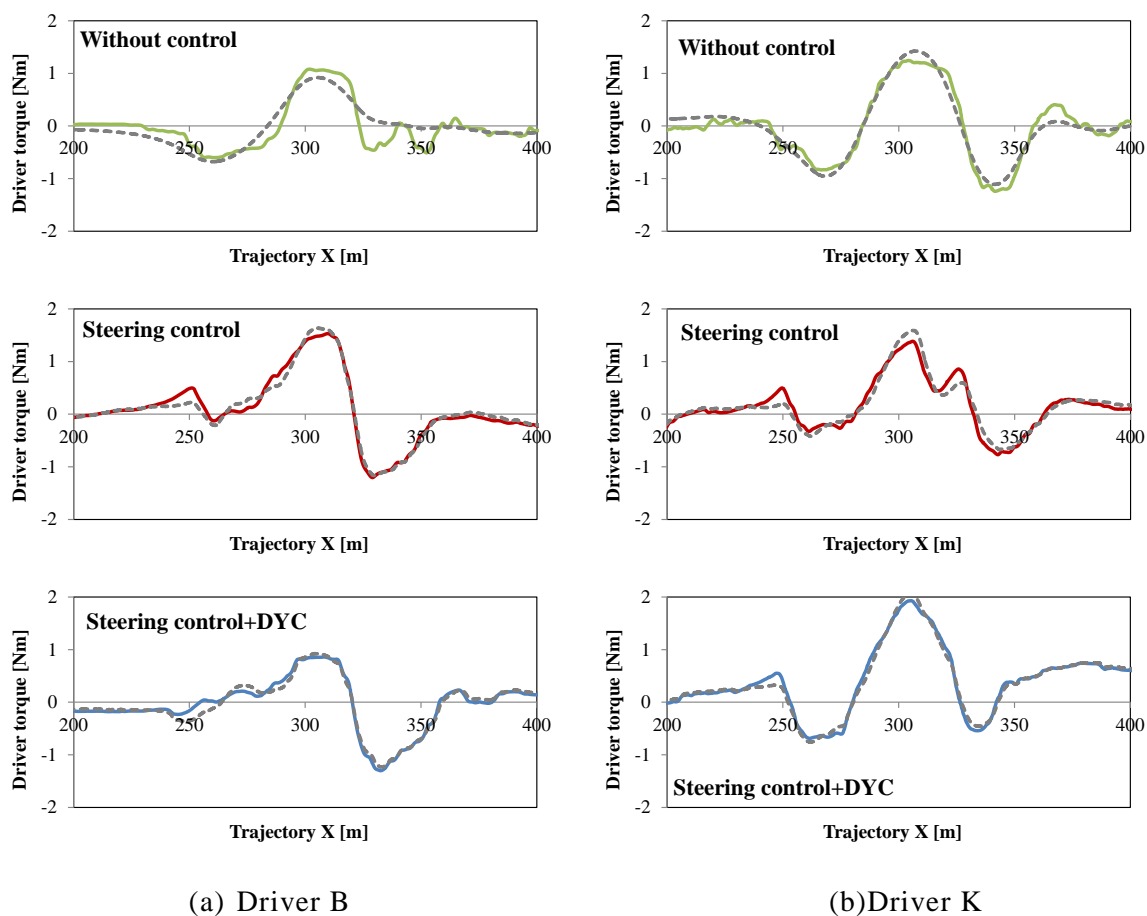


図 5.25 パラメータ同定値を用いたドライバトルクの推定値比較
(X=200m から 400m について, 実線: 実験値, 破線: 推定値)

図 5.26 は同定結果である. はじめに視覚由来の一次遅れ時定数に注目する (1 段目). ドライバ D, ドライバ E を除く 13 名のドライバは, 制御介入によって, 一次遅れ時定数の値が小さくなっていることが確認できる. 式(2.15)のドライバモデルの第一項は, コース誤差 (視覚由来) に対する操舵トルクである. コース誤差は, トルク入力に対して相対的に 4 次遅れの伝達関数(ステアリング 2 次, 車両 2 次)で発生するため, コース誤差の情報は獲得が遅れる. 一方, 反力制御トルクは規範ステアリング角と実ステアリング舵角との差分に比例した入力でありその間に遅れ要素がないため, ドライバに情報が早く伝達される. 本システムは, この力覚インタフェースを積極的に使って早くドライバに追従すべき軌跡を感じさせ, 将来の車両挙動の予測をよりし易くすることを狙っている. この仕組みにより, コース誤差に対する認知遅れは相対的に

小さくなり、ドライバは視覚由来の修正操舵トルクの遅れを補償できる。このことが一次遅れ時定数の値が小さくなる理由と解釈できる。

次に視覚由来の操舵ゲイン(3 段目)と、力覚由来の操舵ゲイン(5 段目)を比較する。まず、操舵反力制御の視覚由来の操舵ゲインは、非制御に比べ操舵ゲインが増大する傾向にある。これは、駐車車両の側方通過間隔を広く取るように運転操作が変化したためと考えられる。ここで **DYC** を組み合わせると、その増大は抑制されている。一方の力覚由来の操舵ゲインは、反力制御トルクによって発生した操舵ゲインが、**DYC** を組み合わせることでさらに大きくなる傾向にある。以上のことから、**DYC** を組み合わせたシェアード・コントロール下においては、ドライバはコース誤差の認知遅れをより積極的に力覚教示で補償するような運転行動に変化していると考えられる。図 5.27 は、得られた同定値を用いて、操舵誘導+**DYC** におけるドライバ **B** のトルクを、視覚由来と力覚由来に成分分解したものである。ドライバ **B** は、自身の視覚情報に基づくトルクを、それとは逆相関係にある力覚由来のトルクで変化させながら、ステアリングにトルクを入力していることが確認できる。

最後に、視覚由来と力覚由来の一次遅れ時定数を比較する。1 段目と 4 段目を比べると、力覚由来の一次遅れ時定数は視覚由来に比べて非常に小さい。この結果から、力覚はドライバに対して遅れの小さな規範運転教示ツールであるという考え方が提案できる。力覚、すなわち反力制御トルクを適切に発生させることができれば、規範運転をドライバに最適に教示させることができると考えられる。

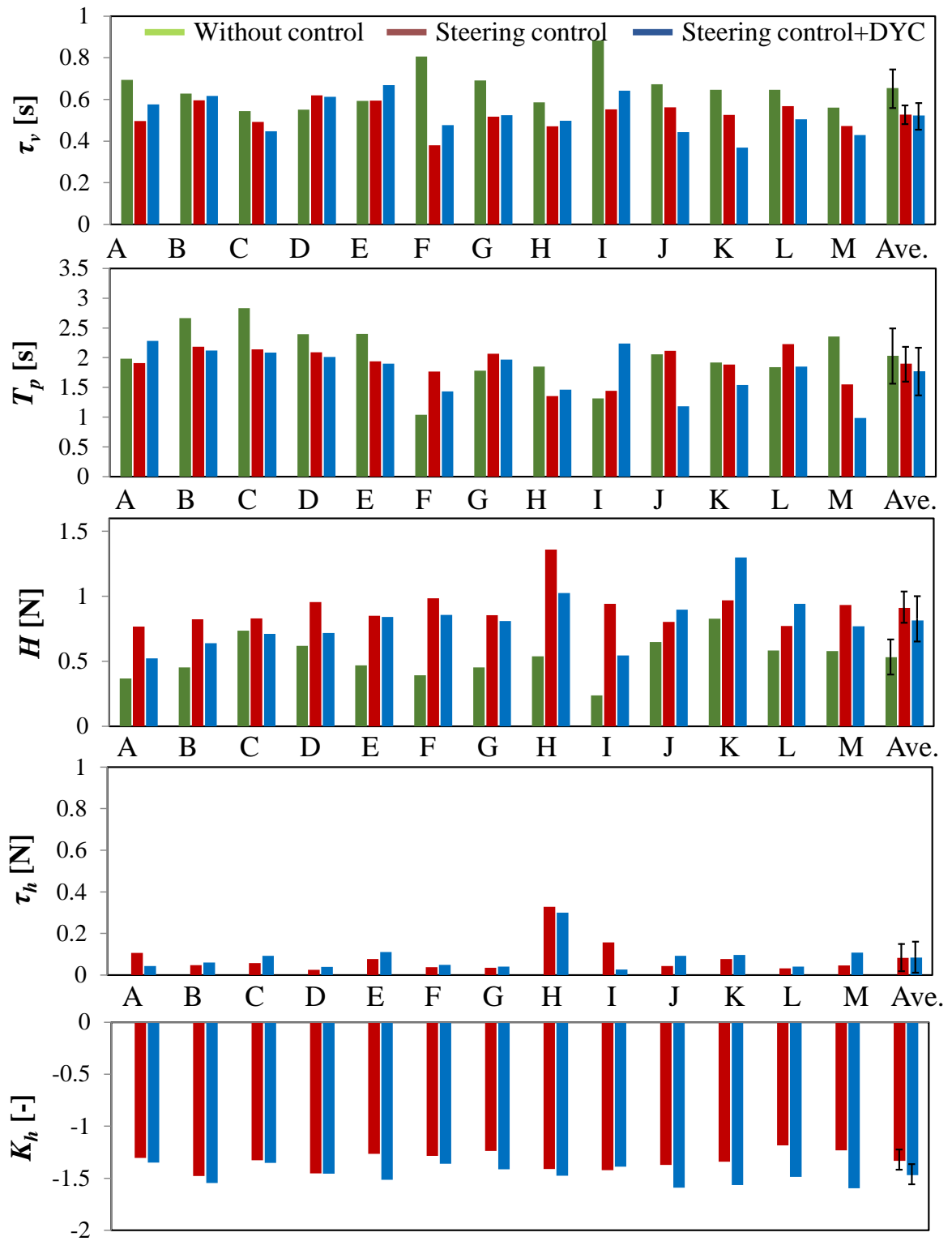


図 5.26 パラメータ同定結果

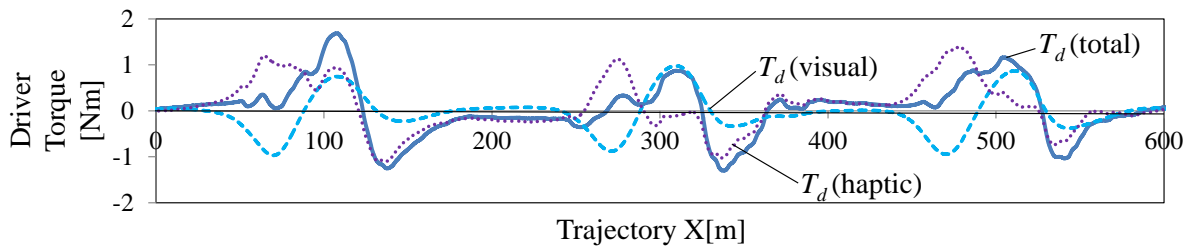


図 5.27 ドライバトルクの視覚由来成分と力覚由来成分の時刻歴応答
(Subject B)

5.7 まとめ

本章では，第 4 章で提案した駐車車両回避における Shared control の制御設計について，その有効性を検証するためにドライビングシミュレータを用いた実験検討を示した．また提案する Shared control におけるドライバと制御システムの協調関係について，その基本原理を解明するために，車両の運動のダイナミクスを考慮した理論解析をおこない，反力制御トルクゲインの大きさに物理的な意味づけをおこなった．さらには，ドライビングシミュレータ実験で得られた実測値を使って，ドライバモデルの内部パラメータを同定し，ドライバの運転操作の変容メカニズムを定量的に整理した．得られた主な知見は次の通りである．

- (1) 操舵反力制御によって，多くの高齢ドライバは規範運転に導かれる．また DYC を組み合わせると，第 3 章と同じく，反力制御トルクとドライバトルクの干渉度合いは低減し，規範運転への誘導がさらに高まる．車両ふらつきやステアリングホイールの操舵角速度が低減し，ドライバは運転しやすい車両が得られる．
- (2) 車両の運動力学に基づいた理論解析から，規範ヨーレイト追従制御における人間・機械のシェアード・コントロール比率を理論的に導出した．ドライバと機械が同じプロファイルを有するという前提を置けば，今回の実験で選定した反力制御トルクゲイン $K_a = 4.0 \text{ Nm/rad}$ は，その比率が 0.5 相当であり，高い協調特性が期待できる設定であったことを示した．

- (3) 上記のシェアード・コントロールの比率を応用し，制御システムの軌跡追従性能に対して **DYC** が及ぼす影響を解析した．**DYC** はタイヤのセルフアライニングトルクを補償する効果を有し，反力制御トルクのゲインを変化させずに，すなわち規範教示の強さを変化させずに，制御システムの軌跡追従性能の向上が可能であることを定式化した．また，**DYC** によってセルフアライニングトルク項を補償することは，パワーアシストを単純に強くする方法に比べ安定的なステアリングの制御系が構築できることを考察した．
- (4) 前方注視ドライビングモデルによるパラメータ同定結果から，**DYC** を組み合わせたシェアード・コントロール下においては，ドライバはコース誤差の認知遅れをより積極的に力覚教示で補償するような運転行動に変化している可能性を明らかにした．また力覚はドライバに対して遅れが小さい規範運転教示ツールの一つであるという考え方を提案した．

第 6 章

実験車両を用いた有効性検証

6.1 はじめに

第 5 章までに、提案する Shared control システムの制御設計およびドライビングシミュレータ実験結果を示した。理論解析結果や実験結果の考察からは、規範運転に導く機能としての操舵反力制御の有効性が確認された。また DYC を組み合わせることで、操舵支援のゲインを小さくせずとも、軌跡追従性能とステアリングのトルク干渉の問題が両立することを示した。

ステアリングの Shared control に関する既往研究には、ドライビングシミュレータを用いた検証実験が多く報告されている。例えば Mudler らは、固定式のドライビングシミュレータを使って緊急回避操作時におけるステアリング Shared control の有効性を評価している[115]。Mars らは、固定式のドライビングシミュレータ上に、晴れの場合と霧がかかっている場合の 2 種類の天候条件を設定し、ステアリングの力覚呈示によって、視覚情報の乏しさを補償する効果を検証している[116]。その他、先行車追従シーンを評価した Ueda らの研究や[117]、車線変更支援を評価した高橋らの研究も[118]、実験的検討の方法として、ドライビングシミュレータが用いられている。廣川らは、スケールカー・シミュレータと呼ばれるシミュレータを用いて実験をおこなっている[119]。ここで、スケールカー・シミュレータとは、1/10 スケールのモデルカーと、運転席を模したシミュレータから構成される。実際に動く 1/10 スケールカーには複数のカメラが搭載されており、カメラから得られた画像を展開分割しシミュレータの運転席周辺に配置した画面に映し出すことで、被験者にスケールカーの運転席視点での映像を提示する。このシステムを用いて、廣川らは駐車運転技量育成の実験をおこない、力覚呈示の効果を検証している。

本章では、これまで確認した提案システムの有効性を実車で確認することを目的とする。実車評価をおこなうことで、ドライビングシミュレータでは再現が難しい車両

の加速度感や繊細な操舵感を含めた検証を行い、真の有用性を示すことがその目的である。またシステムの製品化の観点からは、提案する Shared control システムが世にある車両のアクティブ制御技術で作動の実現が可能であることを示すことは意義が大きいと考えられる。そこで本章では、はじめに超小型電気実験車を用いた実験検討を示す。この実験は基礎的検討に位置づけられ、実車でもドライビングシミュレータ実験と同じ傾向の結果が得られることを確認する。また車両実験に関する様々な基礎的知見を得ることも目的としている。得られた基礎的知見は、次の市販車改造実験車に生かされる。次に、市販車改造実験車を用いた実験検討を示す。この検討では、実験車の改造内容と Shared control の制御モデルの具体的な実装方法を述べ、製品化をより具体的に想定して、システムの実装形態を一案として示す。実験では、詳細な被験者実験をおこない、経路追従性能とステアリングのトルク干渉の関係を定量的に解析する。また、ドライバから得られた主な主観評価を纏め、官能評価の観点に基づいた提案システムの有効性を示すとともに、今後取り組むべき応用課題についても整理する。

6.2 超小型電気実験車を用いたレーンチェンジ実験

6.2.1 超小型電気実験車

超小型電気実験車の外観を図 6.1 に示す。トヨタ車体が上市した旧型 Coms をベースとしている。本実験車は、後輪の左右タイヤ部に 2kW(最大)の DC ブラシレスモータ(以下、インホイールモータとする)を備えており、後輪駆動型を有する。これらは dSPACE 製 DSP(Digital Signal Processor)を介して、左右独立に駆動力を指令し、制御することが可能である。この機能を用いて直接ヨーモーメント制御をおこなう。1名乗車時の車両重量は 400kg, 最大車速は 50km/h である。ステアリングには、操舵角または操舵トルクをアシスト可能なサーボモータが備わっている(最大トルク 14.7Nm)。図 6.2 に示すように、サーボモータは、ステアリングホイールとギアボックスの直結系のシャフトに対して、タイミングベルトを介して備え付けられている。

サーボモータについても，DSP を介して制御をおこなう．

図 6.3 に実験車のシステム構成を示す．後輪のインホイールモータ部には，ロータリーエンコーダがついており，これによって正確な車輪速が取得できる．車輪速から車速に変換する演算は，DSP 内でおこなわれる．実験車にはこの他，慣性 GPS ユニットの搭載している．慣性 GPS ユニットについては，本実験では車両挙動の計測用のみ用いられ(ヨーレイト，横加速度，車両軌跡計測など)，制御には用いていない．計測結果はリアルタイムで慣性 GPS ユニット本体にロギングされ，実験後にオフラインでデータが取り出される．



図 6.1 超小型電気実験車の外観

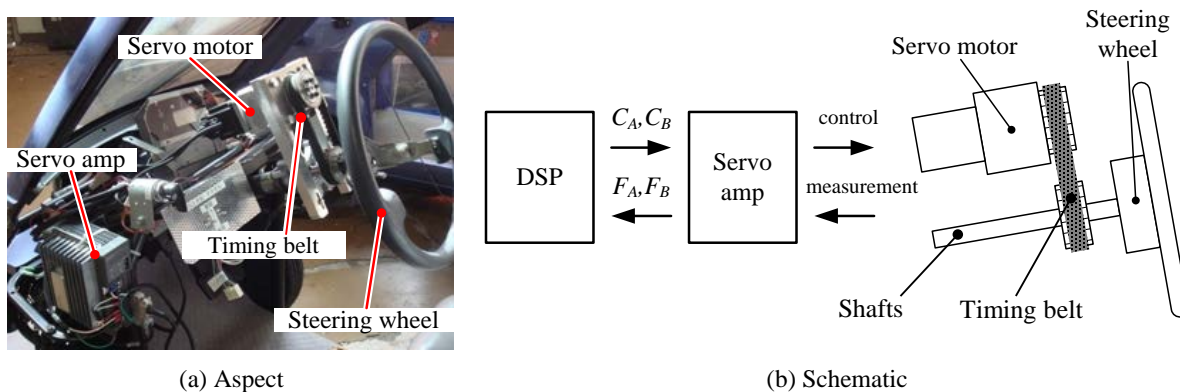


図 6.2 ステアリングの反力発生機構

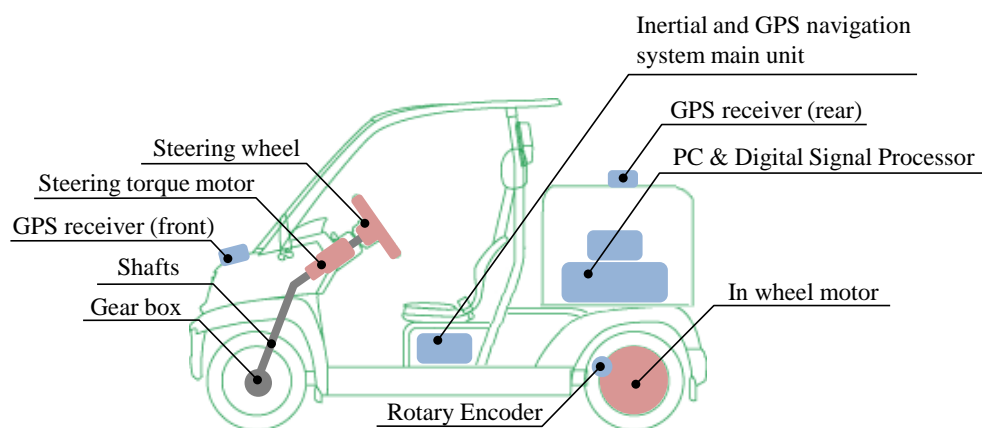


図 6.3 計測・制御システム構成

6.2.2 規範ドライバモデルの実装法の一考案

—伝達関数型フィードフォワードモデルの考案—

本実験では、第 2 章および第 3 章で示したシングルレーンチェンジをおこなう。すなわち、操舵反力制御部については、図 2.4 に示す前方注視一次モデルによる規範ドライバモデルが設定される。また DYC 制御については図 2.5 に示す舵角比例制御が設定される。これらの制御モデルは汎用市販ソフト Matlab/Simulink で構築され、ビルド(C ソース化)およびコンパイルによって DSP に実装される。今回、制御モデルの実装に対して、一つの工夫を行った。具体的には、安定的なヨーレートセンサ信号が期待できないシステム環境においても、実装ソフトが正しく作動するように制御モデルを構築した。

規範ドライバモデル内のヨー角演算について、図 6.4 に示すようにヨーレートセンサのセンサ信号を積分することで、ヨー角を得ることを考える。図 6.5 の青線のように、例えばマニュアル運転で滑らかなレーンチェンジをしたとしても、高度なフィルタ処理が施されていないヨーレートセンサ信号は、センサノイズや路面外乱などの影響により多くのノイズが載った信号となっている(図 5.5 中段の赤線)。その結果、その信号を用いて演算されたヨー角は図 6.5 下段のようにガクガクとしたものになってしまう。この場合、モデル上で演算される軌跡は、図 6.5 上段の赤線のように、実際の軌跡とは全く異なった軌跡を演算してしまうことになる。このような事象は、規範ド

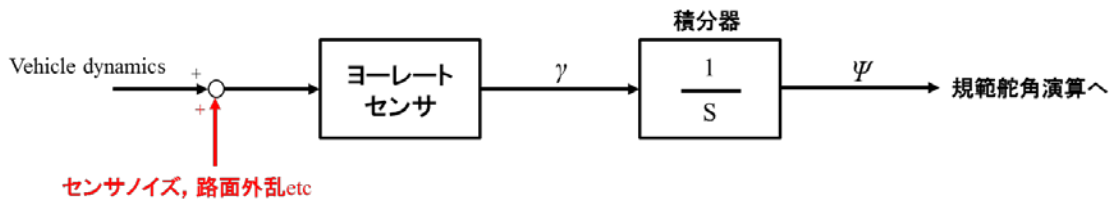


図 6.4 ヨー角演算の一例

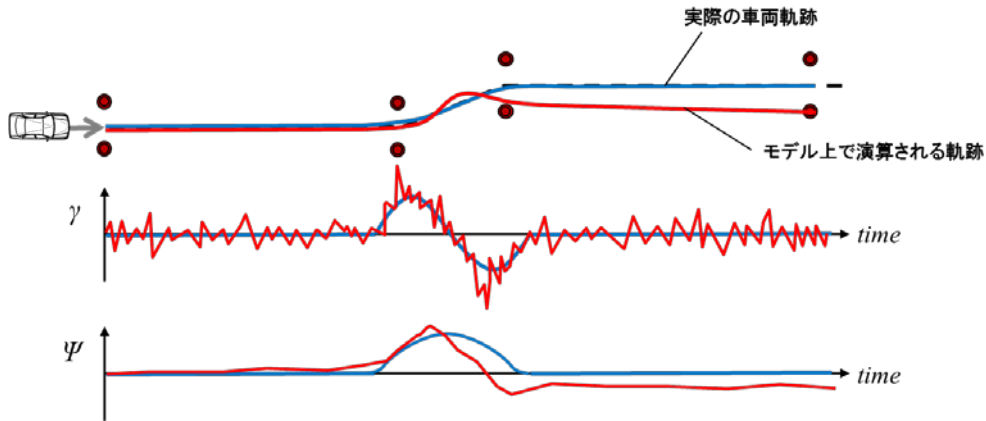


図 6.5 実際の車両軌跡とモデル上で演算される車両軌跡の差異

ライバモデルの規範舵角演算に対して非常に大きな影響を与えてしまう。すなわち、この状態では、規範ドライバモデルの規範たる作動は達成されない。このように、実装モデル内に積分要素を有する構成を取った場合、正確な制御が難しくなる場合がある。そこで今回は積分要素を不要とする実装構成を考案した。改めて前方注視一次規範ドライバモデルを式(6.1)に示す。

$$\theta_{sw}^* = \frac{h_s}{1 + \tau_{ns}s} \{Y_s - (Y_c + T_{ps}V\dot{\psi})\} \quad (6.1)$$

定常円旋回を仮定すれば、自車両位置とヨー角の関係は式(6.2)で定義される。

$$\dot{\psi} = \frac{\dot{Y}_c}{V} \quad (6.2)$$

式(6.1)に式(6.2)を代入することで、前方注視一次モデルは式(6.3)に変形できる。

$$\theta_{sw}^* = \frac{h_s}{1 + \tau_{ns}s} \{Y_s - (Y_c + T_{ps}V\dot{Y}_c)\} \quad (6.3)$$

さらに，横加速度とヨー角の関係は，定常円旋回を仮定すると式(6.4)で定義される．ここで， n はステアリングギヤ比， A はスタビリティファクタ， V は車速， l はホイールベースである．

$$\begin{aligned}\ddot{Y}_c &= \frac{1}{n} \frac{1}{1+AV^2} \frac{V^2}{l} \theta_{sw}^* \\ &= G_{\delta}^{A_y} \theta_{sw}^*\end{aligned}\tag{6.4}$$

式(6.4)に式(6.3)を代入し伝達関数形式で式の変形を行えば，規範ドライバの目標軌跡に対する規範ステア角は式(6.5)で定式化できる．式(6.5)は式(6.1)より導かれていることから，本式は伝達関数で表現された規範ドライバモデルと言える．

$$G_{Y\theta}(s) = \frac{\theta_{sw}^*}{Y_s} = \frac{1}{G_{\delta}^{A_y}} \times \frac{s^2}{\frac{\tau_{ns}}{h_s G_{\delta}^{A_y}} s^3 + \frac{1}{h G_{\delta}^{A_y}} s^2 + T_{ps} s + 1}\tag{6.5}$$

式(6.5)を用いた操舵反力制御部の実装モデルを図 6.6 に示す．ヨーレートセンサ信号を用いずに，ロータリーエンコーダの信号のみから，反力制御トルクが決定できている．後述の実車実験では，本制御モデルを実装した．

図 6.7 は式(6.5)内の規範ドライバ前方注視時間を変えた時の規範ステア角と車両軌跡の関係をシミュレーションした結果である．ここで車両モデルは2輪モデルを用いており，車両諸元は実験車に揃えた．また規範ステア角を2輪モデルの入力とした(実ドライバの入力はゼロ，DYCは考えない)．図 6.7 からは，式(6.5)のパラメータを調整することで，狙う車両軌跡を自在に設定できることがわかる．

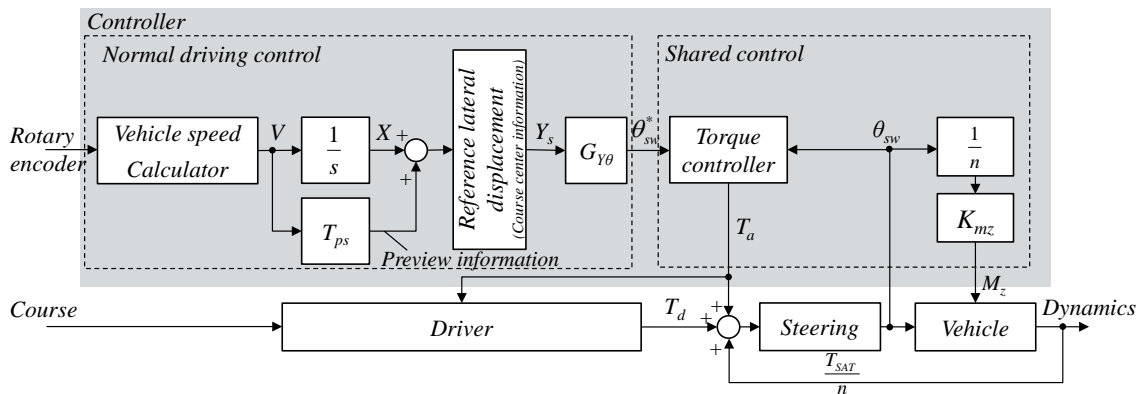


図 6.6 操舵反力制御部の制御モデル構成

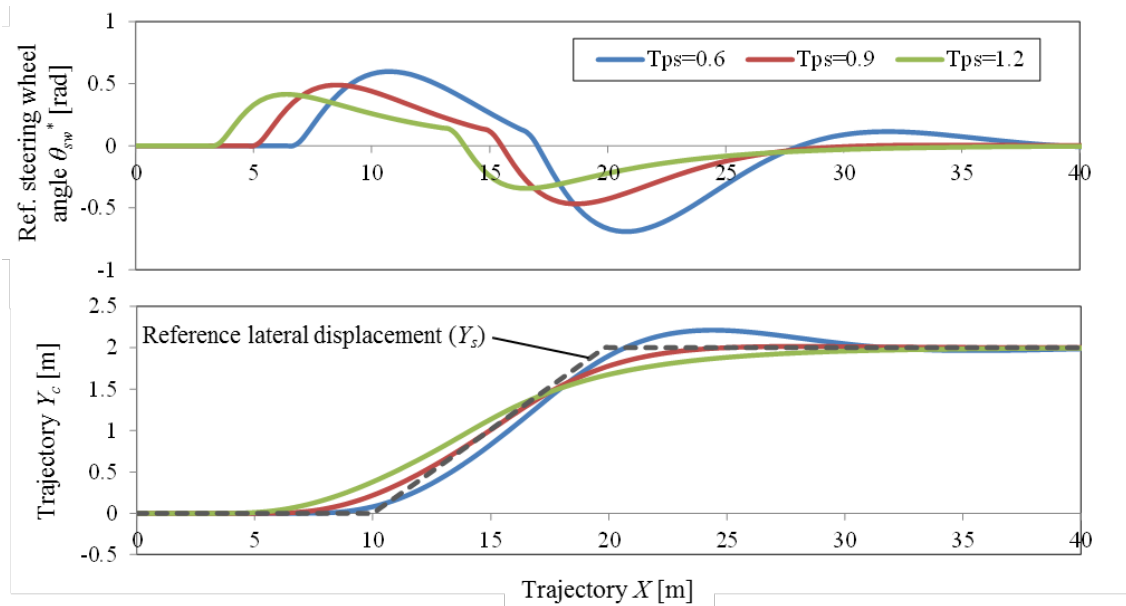


図 6.7 規範ドライバ前方注視時間と車両軌跡の関係

6.2.3 ドライバの操舵トルクの推定方法

実車実験において、ドライバの操舵トルクは直接的に計測ができない。従って、本章においても、3.3.3 節同様に外乱オブザーバを用いて推定する。

ステアリングまわりの運動方程式は、線形モデルを仮定すると式(2.6)で定義できる。

$$\theta_{sw} = \frac{1}{J_s s^2 + C_s s} \left(T_d + T_m - \frac{T_{SAT}}{n} \right) \quad (2.6)$$

ここでセルフライニングトルク T_{SAT} は式(2.8)であった.

$$T_{SAT} = 2\xi C_f \left(\frac{\theta_{sw}}{n} - \beta - \frac{l_f}{V} \gamma \right) \quad (2.8)$$

車両の動特性を無視し, 定常円旋回を仮定すれば, 定常ヨーレイトゲイン G_δ^γ , 定常スリップ角ゲイン G_δ^β を用いて, 式(2.8)は式(6.6)のように変形できる.

$$T_{SAT} = 2\xi C_f \left(1 - G_\delta^\beta - \frac{l_f}{V} G_\delta^\gamma \right) \frac{\theta_{sw}}{n} \quad (6.6)$$

式(6.6)を式(2.6)に代入すれば, ドライバトルクとステアリングモータトルクの入力に対するステアリング舵角の関係は式(6.7)の伝達関数で定式化できる.

$$\theta_{sw} = \frac{1}{J_s s^2 + C_s s + \frac{2\xi C_f}{n^2} \left(1 - G_\delta^\beta - \frac{l_f}{V} G_\delta^\gamma \right)} (T_d + T_m) \quad (6.7)$$

式(6.7)を用いて, ドライバトルクの外乱オブザーバを構成する. 具体的には, ステアリングのモータトルク T_m とステアリング舵角 θ_{sw} の実測データから, 図 6.8 のブロック線図を用いてドライバトルクを推定する.

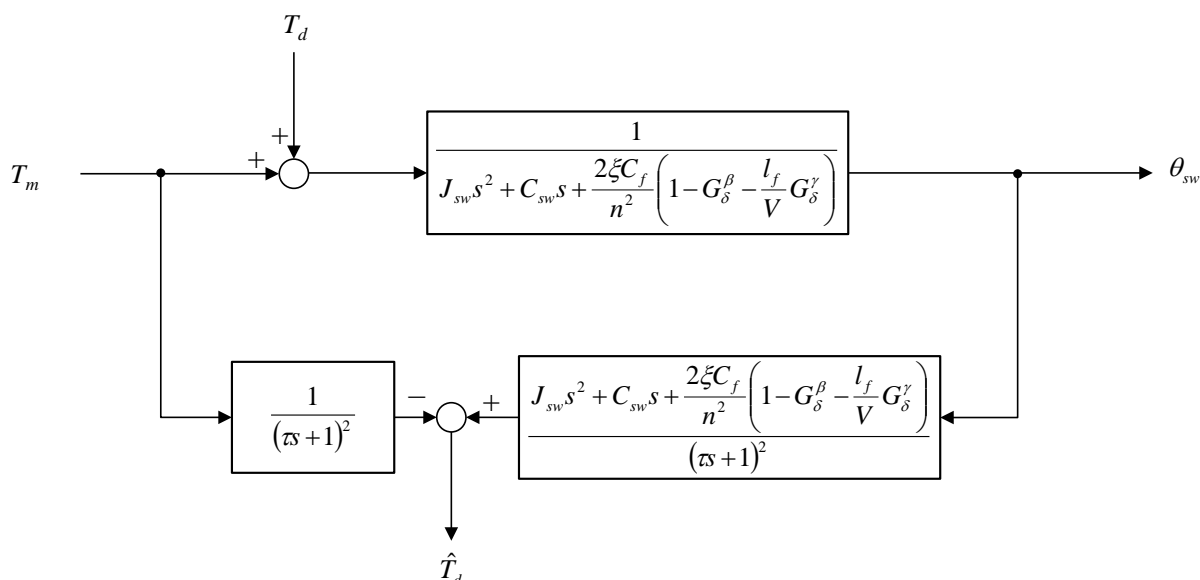


図 6.8 外乱オブザーバを用いたドライバトルクの推定

6.2.4 実験条件

構築した制御則，および実装モデルを評価するために実車実験をおこなった．実験場所は，トヨタ自動車(株)東富士研究所内にあるテストコースである．図 6.9 に実験コースを示す．スタート位置から 30m の区間は，加速するための助走区間である．助走区間後は 20km/h の定常状態(速度はマニュアル操作)でシングルレーンチェンジをおこなう．表 6.1 は今回設定したパラメータの設定値である．規範ドライバの各パラメータについては，実験前に試走をおこない，トヨタ自動車(株)の上級ライセンスを保有するテストドライバーらの意見を聞きながら試行錯誤的に決定した．

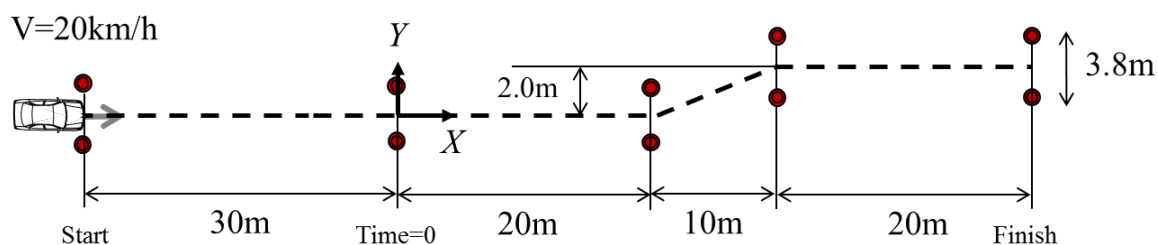


図 6.9 実験コース

表 6.1 操舵反力制御部およびDYC制御部のパラメータ

<i>Parameters</i>	<i>Values</i>	<i>Unit</i>
Reference driver gain h_s	1.5	N
Reference time constant τ_{ns}	0.05	s
Reference preview time T_{ps}	1.2	s
Steering guidance gain K_a	3.0	Nm/rad
DYC gain K_{mz}	4000	Nm/rad

6.2.5 実験結果

まず完全自動運転が出来ることを確認するために、反力制御トルクゲイン K_a を 6.0Nm/rad に上げ、手放し運転をおこなった(速度制御はマニュアル、ステア制御は自動). ここでは DYC は非作動とした. 図 6.10 は実験時の動画の数コマを示す. 実験では、2m のレーンチェンジを手放し運転状態で達成することができ、提案する伝達関数型フィードフォワード規範ドライバモデルが期待通りの動作をすることが確認された.

次に、Shared control の実験結果を示す. 実験条件は、非制御(Without control), ステアリング制御(Steering control), DYC を組み合わせた (Steering + DYC control) の 3 条件である. 図 6.11 を用いて、ステアリング制御の効果(Steering control and Steering+DYC control)について評価する. 図 6.11 の 4 段目はステア角である. 非制御

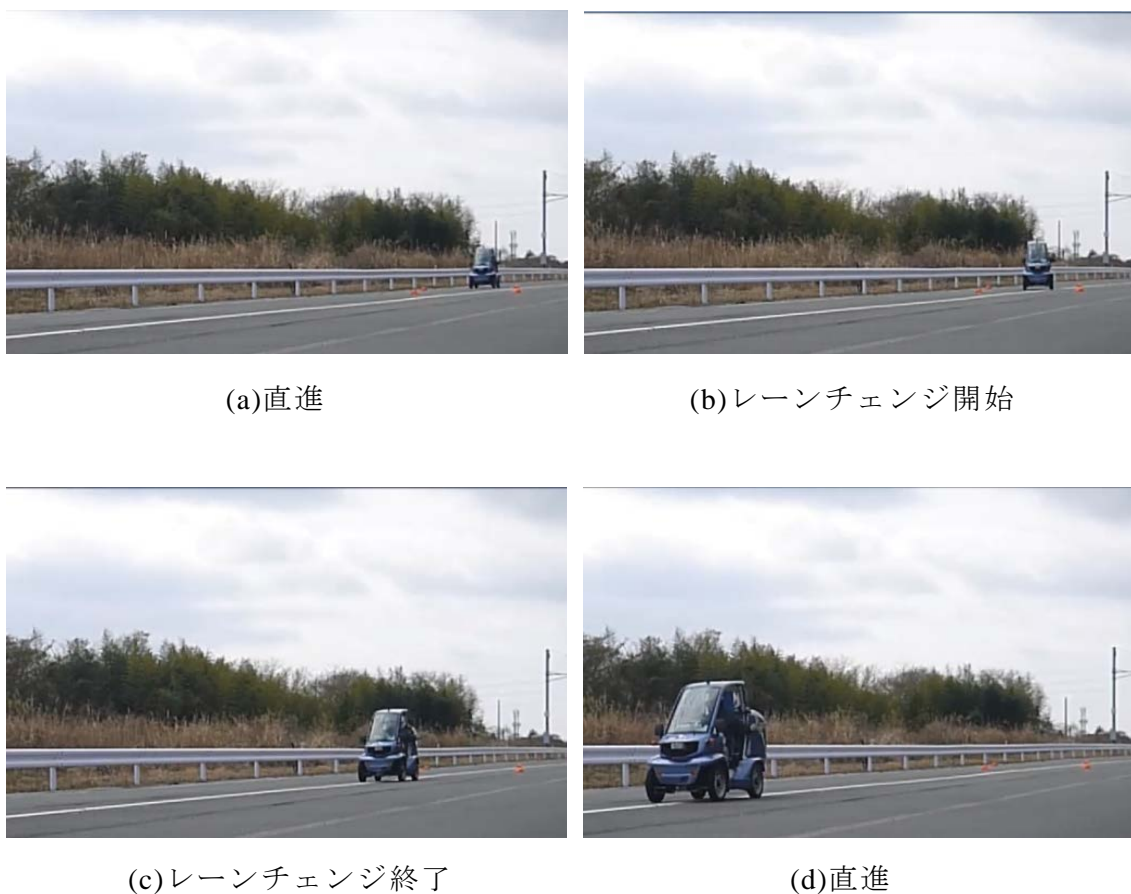


図 6.10 完全自動運転でのシングルレーンチェンジ

の場合、操舵を開始するタイミングが遅い。その結果、4.5sあたりの左に切る操舵と、5.5sあたりの右に切る操舵は非常に大きくなっている。この影響により、2段目のヨーレートおよび1段目の車両軌跡は急変が発生していることが確認出来る。一方、Steering control および Steering+DYC は、いずれも操舵を開始するタイミングが早まっている。また、ステア角の入力が滑らかになっており、車両の実軌跡は、破線で示す規範ドライバモデルの参照軌跡に近づく結果となっている。この傾向は、ステアリングの能動的な反力トルクの効果であり、第2章のドライビングシミュレータ実験で得られた結果と一致する。

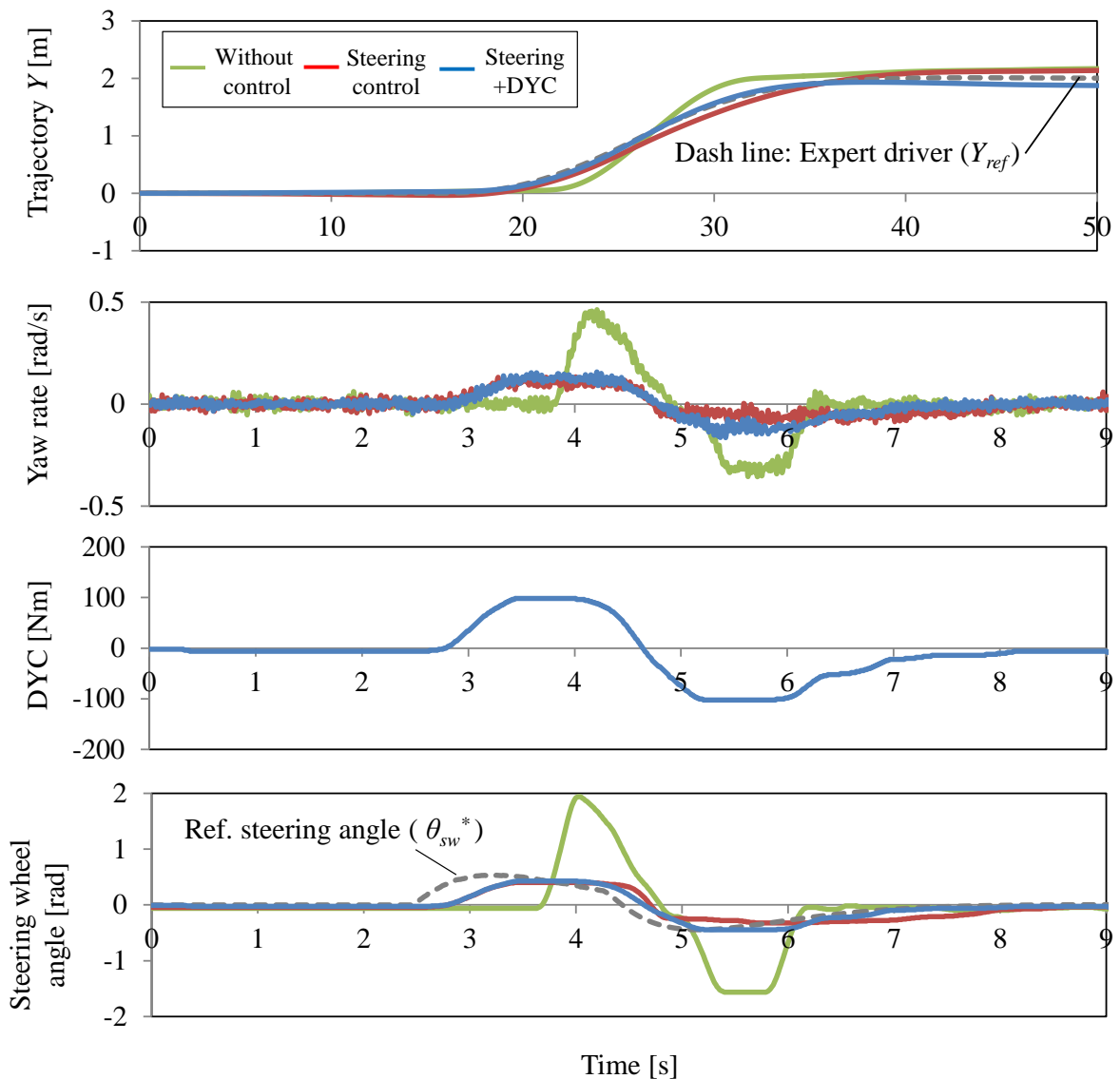


図 6.11 時刻歴応答(車両挙動関係)

次にステアリング周りのトルクについて考察を行う。図 6.12 は各制御条件におけるドライバトルクまたはコントロールトルクの時系列結果である。非制御の場合、ドライバトルクには、ふらつきが確認出来る。またそのピーク値も大きい。一方、Steering control または Steering+DYC control の場合は、滑らかなトルク入力に変容している。

操舵開始のタイミングに注目する。非制御の場合、3.5s あたりからトルク入力を開始しており、直進状態からレーンチェンジ状態に遷移するタイミングは、制御ありの各条件と比較すると遅いと。一方、Shared control 状態では、3s あたりをピークにドライバトルクとコントロールトルクの初期の相互作用が発生しており、操舵開始のタイミングが早まっていることが確認出来る(図 6.11 の 4 段目のステア角からも確認できる)。実際に試乗してみると、ステアリングを切り始めるきっかけが、コントロールトルクから得られるような感覚がある。初期の相互作用はこれに一致すると考えられる。

最後に DYC の効果を考察する。図 6.13 の上段はドライバトルクとコントロールトルクの差の二乗積分結果である。ここで、積分区間は時刻 0s から 9s とした。この値が小さいほど、トルクの干渉度合いが小さいことを示している。一方、下段は規範ドライバモデルの目標軌跡と実横変位の差の二乗積分結果である。この値が小さいほど、コース追従性能が高いことを示している。積分結果を確認すると、Steering control の場合は、非制御と比較してコース追従性能は向上しているが、トルク干渉が大きくなっている。一方、提案する Steering+DYC control の場合は、高いコース追従性能を維持しながら、トルク干渉を同時に低減することが出来ている。ドライバコメントの一つに、「DYC を加えると、機械による車両の動かされた感覚が小さくて良い」というものがあつた。このコメントは、上記結果を定性的に表現したものと考えられる。

以上より、提案システムは、コース追従性能とトルク干渉問題を同時に取り扱え、高い人間-機械協調特性を実現できる可能性があることが示唆された。

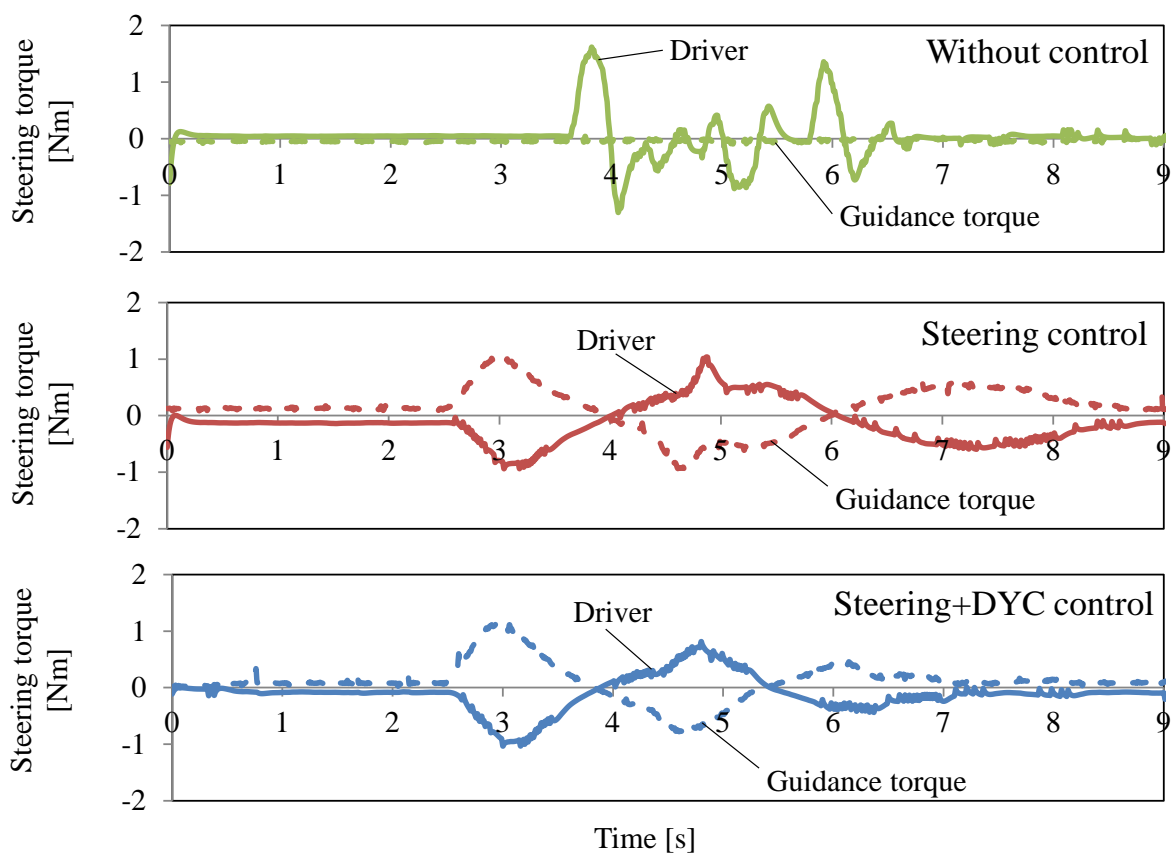


図 6.12 時刻歴応答(ステアリングトルク関係)

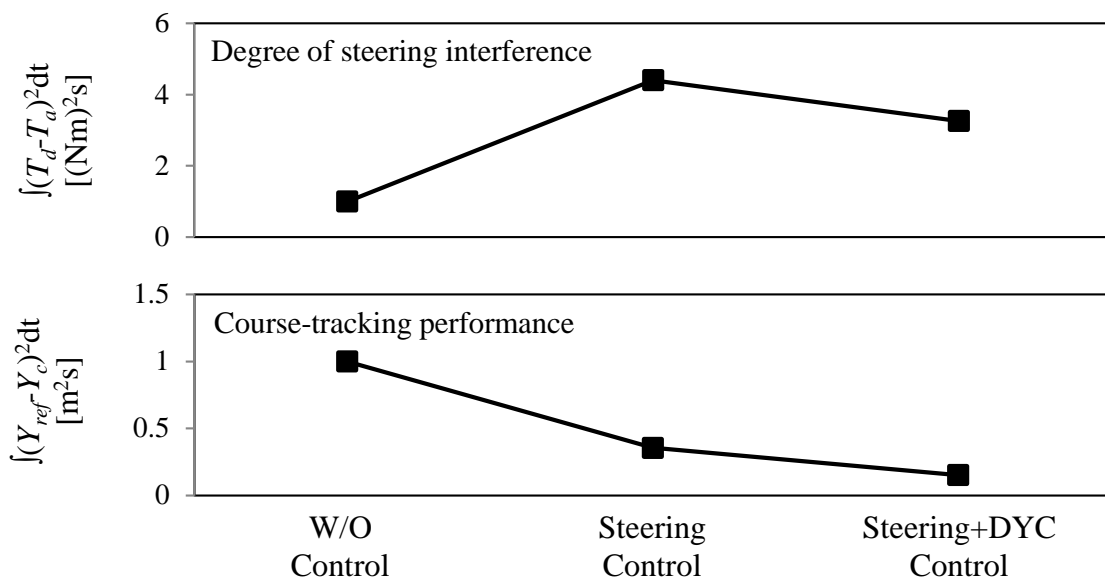


図 6.13 ステアリングのトルク干渉とコース追従性能の関係評価 (二乗積分比較評価)

6.3 市販車改造実験車を用いたレーンチェンジ実験

6.3.1 市販車改造実験車

本節では，市販車改造実験車を用いた実験検討を示す．市販車を実験車両のベースとすることで，運転席からの視界や横加速度感は，市販の車両を運転している感覚に近い環境を構築することができる．またステアリングの操舵感(ここではタイヤ反力から発生する受動的な反力を指す)も普段の感覚に近いものが得られるため，普段の車両挙動感覚で実車実験が可能である．このような実験環境の中で，提案する Shared control システムが狙い通りに作用することが確認できれば，真の有用性を示すことができると考えられる．また研究の主眼とは異なるが，実装するアクティブ制御技術のハード，ソフト両方を，既存の市販車に対してどのように組み入れたら良いかという設計知見を整理できることは，提案技術の商品化に対しては非常に重要であると考えられる．

図 6.14 は構築した市販車改造実験車の外観図と，搭載されている自律運転知能システムのためのモジュール構成である．小型車に属される市販車をベースとしており(空車重量 1415kg)，前輪駆動方式のパワートレイン，コラムアシスト方式の EPS(Electric power steering)を前提とする．このベース車両に対して，操舵反力制御をおこなうためのステアリングまわりのシステム改造と，DYC を作動させるための左右駆動力配分アクチュエータの搭載が主な特徴である．その他，ステアリングの操舵角を計測するためのステアリングセンサ，ドライバの入力トルクを計測するためのトルクセンサ，車両運動状態を計測するための慣性計測ユニット(以下，IMU とする)，車速を計測するための車輪速センサ，後輪の左右のタイヤトルクを計測するためのトルクメータ等を備えている．得られた各種センサ信号は，汎用車両制御 ECU(dSPACE 社製，以下，MABX とする)に入力され，操舵反力制御，または DYC のための制御指令値が演算される．演算値は，操舵反力制御については EPS_ECU(EPS_electric control unit)に，DYC についてはアクチュエータ用インバータに指令される．以下にその詳細を説明する．

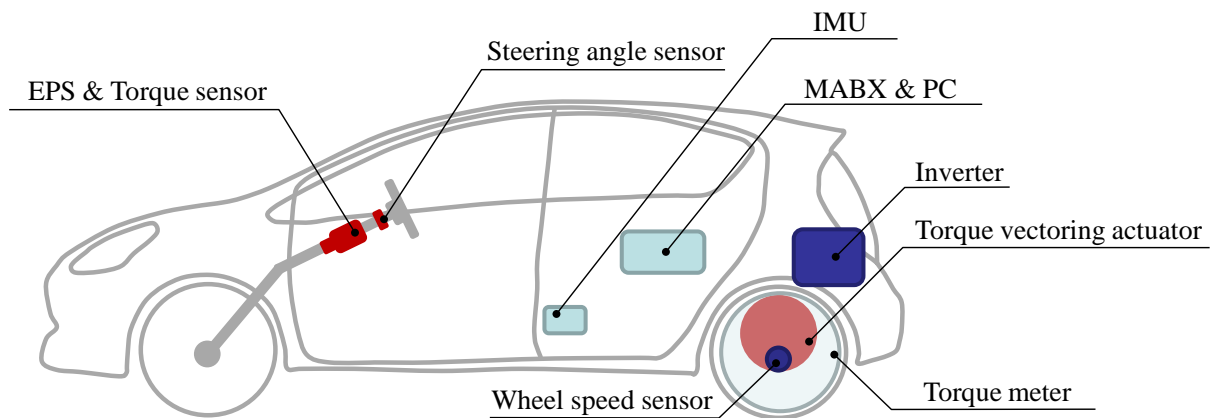


図 6.14 システム構成

【操舵反力制御部】

操舵反力制御部には，第 2 章で示した舵角入力方式の前方注視点操舵モデル(式(2.1))を規範ドライバモデルとして実装する．

$$\theta_{sw}^* = \frac{h_s}{1 + T_{ns}s} \{Y_s - (Y_c + T_{ps}V\psi)\} \quad (2.1)$$

6.2.2 節の超小型電気実験車を用いた検証では，ヨー角信号を不要とするフィードフォワードモデルを提案したが，本実験では高精度な IMU を取り付け，式(2.1)を直接実装することにした(図 6.15)．なお，本市販車改造実験車についても，6.2.2 節のフィードフォワードモデルは正しく作動することを確認している．表 6.2 に，採用した高精度 IMU の諸元を示す．この高精度 IMU は 6 軸の加速度および角速度信号を計測することができる．また，内部でフィルタ処理および補正処理を施し，方位角を演算出力する機能を有する．そこで実験では，この演算出力される方位角を用いて規範ステアリング舵角を演算した．

図 6.16 は規範ドライバモデルの具体的な実装ブロック図である．ベース車両に備わる車速信号(先述の車輪速センサから演算，CAN(Control Area Network)を介して取得)および高精度 IMU が出力するヨー角信号 ψ を用いて，横方向自車位置 Y_c を推定する．前後方向自車位置 X は，車速信号 V を時間積分することで求め，前方注視点での規範

ドライバモデル目標軌跡 Y_s の演算に用いられる。計算された横方向自車位置 Y_c および目標軌跡 Y_s は式(2.1)に代入され、規範ステアリング舵角 θ_{sw}^* が計算される。規範ステアリング舵角 θ_{sw}^* は、ベース車両に備わる実ステアリング舵角信号 θ_{sw} (先述のステアリングセンサで計測、CAN を介して取得) と比較され、反力制御トルク T_a が求められる。最後に、反力制御トルク T_a にモータのトルク—電流換算係数 C_{TA} を掛けることで、能動的な反力制御トルク T_a に応じた電流指令値 C_a を求める。ここまでの、MABX 内で演算する。

求められた電流指令値 C_a は、CAN を介して MABX から EPS_ECU に送信される。電流指令値 C_a は、EPS_ECU 内で EPS の基本機能であるパワーアシストのための電流指令値 C_{asit} (ドライバの操舵入力に比例したアシスト) と加算され、EPS モータへの最終の指令電流が決定される(内部で電流フィードバック制御をおこなう)。

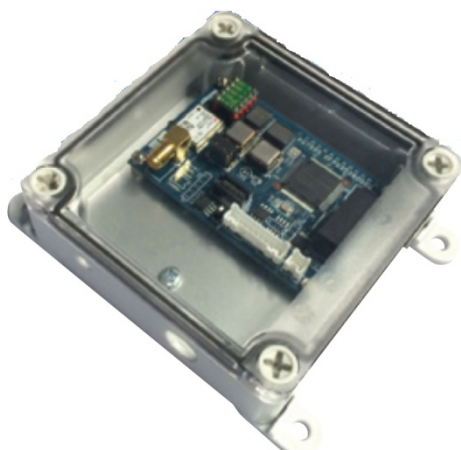


図 6.15 慣性計測ユニット(IMU)外観

表 6.2 慣性計測ユニット(IMU)主要諸元 多摩川精機製

<i>Item</i>	<i>Specifications</i>	<i>Unit</i>
Outline dimensions	75(L)×50(W)×16.1(H)	mm
Output signal	CAN (500kbps)	—
Yaw angle accuracy	1	deg rms

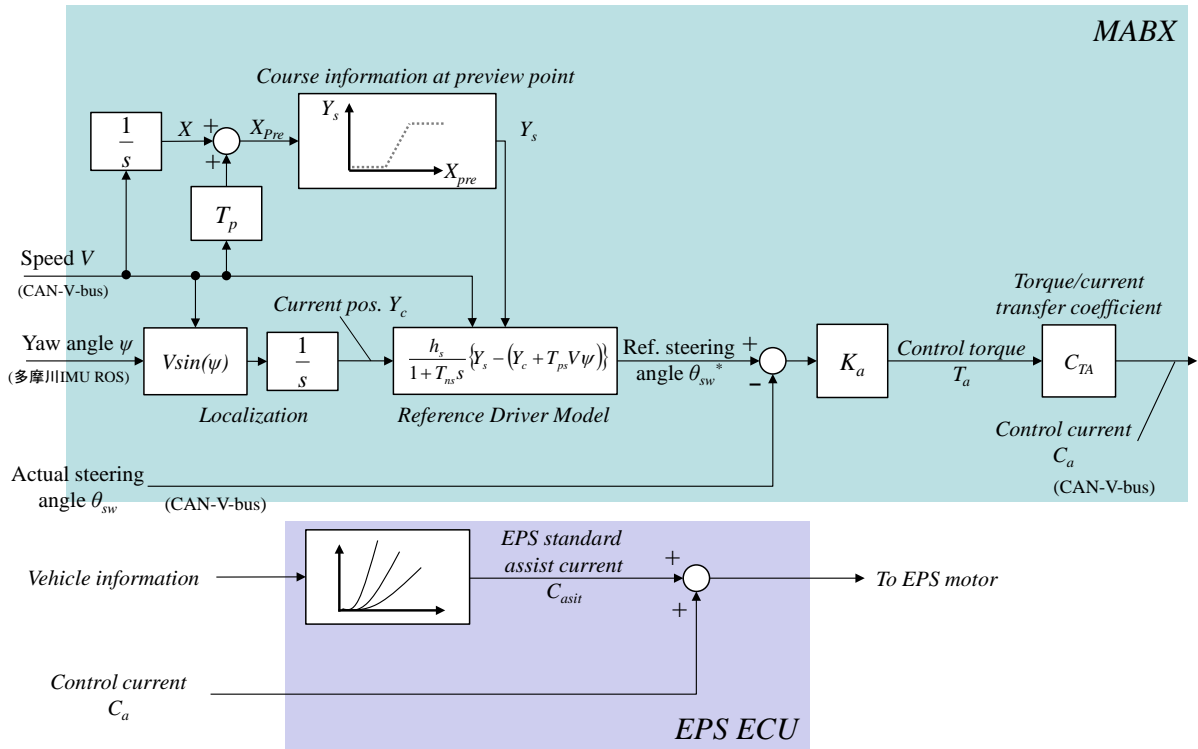


図 6.16 操舵反力制御部の実装モデル構成

【DYC 制御部】

左右駆動力配分アクチュエータは、左右のトルク配分を行うための全ギアアセンブリ方式のギアボックスと、トルク配分量を制御するためのコントロールモータから構成される。図 6.17 はシステムの概略図である。MABX 内で演算されたコントロールモータ指令トルク T_{con} は、CAN を介してコントロールモータ用インバータに送信される。インバータは内部に有するトルク—電流変換マップを用いて、コントロールモータに電流指令をおこなう(内部で電流フィードバック制御をおこなう)。後輪の左右タイヤは、ドライブシャフトを介して左右駆動力配分アクチュエータと結合されており、コントロールモータへの指令量に応じて左右のトルク配分が成される。すなわち、コントロールモータの発生トルクがゼロの場合は、後輪の左右タイヤは負荷なしで転動し、コントロールモータがトルクをギアボックスに加えると、そのトルク量に応じて、左右タイヤに前後逆向きの駆動力差が発生する。この駆動力差を用いることで、車両軸周りに DYC を発生させる[120] [121] [122]。

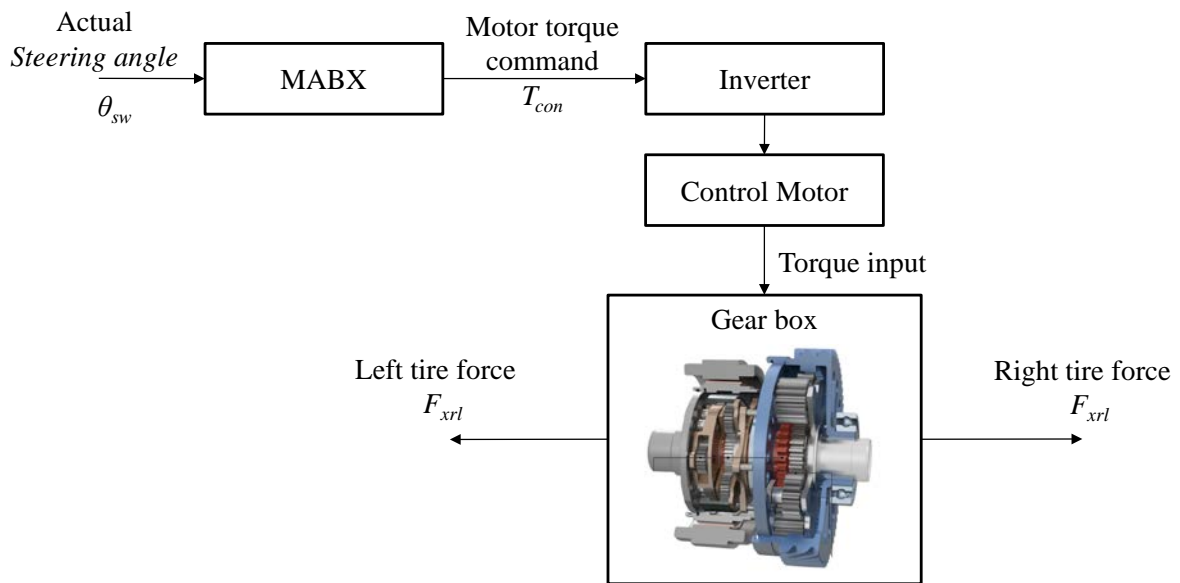


図 6.17 DYC 制御部のシステム構成

DYC の制御則は、第 2 章と同じく式(2.3)の舵角比例制御を採用した。

$$M_{DYC} = K_{mz} \times \frac{\theta_{sw}}{n} \quad (2.3)$$

ここで、コントロールモータの指令トルク T_{con} と車両軸周りの M_{DYC} の関係を整理しておく。図 6.18 のようにシステムの各パラメータを定義すると、右後輪の前後力 F_{xrr} および左後輪の前後力 F_{xrl} はそれぞれ式(6.8)、式(6.9)で定義される。

$$F_{xrr} = \frac{M_{DYC}}{t_d} \quad (6.8)$$

$$F_{xrl} = -\frac{M_{DYC}}{t_d} \quad (6.9)$$

ここで、 t_d は車両のトレッドである。ギアボックスのギア比を N_c 、タイヤ半径を r_t とすれば、コントロールモータの指令トルク T_{con} と左右タイヤのトルク差の関係は式(6.10)となる。

$$T_{con} \times N_c = (F_{xrr} - F_{xrl}) \times r_t \quad (6.10)$$

式(6.8)、式(6.9)を式(6.10)に代入すれば、コントロールモータの指令トルク T_{con} と車両軸周りの M_{DYC} の関係は式(6.11)で定義できる。

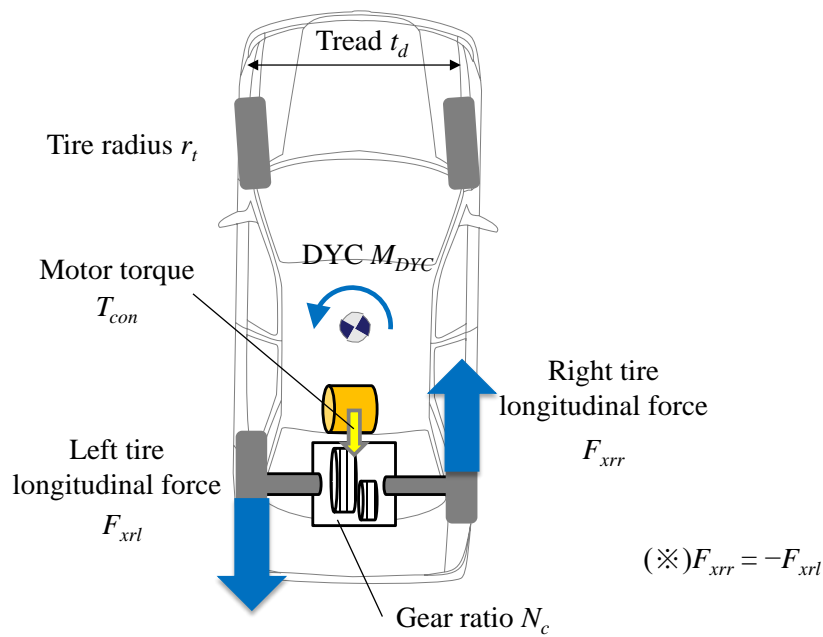


図 6.18 左右駆動力配分アクチュエータと各パラメータ

$$T_{con} = \frac{2r_t}{t_d} \times \frac{1}{N_c} \times M_{DYC} \quad (6.11)$$

6.3.2 実験条件

構築した実験車を用いて実車実験をおこなった。実験場所は、超小型電気実験車と同じく、トヨタ自動車(株)東富士研究所内にあるテストコースである。図 6.19 に実験コースを示す。今回は右側へ 3.8m のレーンチェンジをおこなうシナリオとした。最初の 50m は助走区間である。地点 0m から発進し、35km/h 程度の車速になるようにマニュアルでアクセルを操作する。地点 50m から 110m は評価区間である。35km/h の一定車速で侵入し、操舵反力制御を使いながらレーンチェンジをおこなう。

規範ドライバモデルの設定のために、トヨタ自動車(株)の S 級(トップ)ライセンスを保有するテストドライバに実験車を評価してもらった。具体的には、規範ドライバモデルのパラメータを変えながら、完全自動運転モードおよび Shared control モードを試走した。レーンチェンジの開始タイミング、レーンチェンジ中の操舵速度、ステアリングの戻しのタイミング、反力制御トルクの強さ、DYC の強さを評価してもら

った。表 6.3 に決定した規範ドライバモデルのパラメータをしめす。

被験者は、トヨタ自動車(株)の初級ライセンス以下(無級含む)の 10 名のドライバである(表 6.4, 男性 6 名, 女性 4 名, 平均年齢 40 才)。被験者には、操舵反力制御の意味を十分に説明し、反力制御トルクを適切に利用しながら、主体的にステアリング操作を行うように指示した。また、実験前には十分な慣熟走行をおこなった。制御条件は、これまでと同様、非制御(Without control)、ステアリング制御(Steering control)、DYC を組み合わせた (Steering + DYC control) の 3 条件である。本実験の注目点は、操舵反力制御によって、初級ライセンス以下のドライバは S 級のドライバの運転行動に導かれるか、また、DYC が組み合わさることで Shared control の協調特性は向上するかという点である。なお、本実験の計画は、トヨタ自動車(株)内規の「人を対象とする研究倫理ガイドライン運営要領」に従っておこなった。また実験参加者には、実験内容や個人情報の保護について説明を行い、同意を得た上で実験を行った。

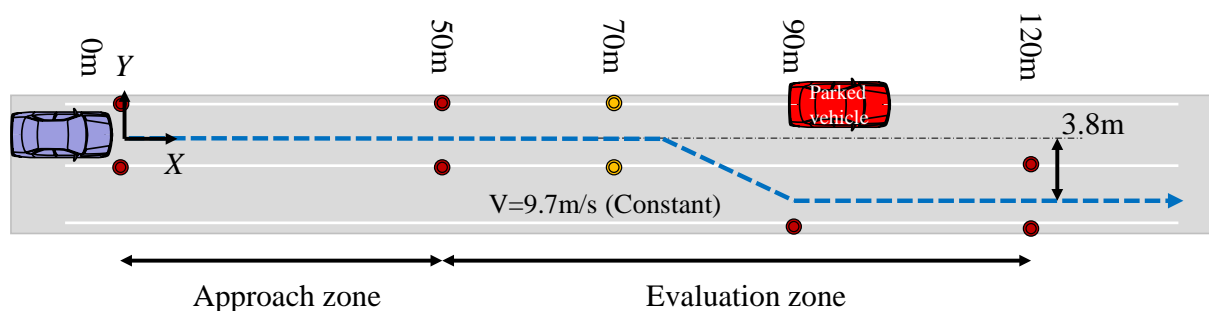


図 6.19 実験コース(市販車実験車の場合)

表 6.3 操舵反力制御部および DYC 制御部のパラメータ(市販車実験車の場合)

<i>Parameters</i>	<i>Values</i>	<i>Unit</i>
Reference driver gain h_s	0.8	N
Reference time constant τ_{ns}	0.15	s
Reference preview time T_{ps}	1.3	s
Steering guidance gain K_a	11.4	Nm/rad
DYC gain K_{mz}	10515	Nm/rad

表 6.4 被験者リスト

<i>ID</i>	<i>Male/Female</i>	<i>Age</i>	<i>ID</i>	<i>Male/Female</i>	<i>Age</i>
A	Male	40	F	Female	55
B	Female	37	G	Male	42
C	Male	31	H	Female	43
D	Male	33	I	Male	45
E	Female	42	J	Male	29

6.3.3 実験結果

図 6.20 に実験の様子を撮影した動画の数コマを示す。図 6.21 から図 6.26 には、10 名の被験者のうち Driver A, Driver F, Driver I の時刻歴応答を示す。線種はそれぞれ、緑線が Without control, 赤線が Steering control, 青線が Steering+DYC control である。また S 級ドライバの時刻歴応答結果を黒破線で示す。本節では、Driver A の時刻歴応答である図 6.21 および図 6.22 を用いて、結果を考察する。まず本実験結果からは、ドライビングシミュレータや超小型電気実験車で確認された操舵反力制御の効果が確認できる。例えば、1 段目の車両軌跡 Y_c では、Without control では操舵開始の遅れが確認されるのに対し、操舵反力制御を付加した Steering control, または Steering+DYC control では、その遅れが改善されている。この改善は、2 段目のステアリング舵角、または 3 段目のヨーレイトの波形からも確認できる。60m から 75m に注目すれば、ステアリング舵角の切り始めは遅れが小さくなっており、また切り込み量が大きくなっている。これらの運転行動は S 級ドライバの運転行動に漸近している。

DYC の効果は、レーンチェンジ後半に確認される。2 段目のステアリング舵角に注目すると、Steering+DYC control は、Steering control に比べ、の 80m から 90m のステアリング操作がより敏捷になっており、S 級ドライバの運転行動に漸近している。この改善によって、車両軌跡は Steering control で見られたオーバーシュートが低減している。ドライバ A の主観コメントの一つに「DYC が加わるとステアリングに大きな入力を入れなくても車両の向きが滑らかに変化する感覚がある」といものがあった。

これは、DYC の狙いの一つである、車両の応答性が向上し運転し易い車両が得られるという効果があらわれていると考察される。DYC によって、自身の目標軌跡は反力制御トルクで得た規範軌跡に一致させ易くなる。このことが効果的に作用することで、車両軌跡のオーバーシュートが大きく低減したと考えられる。

ステアリングまわりのトルクについて、時刻歴応答結果を図 6.22 に示す。ここで実線はドライバトルク T_d であり、3.3.3 節で述べた外乱オブザーバを用いた推定値である。破線は MABX で演算し EPS_ECU に指令された反力制御トルク T_a である。はじめに Without control を確認すると、ドライバトルク T_d はレーンチェンジ開始時に右にステアリングを切るため負のトルクが、レーンチェンジ後半は左にステアリングを切るため正のトルクが発生している。反力制御トルク T_a については、本条件は非制御状態であるため、ゼロである。次に Steering control を確認する。ドライバトルク T_d は、64m の地点において、正側にわずかにトルクが増大していることが確認される。これは 6.2.5 節の超小型電気実験車の結果の中で述べた、ステアリングを切り始めるきっかけに相当するステアリング反力であると考えられる。ドライバは、このきっかけを受けて、ステアリングにトルク入力を開始している。レーンチェンジ後半では、車両軌跡がオーバーシュートしているため、反力制御トルク T_a は左にステアリングを切るように誘導トルクを発生し続けている。一方、3 段目の Steering+DYC control では、レーンチェンジ後半の車両軌跡のオーバーシュートは大きく低減し、90m から 120m における反力制御トルク T_a はほぼゼロとなっていることが確認できる。

二乗積分評価を用いて、軌跡追従性能とトルク干渉の度合の関係を定量的に評価する。図 6.27 の上段はドライバトルクと反力制御トルクの差の二乗積分結果である。一方、下段は規範ドライバモデルの目標軌跡と実横変位の差の二乗積分結果である。ここで積分区間は X 方向車両軌跡の 50m から 120m とし、被験者 10 名の平均値および標準偏差を示す。はじめに Without control と Steering control を比較すると、軌跡追従性能が大幅に向上していることが確認できる。これは、Steering control の制御目標である規範教示が有効に作用した結果であると考えられる。次に Steering control と Steering+DYC control を比較すると、トルク干渉を低減しながら、軌跡追従性能が大

幅に向上している。この結果は、超小型電気実験車を用いた実験に則した結果である。またその標準偏差を比較すると、Steering+DYC controlはSteering controlに比べて、ばらつきが小さいことが特筆される。以上の結果より、DYCの効果を市販車改造実験車においても定量的に確認することができた。

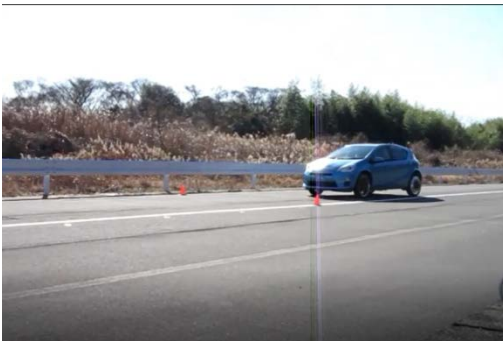
最後に被験者から得られた主な主観評価を纏める。提案システムを実装した市販車改造実験車には、様々な形式で多くの試乗参加者に乗り合わせ頂いている。ここでは、それらで得たコメントも含めて主な評価内容を整理する。なお、ここでの試乗参加者は、様々な角度からの意見を集約することを目的とするために、高齢ドライバーとは限らない。全年代でかつ運転頻度および熟練度も様々な30名程度の参加者から得た意見を纏める。表6.5はその整理結果である。得られた意見を、操舵反力制御、DYC、Shared controlの3つに分類して整理した。まず操舵反力制御については、反力制御トルクを用いて規範教示を示すという仕組みを、理解するような評価を多くのドライバーから得た。またDYCについても、DYCを組み込む狙いを適切に体感できたというドライバーが多かった。「DYCが加わると、操舵制御によるステアリングの動かされ感が小さくなって良い」という評価は、最たるものだと考えられる。さらに、本研究の主眼であるShared controlについても、その考え方に対して肯定的な意見を多く得ることができた。以上より、提案システムは主観評価からもその有効性が示されたと考えられる。一方で、応用研究につながる評価もいくつか得た。中でもスピードコントロールとの統合制御の重要性は、多くの実験参加者から同じ指摘があった。また、今回の実験評価はシングルレーンチェンジのみであったが、その他のシーンやそれらを組み合わせた複合シーンに対して、提案システムの有効性を確認していくべきだという評価も数名の参加者から得ることができた。これらの評価結果は、第7章の今後の課題の中で改めて提示したい。



(a)直進



(b)レーンチェンジ開始



(c)レーンチェンジ終了



(d)直進終了



(a)直進



(b)レーンチェンジ開始



(c)レーンチェンジ終了



(d)直進終了

図 6.20 実車実験の様子(上段: : 車外より, 下段: 車内より)

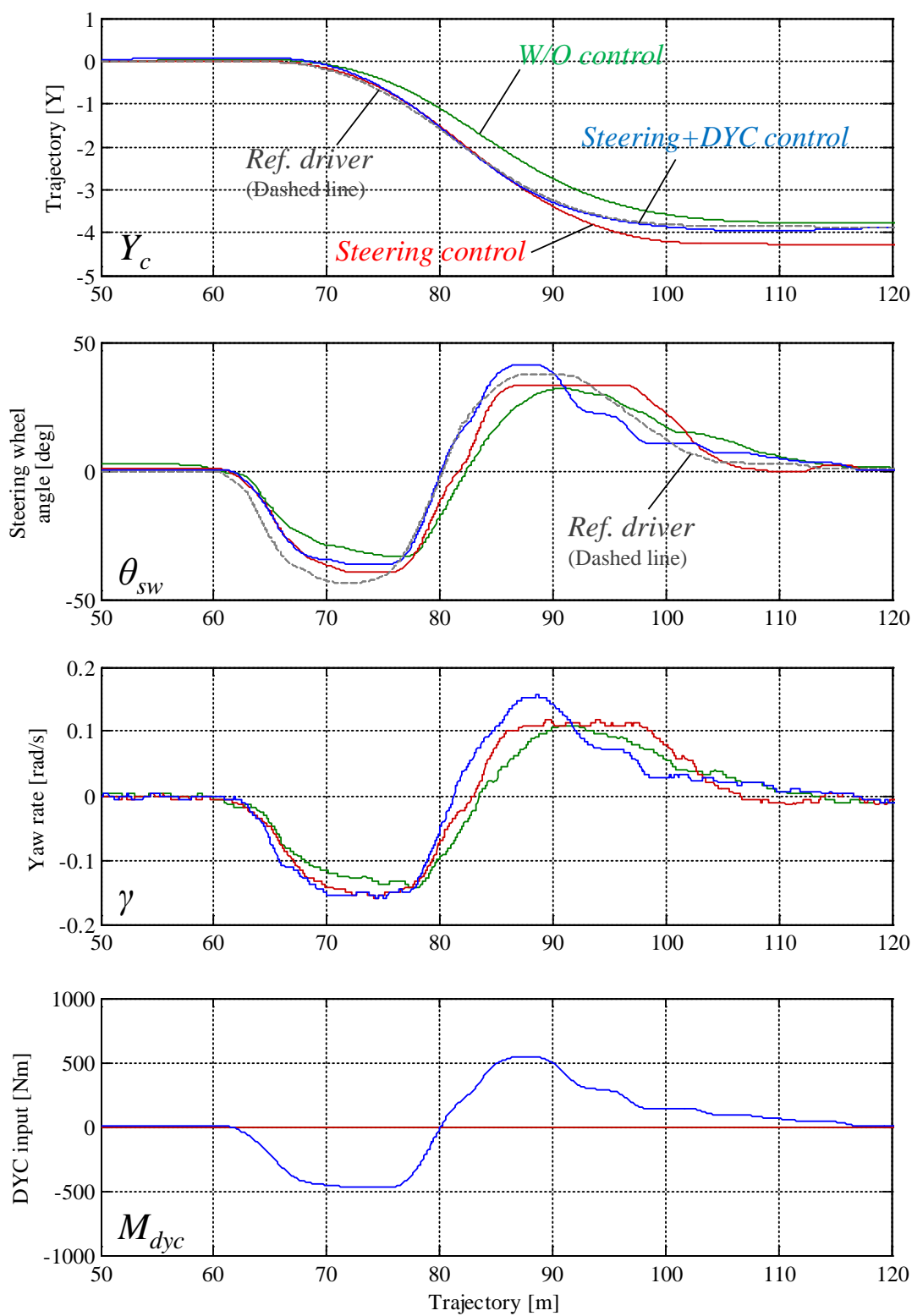


图 6.21 時刻歴応答結果(Driver A, 車両挙動関係)

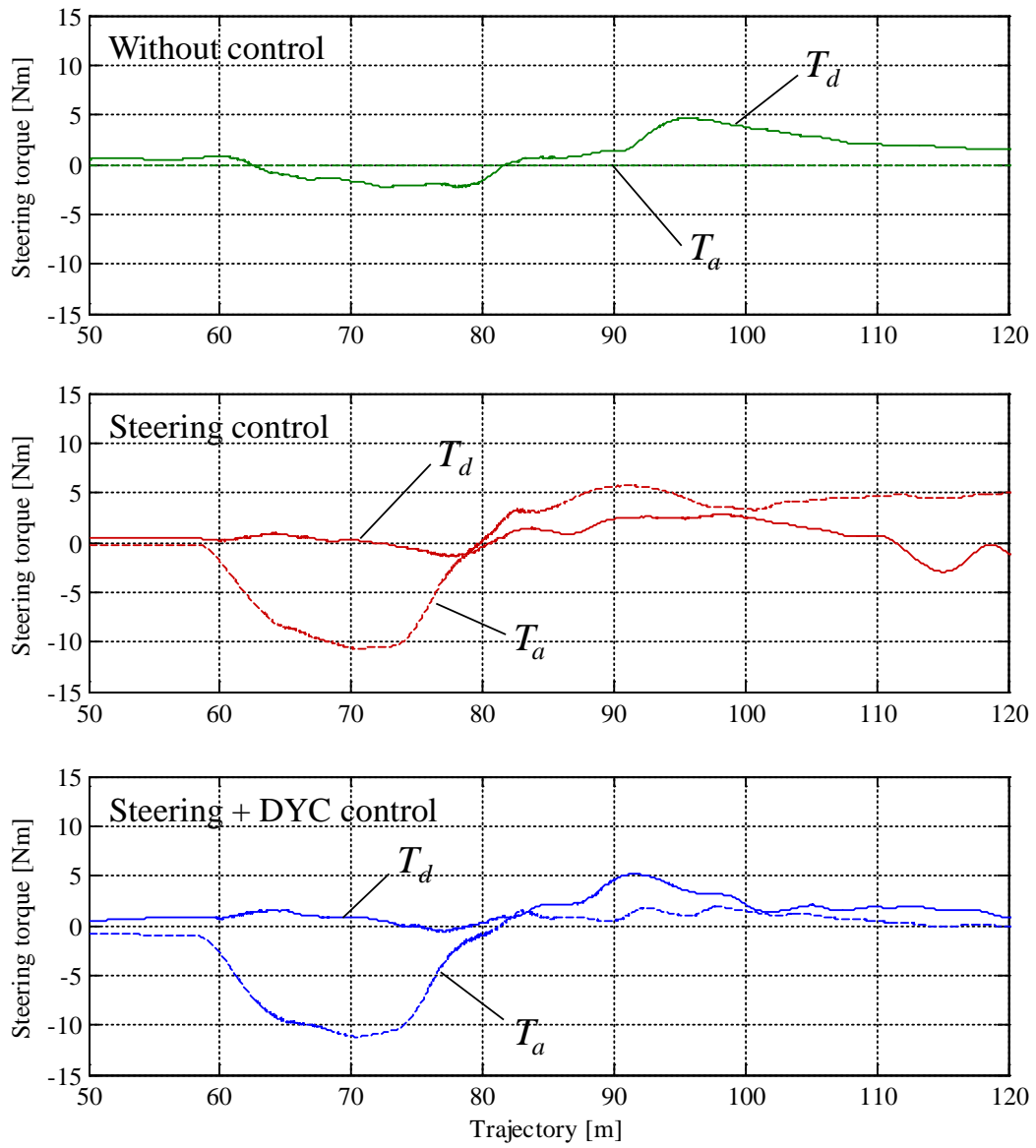


図 6.22 時刻歴応答結果(Driver A, ステアリングトルク関係)

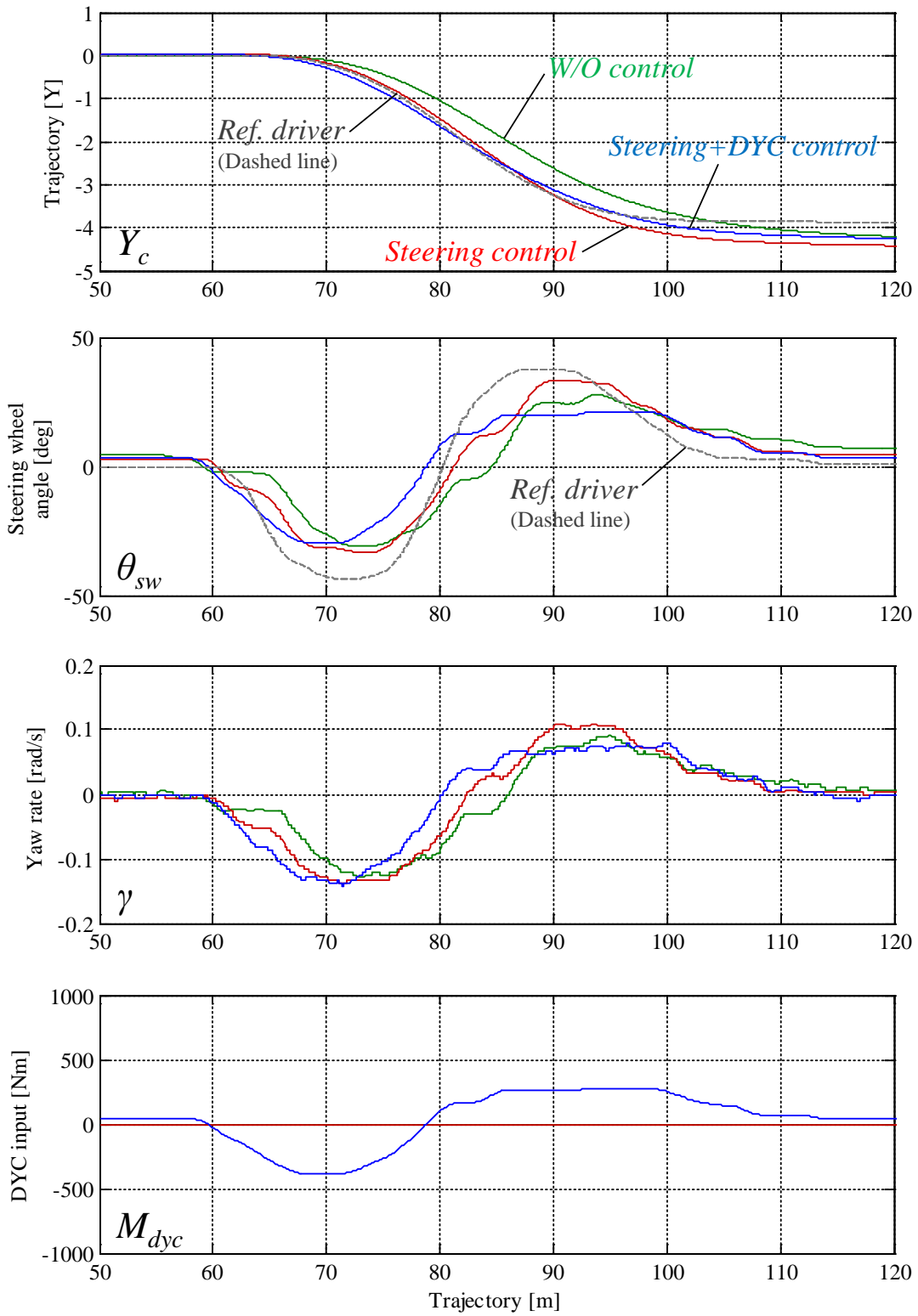


图 6.23 時刻歴応答結果(Driver F, 車両挙動関係)

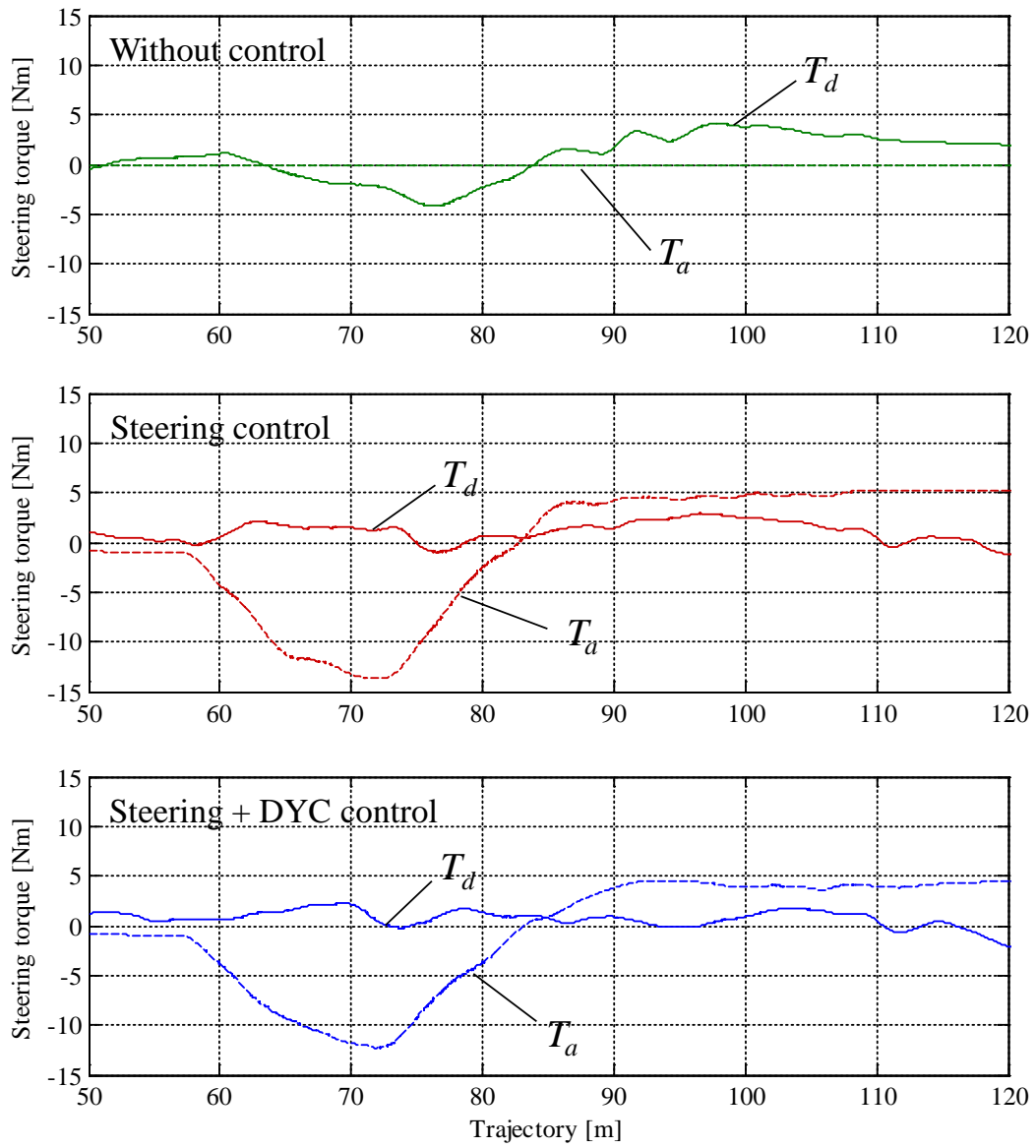


図 6.24 時刻歴応答結果(Driver F, ステアリングトルク関係)

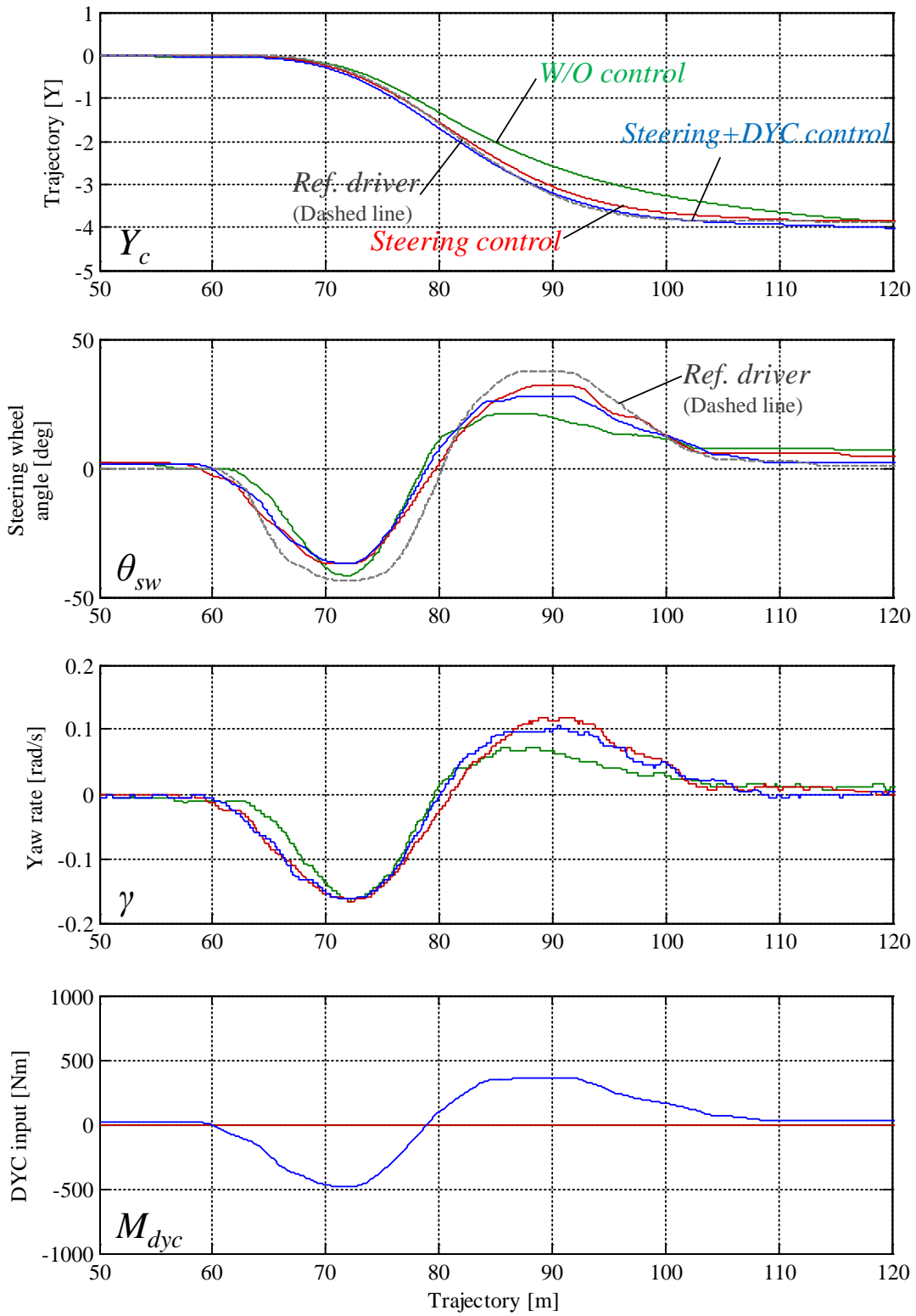


図 6.25 時刻歴応答結果(Driver I, 車両挙動関係)

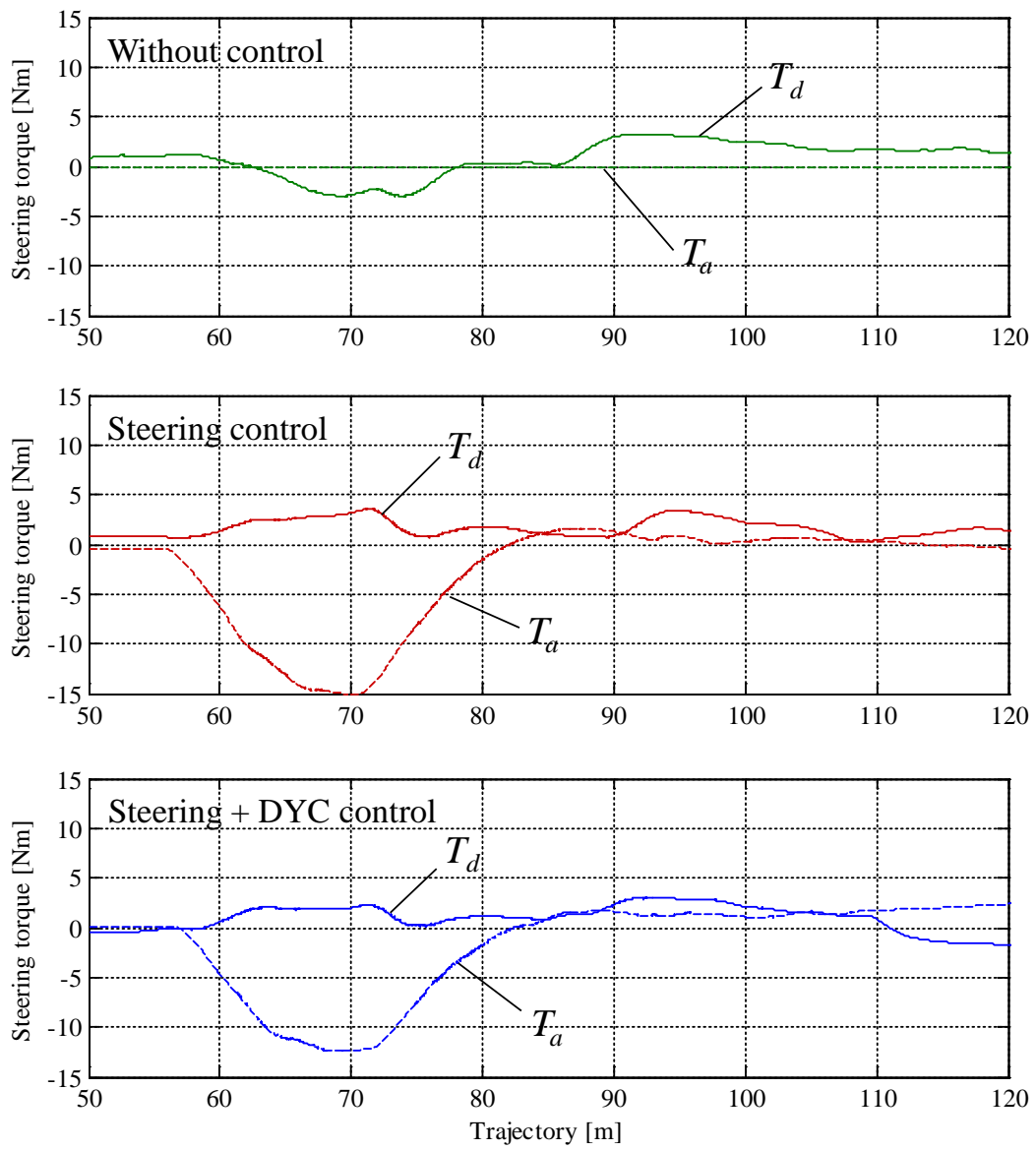


図 6.26 時刻歴応答結果(Driver I, ステアリングトルク関係)

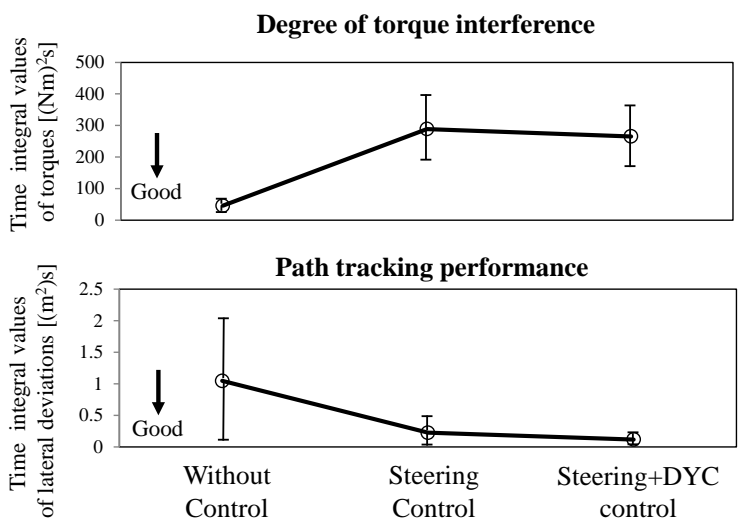
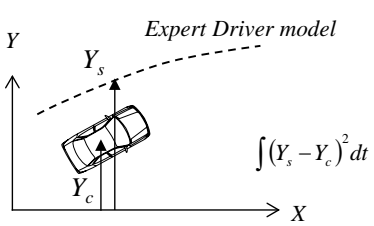
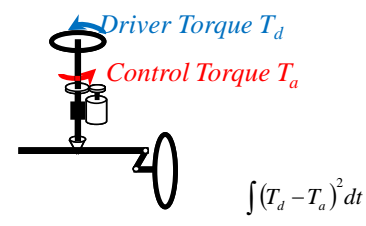


図 6.27 軌跡追従性能とトルク干渉の関係(被験者 10 名の平均値と標準偏差)

表 6.5 提案システムに対する主観評価

項目	内容
操舵反力制御について	切り始めのタイミングが分って良かった。
	レーンチェンジ中も切るべき方向に機械が少し切ってくれるので，運転が楽である。
	支援によって横 G の出方が滑らかになる。
	遅めに切ったり，逆に早めに切ったりとステアの切り方によって能動的な操舵反力の出方が変わることが良く体感できた。
	切るべき方向が示されるので，いざという時にパニックになり難い。ドライバに掛かる負担は減ると思う。
	支援に従った運転をすると，違和感は少ないと感じた。
	高齢ドライバも色々なハンディがあり，ステアリングを動かすことが難しい場合がある。こういう人たちにこのようなサポートがあると嬉しい。
	ステアリングの戻し側(レーンチェンジ後半)は感じにくい。
	規範運転としての納得感が重要だと思う。上質なドライバモデルの構築が必要だろう。
	表示系などを用いて規範軌跡の表示が欲しい。
今回はコースが規定されていて，かつ制御介入があることも知らされているため操舵誘導を受容できる。実シーンではこれをどのように組み立てるのが課題だろう。	

DYC について	DYC が加わると、操舵制御によるステアリングの動かされ感が小さくなって良い。
	ステアリングを大きく動かさなくても車が滑らかに動く感覚がある。
	最大のステアリング舵角が減るため運転し易い。
	ステアリングの戻りや加減が少し楽になった。
	ステアリングから来る反力が弱くなって、運転し易くなった。
	レーンチェンジ後半は DYC の効果が感じにくい。
Shared control について	ドライバごとにばらつきのある運転技量を、本技術を用いてばらつきを小さくしたいという考え方は理解(体感)できた。
	人間と機械が完全に分かれるのではなく、互いに融合、アシストして運転が楽しめるということを訴求していくことは大事だと思う。
	規範運転の演算には、スピードコントロールとステアリングコントロールを同時に考えたい。規範ドライバは両者の分担を適切に変えながら運転操作をしていると思う。
	レーンチェンジのみのコースだと、シェアード状態が非常に短いため評価が難しい。連続的な実験コースで評価したい。

6.4 まとめ

本章では、これまでに確認した提案システムの有効性を実車で確認することを目的とした。超小型電気実験車と市販車改造実験車の2種類の実験車両を用いて、軌跡追従性能とステアリングのトルク干渉の関係を実験的に評価した。また試乗参加者から得られた主観評価をまとめ、今後取り組むべき応用課題について整理をした。得られた主な知見は次の通りである。

- (1) 規範ドライバモデルの実装方法の一考案として、伝達関数型フィードフォワードモデルを提案した。本モデルは、センサノイズやオフセット値に影響を受けやすいヨー角信号を用いずに規範ステアリング舵角を演算することができる。
- (2) 超小型電気実験車を用いて、上記の伝達関数型フィードフォワードモデルの動作を確認した。手放し運転による自動運転モードの実験からは、本モデルが正しくレーンチェンジすることを確認した。
- (3) 操舵反力制御が可能なステアリングシステムと、DYCを作動させるための左右駆動力配分アクチュエータを備えた市販車改造実験車を構築し、提案する Shared control システムを評価した。二乗積分評価からは、DYCを組み合わせることで、トルク干渉を低減しながら高いコース追従性能が得られることを定量的に示すことができた。この結果は、高齢ドライバを被験者としたドライビングシミュレータ実験に則した結果であった。
- (4) 試乗参加者による主観評価からは、操舵反力制御が、ステアリングを切り始めるタイミング教示やレーンチェンジ中のステアリング操作負担の低減に対して、有効であるという肯定的な意見を多く得ることができた。またDYCを組み合わせることで、制御システムによって車両が動かされた感覚が減り、協調特性が向上するという意見が得られた。一方で、応用研究課題として、スピードコントロール

との統合の必要性を多くの参加者から貰った。またその他のシーンおよびそれらを組み合わせた複合シーンに対して、提案システムの有効性を確認していくべきだという評価結果も数名の参加者から得た。

第 7 章

結 論

本論文では、予防安全技術のさらなる進化を目指し、車両のアクティブ制御技術を代表とする操舵トルク支援制御と直接ヨーモーメント制御(DYC)を組み合わせた、新しい Shared control システムを提案することを目的とした。

従来の操舵支援トルク制御または DYC に関連した研究は、通常運転領域で作動する快適性向上のための支援や、緊急回避運転領域で作動する衝突回避のための支援が主な対象であった。例えば快適性向上のための車線追従制御では、機械システムがドライバに代わって車両をコントロールし、車線追従を実行する。また緊急回避の支援制御では、機械システムの車両挙動目標に対して、ドライバの操作で不足する分を機械システムが完全に補うように車両をコントロールする。このように、従来の支援制御において、機械システムの制御対象は、俯瞰的に見ればドライバは含まれない。

一方で本研究では Shared control の設計思想を適用し、ドライバと制御システムが適切な相互作用を働かせ、ドライバ自身の運転行動をより高みに導くことを目指した。この時の機械システムの制御対象は、車両とドライバの両方であり、ドライバの運転操作を安全で滑らかなものに変容させることが制御目標であった。この制御設計を、支援システムとして未確立な領域である潜在リスク予測運転領域に適用し、快適性向上のための通常運転の支援技術から緊急回避のための支援技術までを、支援制御としてシームレスにつなぐことを目指した。

この新しい形態の支援システムを実現するために、はじめに次の 3 つの研究目的を設定し研究を進めてきた。

1. 運転と運動のダイナミクスを同時に取り扱ったステアリング Shared control の設計およびその協調特性の定式化
2. DYC を組み合わせた Shared control システムの基本原理および有用性評価
3. 実車実験の検討に基づく提案システムの有用性実証

1. のステアリング Shared control の設計およびその協調特性の定式化については、第 2 章において、実ドライバの運転操作を規範ドライバモデルに導くための操舵反力制御の制御則を提案した。第 3 章のドライビングシミュレータ実験では、提案する操舵反力制御によって、多くの高齢ドライバが規範ドライバモデルに近づくことを確認することが出来た。特に、遅れやすいレーンチェンジの開始タイミングが、規範ドライバに導かれる効果があることを示した。さらに若年ドライバと比較すると、高齢ドライバの方が操舵反力制御の効果が顕著であることも明らかにした。第 4 章では、自律運転知能システムに対して、より具体的な実装方法を鑑み、リスクポテンシャル最適化理論に基づく Shared control の制御設計を示した。ポテンシャルの 3 層構造を示し、その基本的な動作原理を示した。第 5 章のドライビングシミュレータ実験では、高齢ドライバを被験者とする実験をおこない、第 3 章と一致する効果を確認することができた。また車両の運動力学に基づいた理論解析から、規範ヨーレイト追従制御における人間・機械のシェアード・コントロール比率を理論的に導出した。今回の実験で選定した反力制御トルクゲインは、その比率が 0.5 相当であり、高い協調特性が期待できる設定であることを示した。さらに、前方注視ドライビングモデルによるパラメータ同定結果から、ドライバ側の運転操作特性の変容に対する定式化をおこなった。その結果、シェアード・コントロール下においては、ドライバはコース誤差の認知遅れを力覚教示で補償するような運転行動に変化している可能性を明らかにした。また、反力制御トルクに由来する力覚はドライバに対して遅れが小さい規範運転教示ツールの一つであるという考え方を提案した。

2. の **DYC** を組み合わせた Shared control システムの基本原理および有用性評価については、第 2 章で理論解析をおこなった。DYC を組み合わせることの効果は大きくは 2 つあり、1 つ目は機械システム側の観点として、DYC を組み合わせることで、規範教示の強さを変えずとも経路追従性能の向上機能を高めることができる事であった。2 つ目はドライバ側の観点として、ステアリング舵角に比例した **DYC** を入力することで、車両応答の定常ゲインが大きくなり、運転し易い車両が得られることであ

った。この効果によって、ドライバは、反力制御トルクで得た規範軌跡に、自身の目標軌跡を一致させ易くなることが期待できる。以上の **DYC** の効果を検証するために、第 3 章では、**DYC** の制御条件を設定したドライビングシミュレータ実験をおこなった。実験結果からは、狙い通りの効果が確認される高齢ドライバがいた一方で、今回選定した舵角比例の **DYC** 制御則では、軌跡追従制御が悪化するドライバも存在することが明らかになった。そこで第 4 章のポテンシャルに基づいた **Shared control** の制御系設計では、得られた知見を反映し、舵角比例制御とヨーレイト偏差フィードバック制御を組み合わせることとした。ヨーレイト偏差フィードバック制御は、規範ヨーレイトと実ヨーレイトの偏差分に対して追従性能を確保するための **DYC** であり、人間機械の協調度合いを安定化させることを目的としたものであった。第 5 章でおこなったドライビングシミュレータ実験では、**DYC** 制御則を再考した効果が確認でき、ほぼ全ての高齢ドライバから **DYC** の効果を確認することができた。また、シェアード・コントロール比率の考え方を発展させて、**DYC** が操舵支援に及ぼす影響を理論的に解析した。

3.の実車実験の検討については、第 6 章で示した。はじめに超小型電気自動車を用いた実験検討を示した。基礎実験に位置付けられた本実験からは、第 5 章までに得られた検討結果と同じ傾向の効果が確認され、提案する **Shared control** システムの有効性を示唆する結果が得られた。次に、市販車改造実験車を用いた本格的な実験検討を示した。実験車のシステム構成を示し、提案する **Shared control** システムが市販車に実装可能であることを証明した。また、10 名の被験者実験をおこない、経路追従性能とステアリングのトルク干渉の関係を定量的に解析した。最後に、被験者および試乗者から得られた主観的評価を纏め、官能評価の観点からも提案システムの有効性を確認した。

以上より、本論文の最終的な研究成果として、ドライバの運転行動をより高みに導くための支援システムの一形態として、操舵反力制御と **DYC** を用いたシェアード・コントロール型運転支援システムの実現が示され、予防安全技術のさらなる進化が可能であると纏める。

今後の課題としては、第 6 章で示した主観的評価結果なども精査すれば、以下の項目が挙げられる。これらの課題については、引き続き研究開発を着実に進めていき、提案システムの深化に努めたい。

(1) スピードコントロールとの統合制御

本論文では、横方向制御の効果に注目するために車速は一定で取り扱った。しかしながら、熟練ドライバーは、前後運動と横運動を適切に組み合わせて運転を行っている。制御システムの正常進化として、前後運動と横運動を練成させて規範運転を演算できるように、規範ドライバーモデルを拡張する必要があると考えられる。

(2) 複合シーンにおける評価

本論文では、シングルレーンチェンジ、または駐車車両回避という 2 シーンに対して、提案システムの評価をおこなった。しかしながら現実の走行シーンでは、様々なシーンが複雑に組み合わさりながら、かつ、そのシーンが時々刻々と連続的に変化する。このような複合シーンに対して評価をおこなうことは、提案システムのさらなる有効性の確認の場として意義が高いと考えられる。

(3) 走行環境認識技術との統合

本論文の実車実験では、Shared control の評価に注目するために、カメラやレーザレーダなどの外界情報取得センサとの統合制御はおこなわなかった。しかしながら認識技術には、演算周期の制約や物標検知の精度などがあり、これらは Shared control システムの規範ドライバーモデルの規範操作演算に大きな影響を与える可能性がある。走行環境認識技術との統合し、実システムの制御の安定性を評価することは、課題項目の一つであると考えられる。

参考文献

【第1章】

- [1] 樋口健：自動車技術の辞典，朝倉書店，1996，pp.279-283
- [2] Mercedes-Benz Home page: Classic History,
<https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/classic/history/mercedes-benz-s-class-116/>
- [3] 森田光彦，阿部恭一，名波剛：レーダークルーズコントロール(全車速追従機能付き)の紹介，トヨタテクニカル・レビュー，55(1)，2006，pp.60-65
- [4] 山本康典，寺野隆志，中上隆：マツダ・レーダ・クルーズ・コントロール・システムの開発，マツダ技報，Vol.24，2006，pp.154-158
- [5] 川崎智哉，藤田浩一，川崎幸則：プリクラッシュセーフティ—自律総合安全技術—，トヨタテクニカル・レビュー，2009，pp.51-57
- [6] Wesley Hulshof, Iain Knight, Alix Edwards, Matthew Avery, Colin Grover: AUTONOMOUS EMERGENCY BRAKING TEST RESULTS, National Highway Traffic Safety Administration, 13-0168, 2013
- [7] 富士重工業株式会社 プレスリリース(2016年1月16日):スバル アイサイト搭載車の事故件数調査結果について
- [8] 自動車技術ハンドブック編集委員会：自動車技術ハンドブック(環境・安全編)，2005，pp.132-134
- [9] 加藤光治：ITSの現状と今後，デンソーテクニカルレビュー，Vol.6，No.1，2001
- [10] 原井直子：高度道路交通システム(ITS)：歴史と現状，国立国会図書館調査及び立法考査局，2016
- [11] 一般財団法人 ITS サービス高度化機構：ETC 車両の利用率の最新実績，
https://www.its-tea.or.jp/its_etc/ref_utilizationRatio.php
- [12] 中村俊佑，菅沼英明，菊地一規：インフラ協調型右折時衝突防止支援システムの効果評価，自動車技術会論文集，Vol46(2)，2015，pp.449-454
- [13] 津川定之：自動車の自動運転技術の変遷，自動車技術，Vol.60，No.10，2006
- [14] 産業技術総合研究所：産総研 LINK，No.7，2016
- [15] Michael Moutemerlo et al.：Junior: The Stanford Entry in the Urban Challenge, Journal of Field Robotics, Volume 25, Issue 9, 2008
- [16] Motor Fan illustrated：自動運転，三栄書房，Vol.86，2013
- [17] トヨタ自動車株式会社 Global Newsroom (2015年10月6日):トヨタ自動車、2020年頃の実用化を目指した自動運転実験車を公開
- [18] Google: Google Self-Driving Car Project Monthly Report, March 2016
- [19] National Highway Traffic Safety Administration: Preliminary Statement of Policy

Concerning Automated Vehicles, 2013

- [20]日立製作所：日立評論 2015年1・2月合併号，クルマが通じあう—自動運転開発プロジェクト—，オーム社，2015
- [21]Thomas B. Sheridan: Telerobotics, Automation and Human Supervisory Control, The MIT Press, 1992
- [22]T. Inagaki, N. Moray, M. Itoh: Trust, Self-confidence and authority in human-machine systems, IFAC International Symposium, 1998, pp.431-436
- [23]内閣府：平成28年度版交通安全白書，2016，pp.25-27
- [24]総務省統計局 統計トピックス No.72 統計からみた我が国の高齢者(65歳以上)：I 高齢者の人口，<http://www.stat.go.jp/data/topics/topi721.htm>
- [25]Goal: Profiles of Older People (Document Number, D2.1), <http://www.goal-project.eu/#>
- [26]警察庁：運転免許統計(年度の統計書を元に作成)，
<https://www.npa.go.jp/toukei/menkyo/index.htm>
- [27]ITARDA INFORMATION：交通事故分析レポート No.107 —運転操作の誤りを防ぐ—，2014
- [28]井上秀雄：高齢社会に向けたクルマの智能化，日本バーチャルリアリティ学会誌，第19巻，3号，2014
- [29]U'eyes Design Inc.：ヒトとクルマの調査レポート—ドライバーの行動原理から見たクルマの今と未来—，2015
- [30]溝端光雄：高齢ドライバーの特性と高齢者講習，予防時報 230，2007，pp.14-19
- [31]呉景龍，宮本脩平，河内山隆紀，蓮花一己，矢野雅文：動的視野加齢効果の計測と交通安全への適用に関する検討，国際交通安全学会誌，Vol.34，No.3，2009，pp.317-325
- [32]Honda：交通安全シニア HP，<http://www.honda.co.jp/safetyinfo/senior/senior02.html>
- [33]松岡浩史：ステアリングシステムの発展と今後の展望，JTEKT ENGINEERING JOURNAL，No.1013，2015
- [34]岡田正：操縦性・安定性における基礎的理論，自動車技術，Vol.26，No.7，1972，pp.785-789
- [35]Kojo T.: Development of Front Steering Control System, 6th International Symposium on Advanced Vehicle Control, 149, 2002
- [36]中村一美，酒井英樹：トルク入力下の操舵系と車体系の運動特性の基本考察，自動車技術会春季学術講演会，2013
- [37]酒井英樹：フォースコントロールにおける安定性とその指標，自動車技術会論文集，Vol.44，No.2，2013，pp.441-448
- [38]久代育生，山崎一平，国弘洋司：車両運動が操舵トルクに及ぼす影響を補償する電動パワーステアリングの制御，自動車技術会論文集，Vol.40，No.6，2009
- [39]遠藤修司：電動パワーステアリングを用いた操舵運転負荷軽減に関する研究，日

- 本機械学会論文集, Vol.82, No.837, 2016
- [40]堀口奈美, 毛利宏, 久保田正博, 古性裕之: 操舵系の特性が人間—自動車系に及ぼす影響 第二報, 操舵系の減衰振動特性について, 自動車技術会春季学術講演会, 2006
- [41]山田大介, 村岸裕治, 久代育生, 中澤正和, 小泉瑠理子, 富田健仁, 澤村浩志: ドライバが知覚する操舵反力の定量化, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.2, 2016
- [42]青木康浩, 富田篤志, 狩野芳郎, 安部正人: 基礎的車両応答パラメータと操舵特性評価に関する研究, 自動車技術会秋季学術講演会, 2011
- [43]安部正人: ドライバの車両運動性能評価の新たな視点, 自動車技術, Vol.69, No.7, 2015
- [44]渡邊健, 劉亜輝, 葉山良平, 嘉田友保, 李学武: 運転支援システム評価のための操舵時の筋活動の研究, 自動車技術会秋季学術講演会, 2013
- [45]山口喬弘, 羽田昌敏, 近藤洋史, 川野健二: 人体挙動・力解析によるシートの肩部支持と操舵のしやすさの関係解明, 自動車技術会秋季大会, 2015
- [46]Y.Hayashi: Optimum Control of Driver/Four-Wheel-Steered-Vehicle System, Proceedings of 10th IAVSD symposium, 1987
- [47]古川修: ピークルダイナミックスからみた4WSの研究動向, 自動車技術, Vol.44, No.3, 1990
- [48]鈴木将人, 小城隆博, 松田守弘, 河室巡児, 福井勝彦, 菅原朋子: フロントステア制御システムの開発, 自動車技術会春季学術講演会, 2003
- [49]Shimakage, M., Kawazoe, H., Sadano, O., Murakami, T.: Design of Lane-Keeping Control with Steering Torque Input for a Lane-Keeping Support System, SAE Paper, No. 2001-01-0480, 2001
- [50]毛利宏, 永井正夫: 操舵トルクを制御入力とする車線追従制御の検討(第1報, 操舵角制御と操舵トルク制御の比較), 日本機械学会論文集(C編), 67巻, 664号, 2001, pp.160-167
- [51]Soudbakhsh, D., Eskandarian, A., Chichka, D.: Vehicle Evasive Maneuvers Trajectory Optimization Using Collocation Technique, ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference, Volume 2, 2010
- [52] David Fernandez Llorca, et al.: Autonomous Pedestrian Collision Avoidance Using a Fuzzy Steering Controller, IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, VOL.12, No.2, 2011
- [53]Z. Eracn, et al., Torque-Based Steering Assistance for Collision Avoidance During Lane Changes, 13th International Symposium on Advanced Vehicle Control, 2016
- [54]Bernd Hartmann, Alfred Eckert, Peter E. Rieth, Martin Sevenich: Emergency Brake & Steering Assist – The Integration of Emergency Brake and Steer Assistance Taken Driver Behavior in Emergency Situations into Account, 20th Aachen Colloquium Automobile

and Engine Technology, 2011

- [55] NAOHIRO YUHARA, SHINICHIRO HORIUCHI, TOMOKO IJIMA, KAZUTAKA SHIMIZU, NOBUYOSHI ASANUMA: An Advanced Steering System with Active Kinesthetic Feedback for Handling Qualities Improvement, *Vehicle System Dynamics*, Vol.27, No.5-6, 1997, pp.327-355
- [56] 永井正夫, 下光喜代崇, 吉田秀久, 毛利宏: 操舵トルク支援制御系と人間との操舵協調性—運転シミュレータによる横風応答の検討—, *自動車技術会論文集*, Vol.34, No.1, 2003
- [57] Paul Griffiths, R. Brent Gillespire: Shared Control Between Human and Machine: Haptic Display of Automation During Manual Control of Vehicle Heading, 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Visual Environment and Teleoperator Systems, 2004
- [58] Jordan Navarro, Franck Mars, Jean-Michel Hoc: Lateral Control Assistance for Car Drivers: A Comparison of Motor Priming and Warning Systems, *Human Factors*, Vol.49, No.5, 2007
- [59] Sebastiaan M. Petermeijer, David A. Abbink, Joost C.F. de Winter: Should Drivers Be Operating Within an Automation Free Bandwidth? Evaluating Haptic Steering Support Systems With Different Levels of Authority, *Human Factors*, Vol.57, No.1, 2015, pp.5-20
- [60] D.A. Abbink, M. Mulder: Exploring the Dimensions of Haptic Feedback Support in Manual Control, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol.9, 2009
- [61] Diomidis Katzourakis, Claes Olsson, Nenad Lazic and Mathias Lidberg :Driver Steering Override Strategies for Steering Based Active Safety Systems, *Proceedings of 2nd International Symposium on Future Active Safety Technology Towards Zero-Traffic Accidents*, 2013, pp. 1-7
- [62] Kou Iwano, Pongsathorn Raksincharoensak, Masao Nagai: Study on Shared Driving Characteristics between Driver and Collision Avoidance Steering Control Using Driving Simulator, 12th International Symposium on Advanced Vehicle Control, 2014
- [63] Abdelkader Merah, Kada Hartani, Azeddine Draou: A new shared control for lane keeping and road departure prevention, *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, Vol.54, No.1, 2016, pp.86-101
- [64] Avinash Balachandran, Matthew Brown, Stephen M. Erlien, J. Christian Gerdes: Predictive Haptic Feedback for Obstacle Avoidance Based on Model Predictive Control, *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATION SIENCE AND ENGINEERING*, Vol.13, No. 1, 2016
- [65] M. Hirokawam N.Uesugi, S. Furugori, T. Kitagawa, K. Suzuki: Effect of Haptic

- Assistance on Learning Vehicle Reverse Parking Skills, IEEE Trans. Haptics, Vol.7, No.3, 2014, pp.334-344
- [66]S. Tada, T. Wada: Haptic Control for Backward Parking and Its Effect on Skill Increase in Novice Drivers, IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2015,pp. 461-466
- [67]Abbink, D.A., Mulder, M., Boer, E.: Haptic Shared Control: smoothly shifting control authority”, Cognitive Technology Work, Vol.14, 2012, pp.19-28
- [68]Flemisch, F., Heesen, M., Hesse, T., Kelsch, J., Schieben, A. and Beller, J. :Towards a dynamic balance between humans and automation, Cognition, Technology and Work, Special Issue on Human-automation Coagency, Volume 14 Issue 1, 2012, pp.3-18
- [69]稲垣敏之：人と機械の共生のデザインー「人間中心の自動化」を探る，森北出版，2012
- [70]Frank O. Flemisch: The H-Metaphor as a Guideline for Vehicle Automation and Interaction, NASA/TM_2003_212672, 2003
- [71]Y. Shibahata, K.Shimada, T. Tomari: The Improvement of Vehicle Maneuverability by Direct Yaw Moment Control, 1st International Symposium on Advanced Vehicle Control, 1992
- [72]島田和彦，芝端康二：ヨーモーメントによる車両運動制御方法の評価，自動車技術会論文集，Vol.25，No.3，1994，pp.122-127
- [73]大久保直人，狩野芳郎，安部正人：直接ヨーモーメント制御による車両運動性能向上の基礎的研究，自動車技術会学術講演会前刷集 944，1994
- [74]小竹元基，永井正夫：アクティブ操舵と DYC の協調制御に関する理論的解析，自動車技術会論文集，Vol.33，No.3，2002
- [75]Pongsathorn Raksinchaoensak, Motoki Shino, Masao Nagai: Motion Control of Micro-Scale Electric Vehicle by DYC Considering Lane Marker Information, The 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 2004
- [76]横山篤，齋藤真二郎：電動 DYC システムの開発ー車線維持支援制御への適用ー，自動車技術会論文集，Vol.40，No.3，2009
- [77]Takahashi, J., Yamakado, M., Saito, S., Yokoyama, A.: A hybrid stability-control system: combining direct-yaw-moment control and G-Vectoring Control, Vehicle System Dynamics, 50,6, 2012, pp.847-859
- [78]M. Yamakado, M. Abe: Improvement of Vehicle Agility and Stability by G-Vectoring Control, 4th International Symposium on Advanced Vehicle Control, 2008
- [79]T. Yoshioka et al., Development of G-Vectoring Control System Based on Engine Torque Control, 13th International Symposium on Advanced Vehicle Control, 2016
- [80]Jongsang Seo, Jaewoong Choi, Kyongsu Yi: TORque Vectoring for Collision Avoidance of Automated Driving Vehicle using Robust Model Predictive Control, 12th

International Symposium on Advanced Vehicle Control, 2014

- [81]S. Rahimi Fetrati, C. Kandler, C. Karcher, D. Schramm: Inversion Based Feedforward Design To Improve the Lateral Dynamics of High Performance Sports Cars, 13th International Symposium on Advanced Vehicle Control, 2016
- [82]西原修, 東野慎平: 横力と制駆動力のリアルタイム最適配分による電気自動車の低消費電力化, 日本機会学会 Dynamics and Design Conference, No.12-12, 2012
- [83]角谷勇人, 藤本博志: 前後輪横滑り角と左右トルク配分に基づく電気自動車の航続距離延長制御システム, 電気学会論文誌 D, Vol.131, No.3, 2012, pp.308-314
- [84]小林孝雄, 勝山悦生, 杉浦豪軌, 小野英一, 山本真規: 旋回時の駆動力配分制御と消費エネルギーに関する研究一定常円旋回における定式化と EV による検証一, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.70-13, 2013, pp.1-6
- [85]稲垣敏之: 自動運転における人と機械の協調, 国際交通安全学会誌, Vol.40, No.2, 2015

【第2章】

- [86]Nagai, M. and Inoue, H.: Research into ADAS with Autonomous Driving Intelligence for Future Innovation, Proceedings of Chassis Tech Plus 2014, Munich, Germany, 2014
- [87]Flemisch, F.O., et al. : Cooperative control and active interfaces for vehicle assistance and automation, FISITA World Automotive Congress, 1, 2008, pp.301-310
- [88]Mulder, M., Abbink, D.A., Boer, E.R.: Sharing control with haptics: Seamless driver support from manual to automatic control, Human Factors, 54, 2012, pp.786-798
- [89]安部正人, 大沢洋: 自動車の運動性能向上技術, 朝倉書店, 1998, pp.171
- [90]永井正夫, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク: カーロボティクス, ZMP パブリッシング, 2010, pp.267
- [91]安部正人: 自動車の運動と制御 車両運動力学の理論形成と応用 第2版, 東京電機大学出版局, 2012, pp.305
- [92]堀内伸一郎, 砂田圭: 車線追従のための操舵支援システムと多入力ドライバモデルを用いた評価, 国際交通安全学会誌, Vol.26, No.2, 2001, pp.88-95

【第3章】

- [93]平松金雄, 宇野宏: 高齢ドライバーの運転基礎特性—予見時間とトラッキング運転成績との関係—, 自動車技術, Vol.48, No.12, 1994, pp.44-49
- [94]赤松幹之: 1. 運転中に何を見て, 何を認知しているのか—道路, 交通, 運転特性, そして高齢ドライバー—, 映像情報メディア学会誌, Vol.61, No.12, 2007, pp.1682-1688
- [95]高地康宏, 村岡一信, 沢田康次, 太田博雄: 高齢運転者のカーブ走行時運転挙動特性について—ドライビングシミュレータによる走行実験分析—, 人間工学,

Vol.44, No.3, 2008

- [96]小竹元基, 木村健人, 二瓶美里, 鎌田実: 高齢運転者の認知特性と実環境における不安全行動の関連性の検討, 日本機械学会論文集(C編), 78巻, 794号, 2012, pp.32-43
- [97]山崎初夫, 福元将高, 萩尊史, 山本修身, 山本新, 中野倫明: 自動運転中の高齢者に配慮した聴覚情報提示方法, 映像情報メディア学会誌, Vol.59, No.12, 2005, pp.1855-1858
- [98]Seunghee Hong, Takafumi Asao, Keisuke Suzuki, Byungchan Min, Shunichi Doi: Change of Driving Behaviors with Stopping Alert at Intersection for Individual Elderly Drivers, 人間工学, Vol51, 2015, pp.526-531
- [99]栗谷川幸代, 鴨川亮平, 景山一郎, 菅沼直樹, 堀江良典: 高齢運転者のための夜間視認支援システムに関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.42, No.4, 2011, pp.973-978
- [100] Mark Mulder, David. A. Abbink.: Sharing Control with Elderly Drivers: Haptic Guidance during Curve Negotiation, IFAC Proceedings Volumes, Vol.43, Issue 13, 2010, pp. 310-315

【第4章】

- [101] David N Lee: A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision, Perception, 5(4), 1976, pp.437-459
- [102] Borowsky, A., D. Shinar, T. Oron-Gilad: Age, Skill, and hazard perception in driving, Fourth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, 2007, pp.551-557
- [103] Scialfa, C. T., M. C. Deschenes, J. Ference, J. Boone, M. S. Horswill, M. Wetton: A hazard perception test for novice drivers, Accident Analysis and Prevention Vol.43, 2011, pp.204-208
- [104] 近藤政市: 自動車の操縦と運動間に存在する基礎的關係について, 自動車技術会論文集, No.5, 1958, pp.40-43
- [105] 加藤晋, 津川定之: 自律車両におけるビジョンによる車線変更のためのラテラル制御, 電気学会論文誌(D), Vol.120, No.5, 2000, pp.634-641
- [106] 西羅光, 川邊武俊: 自動車の最適経路生成, 計測と制御, Vol.45, No.3, 2006
- [107] 角川博紀, 菅沼直樹, 藤原直史: 一般道における自動運転のための自動操舵アルゴリズム, 日本機械学会論文集(C編), 72巻, 713号, 2006, pp.139-144
- [108] 長谷川隆裕, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 山崎彬人, 毛利宏, 永井正夫: リスクポテンシャルを考慮した最適制御理論による自律運転知能システムに関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.46, No.2, 2015
- [109] 島倉諭, 項警宇, 稲垣伸吉, 鈴木達也: ポテンシャルを組み込んだパーティ

クルコントロールによる自律移動ロボットの障害物回避制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会概要集, 2009

【第5章】

- [110] 阿部芳博, チャイユウン, 狩野芳郎, 安部正人: ドライバー操舵特性の同定とステアリングパラメータ適応, 自動車技術会春季学術講演会, No.62-05, 2005
- [111] Jun Ishio, Hiroki Ichikawa, Yoshio Kano, Masato Abe: Vehicle-handling quality evaluation through model-based driver steering behavior, *Vehicle System Dynamics*, Volume46, 2008
- [112] 田中慎也, 内藤崇行, 山田憲一, 伊藤敏夫, 潮俊光: 伝達関数モデルを用いたタスク負荷による運転特性変化の解析, 自動車技術会論文集, Vol.42, No.5, 2011, pp.1009-1014
- [113] 吉田秀久, 小嶺長芳, 山口秀谷: 操舵トルクによるドライバモデルの基礎的検討(進路変更と車線維持の動作遷移モデル), 日本機械学会論文集, Vol.81, No.826, 2015
- [114] 岩野孝, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 永井正夫: 障害物回避時における操舵トルク支援システムと人間との操舵協調性に関する研究, 第56回自動制御連合講演会論文集, 2013

【第6章】

- [115] Mark Mulder, David A. Abbink: Correct and Faulty Driver Support from Shared Haptic Control During Evasive Maneuvers, *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2011
- [116] Frank Mars, Mathieu Deroo, Jean-Michel Hoc: Analysis of Human-Machine Cooperation When Driving with Different Degrees of Haptic Shared Control, *IEEE TRANSACTIONS ON HAPTICS*, Vol.7, No.3, 2014
- [117] Shohei Ueda, Takahiro Wada: A Haptic Communication Method for A Preceding Vehicle Following System, *International Journal of Automotive Engineering*. Vol.7, 2016, pp.99-105
- [118] 高橋樹生, 中野公彦, 鄭仁成, 大堀真敬, 瀬川雅也, 石原敦: 力覚指示と軌道誘導による車線変更支援, *生産研究*, Vol.67, No.2, 2015, pp.195-198
- [119] 廣川暢一, 上杉直久, 古郡了, 北川朋子, 鈴木健嗣: 駐車運転技量育成のための力覚呈示を用いた運転行動支援システム, 計測自動制御学会論文集, Vol.49, No.6, 2013, pp.602-611
- [120] Bernd-Robert Hoehn, Karsten Stahl, Philipp Gwinner and Ferdinand Wiesbeck: TORQUE-VECTORING DRIVELINE FOR ELECTRIC VEHICLE, *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress*, Vol.191, 2013, pp. 585-593

- [121] Pelchen C., Schweiger C., Otter M. : Modeling and Simulating the Efficiency of Gearboxes and of Planetary Gearboxes, 2nd International Modelica Conference, Proceedings, 2002, pp. 257-266
- [122] 井上慎太郎, 太田順也, 平野豊, 小林孝雄, 河口篤志, 杉浦豪軌 : Modelica 言語によるフルビークルモデルを用いた軽量電気自動車の車両運動とエネルギー消費に関する研究, 自動車技術会論文集, 自動車技術会論文集, Vol.45, No.6, 2014

研究業績

【査読付き学術論文】

- [1] 井上慎太郎，小澤拓巳，平野豊，井上秀雄，ポンサトーン ラクシンチャラーンサク：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—経路追従走行における高齢ドライバへの支援効果—，自動車技術会論文集，Vol.47，No.3，2015
- [2] 井上慎太郎，相川弘幸，井上秀雄，ポンサトーン ラクシンチャラーンサク：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)，自動車技術会論文集，Vol.48，No.1，2016

【国際学会プロシーディング(Full paper 査読)】

- [3] Inoue, S., Ozawa, T., Inoue, H., Raksincharoensak, P. and Nagai, M.: Cooperative Lateral Control between Driver and ADAS by Haptic Shared Control Using Steering Torque Assistance Combined with Direct Yaw Moment Control, Proceedings of 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC2016), 2016

【国際学会プロシーディング(Extended summary 査読)】

- [4] Inoue, S., Inoue, H., Ozawa, T., Raksincharoensak, P. and Nagai, M.: Enhancing Path Tracking performance by Using Haptic Shared Steering Control Combined with DYC, Proceedings of 13th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC'16), 2016

【国内発表】

- [5] 井上慎太郎，小澤拓巳，平野豊，井上秀雄，ポンサトーン ラクシンチャラーンサク：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1報)，自動車技術会秋季学術講演会，2015
- [6] 井上慎太郎，相川弘幸，井上秀雄，ポンサトーン ラクシンチャラーンサク：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)，自動車技術会春季学術講演会，2016
- [7] 小澤拓巳，井上慎太郎，井上秀雄，ポンサトーンラクシンチャラーンサク，軌跡追従走行時における人間と運転支援系のシェアード・コントロールに関する研究，第58回自動制御連合講演会(神戸)，2015

【関連論文】

- [8] 井上慎太郎，太田順也，平野豊，小林孝雄，河口篤志，杉浦豪軌：Modelica 言語によるフルビークルモデルを用いた軽量電気自動車の車両運動とエネルギー消費に関する研究，自動車技術会論文集，Vol.45，No.6，2014
- [9] HIDEO INOUE, PONGSATHORN RAKSINCHAROENSAK, SHINTARO INOUE: Intelligent Driving System for Safer Automobiles, Journal of Information Processing, Vol.25, January 2017

謝 辞

本研究を進めるにあたり、ご指導とご助言を賜りました東京農工大学 工学府 機械システム工学専攻のポンサトーン・ラクシンチャランサク准教授に、厚く御礼申し上げます。在学中は、私の研究を暖かく時には厳しく指導頂きました。日々の研究の進め方は、得られた理論解析の結果や実験結果を整理し、そこから自分なりの解決策案を先生に説明し、アドバイスを頂くというものでした。このような中、研究を前進させる原動力は、先生に「その解釈なら理解できるね」と言って頂きたいという気概であったと感じています。実際にそのように言って頂いた時は、自分の自信に繋がりました。先生からは、研究の主眼をしっかりと持ちなさい、起きている事象は原理原則で説明出来るようにしなさいという2点を、常に御指導頂いていたように感じています。

同じく本研究を進めるにあたり、多大なご指導を賜りました東京農工大学 工学府 機械システム工学専攻の毛利教授、鎌田教授、田川教授、遠山教授には、厚く御礼申し上げます。本研究を公平な立場から見て頂くことで、多くの建設的なご教授を頂いたと感じております。

一緒に研究を進めてくれたポンサトーン研究室 OB の小澤拓巳さん、並びに修士1年の相川弘幸さんには深く御礼を申し上げます。2人が居なければ、間違いなく今の自分はいません。それぐらい、一緒に悩み、苦しんでくれました。大学に出向く時間を十分に取れず、メールのみでのやり取りも多かった中、しっかりと研究を前進させてくれたことは、大変心強かったです。

トヨタ自動車株式会社の前部長で現神奈川工科大学の井上秀雄教授、また日本自動車研究所の永井所長を始めとするSイノベメンバの皆様には、本研究を深化させるための力を賜りました。厚く御礼申し上げます。全体会議や試乗会の場で議論を重ねることで、本研究の狙いや効果はより精査されていったように感じています。本研究を高いレベルに育てて頂いたのは、Sイノベであったと感じております。

研究の環境と、そのための最大限のサポートを頂きましたトヨタ自動車株式会社

未来研究部の中岡部長，水越主査，平野主査，梅村前部長，鯉淵前部長には感謝の意を申し上げます。業務内容と研究内容が同じという大変幸せな環境を作って頂いたことで，提案する運転支援システムの研究に邁進することが出来ました。特に平野さんには，この研究を始めるきっかけと，また社会人コースに入学するための環境作りに多大なご尽力を頂きました。改めて深い感謝の意を申し上げます。

その他，ポンサトーン研究室のスタッフ，学生の皆様，ならびに社内のグループメンバー，関連会社の皆様など，御礼を申し上げなければならない方々が大勢いらっしゃいます。この謝辞を書きながら，本当に多くの方々のサポートを頂戴しながら，この研究を成し遂げたということを改めて噛み締めている次第です。本当に有難う御座いました。

最後になりましたが，3年半の研究生活を支えてくれたのは，妻と二人の息子，そして父母と義理の両親であったことは間違いありません。昼夜なく休日返上で研究をしていたため，家事はすべて妻にまかせていました。本当に大変だったと思います。二人の息子は，お父さんが遊んでくれないので寂しい思いをした時もあったでしょう。また，父母は，仕事と学業が本当に両立するのか心配していたと思います。そして義理の両親には，数えきれないほどの時間，二人の息子の面倒を代理で見て頂きました。本当にご迷惑をお掛け致しました。

こうして，多くの方々に支えながら，自分のやりたかった研究を一つにまとめることが出来ました。しかしながら，これは今後の研究人生の第一歩に過ぎません。決して奢らず，常に高い視点を持ちながら，今後も研究人生を邁進したいと思います。

—Think Globally, Act Locally. 志は高く，歩みは着実に—

2017年 3月 31日

井上 慎太郎