

## 修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院情報理工学研究科機械知能システム学専攻 博士前期課程		
氏 名	松下 遥香	学籍番号	2032099
論文題目	ドライバ個性を反映した Adaptive Cruise Control に関する研究		
要 旨	<p>自動運転機能の一つに人間機械協調型の制御である Adaptive Cruise Control (ACC) がある。この ACC 搭載車両を複数台繋げたプラトーン走行という技術がある。自動運転にすることで安心や快適さを感じるドライバがいる一方で、自身の想定する操作と自動運転の操作のずれから自動運転を快適に思わないドライバもいる。この状況は安全性がドライバの快適性とは別の評価軸にあることを意味する。ACC とドライバで評価軸が別軸ならば、その両立も可能なはずである。これに対して本修士研究では「ドライバが ACC を気にせずに操作介入を行っても ACC 機能が達成されるのがドライバ個性の反映（快適性）と安全性の両立なのではないか」を研究動機とするものである。</p> <p>修士論文の目的はドライバ個性を反映した ACC の構築指針の設計である。目的を達成するための1つ目の研究課題は ACC の制御性能に対するドライバ個性の評価方法、つまり、ドライバモデルの設計方法である。二つ目の研究課題は ACC が複数台繋がったプラトーン走行時におけるドライバ個性と安全性の評価方法である。</p> <p>1つ目の課題であるドライバモデルの設計には、主双対勾配アルゴリズムを用いる。ドライバ個性を制御に反映させる為、Human-In-The-Loop System (HITLS) の枠組みで ACC システムを設計する。HITLS は制御器、人の意思決定、制御対象で構成され、人は制御器の出力の範囲内で意思決定を行う。この意思決定を主双対勾配アルゴリズムでモデル化する。2つ目の課題であるプラトーンの安全性評価には完全自動運転の時と同様に String Stability を用いる。String Stability の条件式を完全自動運転のプラトーン走行車群が満たす時、先行車両の車両挙動の遅れは後続車に伝播されず、安全な走行が達成される。この String Stability の条件式に1つ目の課題のドライバモデルを反映させることで、ドライバ個性を考慮したプラトーン走行の安全性を評価できるようにする。</p> <p>修士研究の1つ目の成果は ACC 単体におけるドライバ個性が安全に反映できているかの評価方法の提案である。作成したドライバモデルは伝達関数表現で表され、フィードバック項（ドライバの ACC を気にする操作介入）とフィードフォワード項（ドライバの ACC を気にしない操作介入）から構成される。前者は ACC システムに対しての不確かさ、後者は ACC システムに対する外乱として現れる。つまり、ACC システムに対するドライバモデルの影響は「外乱と不確かさがあるフィードバックシステムのロバスト安定性」で評価できることを意味する。本論文はスモールゲイン定理に基づくロバスト安定性を利用することで、ドライバ個性を反映した ACC システムの安全性を評価することができた。ドライバモデルのフィードフォワード項が ACC システムの過渡特性にドライバ個性として影響を与えつつも、フィードバックループがロバスト安定ならば安全性と個性の両立が達成されることが明らかになった。</p> <p>修士研究の2つ目の成果はプラトーンにおけるドライバ個性が安全に反映されているかの評価方法の提案である。String Stability の条件式にはシステムモデルが必要である。修士研究において作成したドライバモデルは伝達関数表現で表せる為、ドライバ個性が反映された ACC 群の String Stability の条件式を求めることができた。数値実験では ACC システム5台からなるプラトーンにおいて先頭車両が急ブレーキをかけた際、ドライバ個性により安全な車間距離を保てる場合と保てない場合を検証した。結果として、完全自動運転の時と同様に String Stability を満たす範囲内であれば、ドライバが ACC を気にせずに操作介入を行っても ACC 機能が達成される、つまり個性と安全性が両立することがわかった。</p>		

令和三年度 修士論文

ドライバ個性を反映した Adaptive Cruise Control  
に関する研究

電気通信大学 情報理工学研究科  
機械知能システム学専攻

提出日	令和4年2月18日
学籍番号	2032099
氏名	松下 遥香
指導教員	澤田 賢治 准教授 小木曾 公尚 准教授 金子 修 教授

## 目次

第1章	序論	4
1.1	研究背景	4
1.2	研究概要	4
1.3	論文構成	6
第2章	問題設定	7
2.1	HITLS の概要	7
2.2	ACC の問題設定	7
2.3	プラトーン走行の問題設定	8
第3章	ACC システムにおける制御器, ドライバモデル及び制御対象の設計	9
3.1	制御器	9
3.2	制御対象	10
3.3	ドライバモデル及び ACC システムの全体図	13
3.3.1	主双対勾配法	13
3.3.2	ピッチングを用いたドライバモデル	15
3.3.3	ピッチングを用いたドライバモデルの解析	16
3.3.4	既存の目的関数を用いたドライバモデル	18
3.3.5	既存の目的関数を用いたドライバモデルの解析	20
第4章	プラトーン走行	23
4.1	String Stability の定義	23
4.2	提案するプラトーンにおける String stability の条件	24
第5章	数値実験	26
5.1	ACC 車両1台のシミュレーション	26
5.1.1	ピッチングを用いた車両のシミュレーション結果	26
5.1.2	既存研究の手法を用いたモデルのシミュレーション結果	30
5.2	プラトーン走行	33
5.2.1	String stability が満たされないプラトーン走行	33
5.2.2	String stability が満たされるプラトーン走行	35
第6章	結論	37
6.1	まとめ	37
6.2	今後の課題	37
謝辞		38
参考文献		39

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

自動車業界は現在変革期にあり、特に CASE[1]とまとめられる「Connected (コネクテッド化)」、「Autonomous (自動化)」、「Shared & Service (シェアリング・サービス)」、「Electric (電動化)」に多くの企業や大学が取り組んでいる。その中でも「Autonomous」は特に力が入れられてきた。

既に多くの市販車に多く搭載されている自動運転機能の一つに Adaptive Cruise Control (ACC)[2]がある。ACC は先行車をセンサで検知し一定の車間距離で追従する機能であり、車両制御システムがドライバーによる運転に介入する人間機械協調型の制御である。加えて ACC 機能搭載車両を繋げるプラトゥーン走行[3]も研究開発が進められている。既存の車両制御の人間機械協調型にはプロドライバーの運転を模倣するものや制御理論に基づく人間には再現不可能な高精度制御[4]などがあるが、これらはドライバーの個性が失われた画一的な運転となる。また自動運転にすることで安心や快適さを感じるドライバーがいる一方で、自身の想定する操作と自動運転の操作のずれから自動運転を快適に思わないドライバーもいる[5][6]。この状況は安全性がドライバーの快適性とは別の評価軸にあることを意味する。また衝突被害軽減ブレーキ (Autonomous Emergency Brake) などの緊急時に短時間作動するシステムと異なり、ACC は常にアクセルやブレーキを制御するシステムである[7]。その為 ACC では安全性に加えて快適性の為にドライバー個性を考慮する必要がある[8]。先行研究として吉本ら[6]は手動走行データから先行車追従を行う際の加減速過程に個性がでると考え、よりドライバーに近い目標値を生成することでドライバー個性を反映した ACC システムを作成している。また西脇ら[7]は車間距離にドライバー個性が表れるとして、ドライバーの制御特性を模擬する車間距離制御器のフィルタを作成し ACC システムを作成している。これらはいずれも運転性能の評価軸が ACC とドライバーで同一であり、ドライバーが ACC を気にしながら車両への入力を決定しているような状況である。よって本論文では先行研究[6][7]は快適性と安全性が両立した ACC システムではないと考えた。一方で ACC と評価軸が別軸ならばその両立も可能なはずである。これに対して本修士研究では「ドライバーが ACC を気にせずに操作介入を行っても ACC 機能が達成されるのがドライバー個性の反映 (快適性) と安全性の両立ではないか」を研究動機とするものである。ACC とドライバー個性の関係において、ACC 単体におけるドライバー個性の影響と、ACC が複数台繋がった時のドライバー個性の影響に注目する。

## 1.2 研究概要

修士研究の目的はドライバー個性を反映した ACC の構築指針の設計である。ドライバー個性を反映した ACC とはドライバーの好みの操作入力が自動制御に反映された ACC とする。目的を達成するための 1 つ目の研究課題は ACC の制御性能に対するドライバー個性の評価方

法, つまり, ドライバモデルの設計方法である. 二つ目の研究課題は ACC が複数台繋がったプラトーン走行時におけるドライバ個性と安全性の評価方法である.

本研究では ACC システムの設計において制御ループ内に人の意思決定が含まれる Human-In-The-Loop System (HITLS)[9][10][11]の枠組みを用いる. HITLS は制御器, 人の意思決定, 制御対象で構成され, 人は制御器の出力の範囲内で意思決定を行う. HITLS[9]において人は制御器の出力の範囲内で意思決定を行う. 与えられた範囲内であれば人が意思決定可能であることを自動運転に利用することで, ドライバ個性を制御に反映させることを目指す. ドライバ個性を制御系に反映させる為, 運転性能におけるドライバの評価軸を制御器の異なる設定にする. ACC システムにおいて制御器の運転性能の評価軸は目標値への追従性能であり, ピッチングは制御されていないと考えた. そこで本論文ではピッチングをドライバの個性の自由度であると考え, ドライバの運転性能の評価軸とする. 本論文の ACC システムでは制御器 (ACC) が提示した車両の総駆動トルクから前後輪への配分量をドライバが決定する. これは ACC においてドライバが前輪駆動, 後輪駆動, 四輪駆動といった走行モードを決定することを意味する. その際ドライバは配分量を決めるのと同じ時間軸で車両を制御する為, 本論文ではドライバモデルに連続時間最適化を用いる. また車両モデルの設計には駆動力制御系を用いる. ACC システムでドライバが決定した前後輪への配分量を車両制御に反映させるには, 前後輪それぞれの駆動トルクが車両モデルの入力となっているモデルが必要である.

本論文では主双対勾配アルゴリズムを用いたドライバモデル, 制御対象として駆動力制御系に基づく車両直進モデル及び制御器を HITLS の枠組みで個性を反映した ACC システムを設計する. その後 ACC システム単体におけるドライバ個性の影響をスモールゲイン理論により解析する.

また ACC システムを直列に繋げたプラトーン走行を考える. 提案する ACC システムから構成されるプラトーンであれば個性を反映するプラトーンになると考え, 提案した ACC システムを直列に繋げることでプラトーンを作成する. そしてプラトーンにおけるドライバ個性の影響を解析する. ここではプラトーンが String stability [12]を満たすかどうかを解析する.

数値実験により提案したドライバ個性を反映した ACC システムの有効性を確認し, ドライバ個性を反映した駆動トルク配分を行った上で目標値に応答が収束することを確認する. 更に解析結果と数値実験の結果を比較する. その後プラトーンの応答が目標値に収束することを確認し, 解析結果と比較する.

本論文の1つ目の成果はドライバ個性を反映した ACC 単体における安全性評価方法の構築をしたことである. 二つ目の成果はドライバ個性を反映したプラトーンにおける安全性評価の提案をしたことである.

### 1.3 論文構成

2 章では ACC の問題設定, HITLS を用いた ACC システムの概要及びプラトーン走行の問題設定について述べる. 3 章では提案する ACC システムの制御器, 制御対象, ドライバモデル, それらから構成される ACC システムの全体像について述べる. ここではドライバモデルの解析についても述べている. 第 4 章では String Stability を用いたプラトーンの安全性評価方法について述べている. 第 5 章では MATLAB/Simulink を用いて提案したドライバ個性を反映した ACC システムとプラトーン走行のシミュレーションを行う. 最後に 6 章でまとめを述べる.

## 第2章 問題設定

本章では ACC システム設計にあたり枠組みとして用いる HITLS の概要，ACC 及びプラトゥーンの問題設定について記述する。

### 2.1 HITLS の概要

HITLS の概要を Fig. 1 に示す。  $r$  は目標となる先行車速度  $V_p$  および目標車間距離  $d^*$ ，  $u$  は制御器からの出力である総駆動トルク，  $u$  は人が選択した配分の前後輪駆動トルク，  $y$  は実際の車両速度  $V$  および車間距離  $d$  である。 HITLS は人の意思決定プロセス  $\mathcal{H}$  が制御器  $\mathcal{K}$  と制御対象  $P$  の間に入る人間機械協調型の制御である。 人を通して制御対象へ値が入力されるため，人がどのような入力を与えるかによって制御結果が変わる。人が制御器の出力の範囲内での意思決定を行う本構成を利用して，ドライバ個性を安全に ACC に反映させる事を考える。

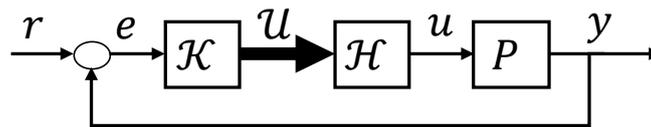


Fig. 1 HITLS の概要

### 2.2 ACC の問題設定

修士研究ではドライバが ACC を気にせず操作介入しても ACC の機能が達成するのが快適性と安全性の両立した ACC システムであると考えた。その為にドライバと ACC の運転性能の評価軸を変更する。ACC の運転性能の評価軸は目標値への追従性である。その為本論文で考えるドライバモデルの条件は下記の通りである。

1. ドライバ個性に応じて前後輪の配分量を決定し，配分比率をドライバ個性のパラメータとする。
2. ドライバ性能を評価する出力は物理量で表される。
3. ドライバ性能を評価する出力は ACC が制御していない物理量である。

1.は前輪駆動，後輪駆動，四輪駆動といった走行モードをドライバが決定することを意味する。2.は車両の挙動にドライバ個性が表れるという意味である。3.はドライバの自由度をドライバ個性とするという意味である。条件 2 と 3 を満たすドライバ性能を評価する出力はピッチングであると考えた。これは加減速時のピッチングの大きさはドライバによって異なる考えた為である。また本論文ではドライバの意思決定の過程を最適化問題として扱う。先行研究[9]の HITLS では人の意思決定過程を離散時間最適化として表していた為，制御対象の時定数に対して最適化過程の時定数が短い。一方本研究におけるドライバは現在の ACC の制御出力を制御対象である車両に反映させる為，ドライバが駆動トルク配分量を

決定する時間軸と車両制御の時間軸が同じである状況を考える。時間軸を揃える事で、制御器で定常状態を安定化させながら駆動トルク配分量決定の過渡状態にドライバ個性を反映することが狙いである。従ってドライバモデルに連続時間最適化である主双対勾配アルゴリズム[13]を用いる。先行研究[14]は各家庭の電力使用の趣向を反映した電力の分散型エネルギー管理に主双対勾配アルゴリズムを使用している。一方本論文では制御対象が階層型であるドライバ個性を反映した ACC に主双対勾配アルゴリズムを使用する。よってドライバモデルの条件を満たすピッチングを用いた主双対勾配アルゴリズムによるドライバモデルを設計する。これが1つ目の課題である。

また ACC は車両直進モデルを制御対象とする。本研究ではドライバによって決定される前後輪駆動トルクの配分が表現できるものを制御対象として用いる。この車両直進モデルにおいて、ACC が提示した範囲内で駆動トルク配分量を決定する形であれば安全であると考ええる。

### 2.3 プラトーン走行の問題設定

プラトーン走行の様子を Fig. 2 に示す。Fig. 2 において  $v_i$  及び  $d_i$  はそれぞれ自車速度及び  $i-1$  台目の車両との車間距離である。プラトーン走行は ACC を搭載した複数車両が列になって走行するのを示している。2 台目以降の車両の目標車速は自車両より 1 台前の車両の車速となる。その為複数車両が高速で走行する際、認知ミスや制御の遅れが原因となって各車両の車間距離及び車速には車両挙動の遅れが伝播する[12]。結果プラトーンの前頭付近での車間距離や車速の変動などの各 ACC システムの影響はプラトーン後方になるほど大きくなる。最終的には渋滞や事故に繋がるケースもある。これを「ショックウェーブの伝播」という[15]。以上よりプラトーン走行においてはショックウェーブの伝播を無くすることが重要である。ショックウェーブの伝播がないとき、そのプラトーンは String stability[12]を有している。作成したプラトーンが String stability を満たしていれば、そのプラトーンは個性を安全に反映していると考ええる。



Fig. 2 プラトーン走行モデル

## 第3章 ACC システムにおける制御器, ドライバモデル及び 制御対象の設計

本章では HITLS を用いた枠組みを用いて ACC システムを構成する制御器, ドライバモデル及び制御対象の詳細について述べる. ドライバモデルに関しては提案する目的関数を用いたものと既存の目的関数を用いたもの両方を設計及び解析する.

### 3.1 制御器

ACC は先行車と一定の車間距離を保って自動的に追従する. 先行車との距離が長い場合は Cruise Control (CC) と同様の制御を行い, 先行車との距離が近い場合には目標車間距離を保って追従走行を行う. ACC は自車と先行車の速度偏差及び実際の車間距離と目標車間距離の偏差を入力とし, 総駆動トルクを出力とする. 本研究ではそれぞれ PI 制御を用いて制御する. その為 ACC における車両への制御入力である総駆動トルク  $\alpha$  は

$$\alpha = K_{Pdis}(d - d^*) + K_{Idis} \int (d - d^*) dt + K_{Pvel}(V - V_p) + K_{Ivel} \int (V - V_p) dt, \quad (1a)$$

$$d = - \int (V - V_p) dt, \quad (1b)$$

$$d^* = t_{hw}V_p + d_0 \quad (1c)$$

と表せる. ここで式(1)における記号の意味をそれぞれ Table 1 に示す. Fig. 3 に ACC のブロック線図に示す. 破線で囲ったのが ACC における制御器  $\mathcal{K}$  であり, 制御対象  $P$  が車両直進モデルである.

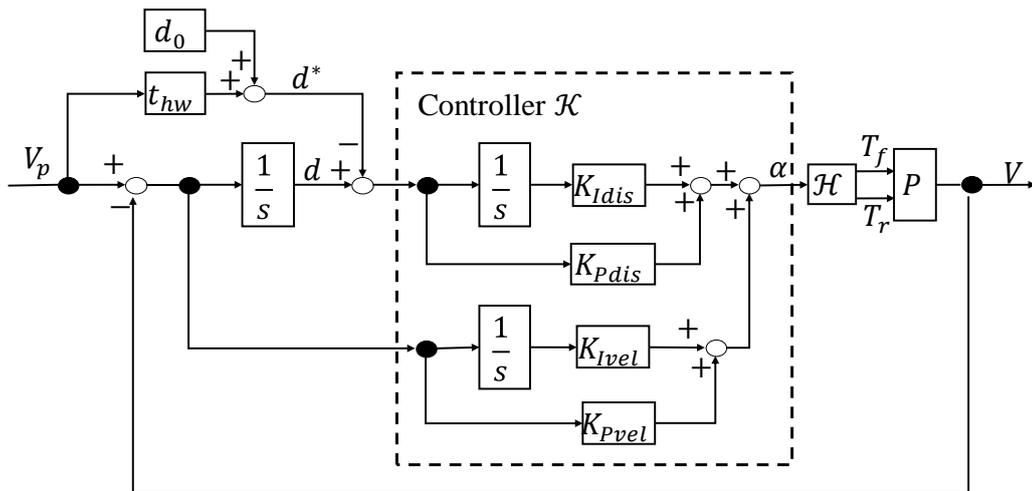


Fig. 3 制御器  $\mathcal{K}$  の概要

Table 1 式(1)におけるシンボルの意味

シンボル	意味
$K_{Pdis}$	現在の車間距離と目標車間距離に対する比例ゲイン
$K_{Idis}$	現在の車間距離と目標車間距離に対する積分ゲイン
$d$	現在の車間距離
$d^*$	目標車間距離
$K_{Pvel}$	自車と先行車の速度差に対する比例ゲイン
$K_{Ivel}$	自車と先行車の速度差に対する積分ゲイン
$V_p$	先行車速度
$t_{hw}$	車間時間
$d_0$	安全車間距離

### 3.2 制御対象

本節では制御対象 Fig. 4 で表される車両の運動を考える。このモデルは制動運動モデルであり、制動時における車体の並進運動及び車輪の回転運動から構成される。本論文ではドライバ個性に応じて総駆動トルクの前後輪配分量を決定するため、前後輪駆動トルクの配分量を表現できる車輪の回転運動を含めた本車両直進モデルを用いる。この時運動方程式[16][17]は

$$m\dot{V} = \mu_f W_f + \mu_r W_r - \frac{1}{2} \rho S C_D V^2, \quad (2a)$$

$$2I_f \dot{\omega}_f = -2\mu_f W_f R_f + T_f, \quad (2b)$$

$$2I_r \dot{\omega}_r = -2\mu_r W_r R_r + T_r, \quad (2c)$$

$$W_f = \frac{W}{L} \left( L_r - \frac{h}{g} \dot{V} \right), \quad (2d)$$

$$W_r = \frac{W}{L} \left( L_f + \frac{h}{g} \dot{V} \right), \quad (2e)$$

$$\lambda_f = \frac{R_f \omega_f - V}{\max(V, R_f \omega_f, \epsilon)}, \quad (2f)$$

$$\lambda_r = \frac{R_r \omega_r - V}{\max(V, R_r \omega_r, \epsilon)}, \quad (2g)$$

$$W = mg \quad (2h)$$

となる。ここで式(2)における記号の意味をそれぞれ Table 2 に示す。また零割防止の為に  $\epsilon$  は微小な値を示し、本論文では  $\epsilon = 0.5$  とする。タイヤ路面摩擦係数  $\mu_x$  は Fig. 5 で表わされるスリップ率  $\lambda_x$  によって変化する。

車両モデルは式(2b) (2c) で表される車輪の回転運動を含むモデルとなっており、スリップする可能性がある。そこでスリップするのを防ぐ為、駆動力制御を行う。駆動力制御には文献[9]の手法を用いた。タイヤ路面摩擦係数  $\mu_x$  はあるスリップ率  $\lambda_{peak_p}$  で最大となり、 $\lambda_{peak_n}$  で最小となる。

$\lambda_{peak_n} \leq \lambda \leq \lambda_{peak_p}$  の範囲では  $\lambda$  が大きければ大きいほど  $\mu_x$  は大きくなる。よってスリップ率を  $\lambda_{peak_n} \leq \lambda(t) \leq \lambda_{peak_p}$  の範囲で操作することで  $\mu_x(t)$  を操作することができ、駆動トルクを制御することができる。一方でスリップ率の定義は

$$\lambda_x(t) = \begin{cases} \frac{R_x \omega_x(t) - V(t)}{R_x \omega_x(t)} & (R_x \omega_x(t) \geq V(t)) \\ \frac{R_x \omega_x(t) - V(t)}{V(t)} & (R_x \omega_x(t) < V(t)) \end{cases} \quad (3)$$

となり、駆動時 ( $R_x \omega_x(t) \geq V(t)$ ) と制動時 ( $R_x \omega_x(t) < V(t)$ ) で異なる。故に車輪速制御によるスリップ率制御を構成した際にスリップ率そのものを操作量として用いるのは不都合である。そこで

$$y = \frac{R_x \omega_x(t)}{V(t)} - 1 \quad (4)$$

で表される車体速と車輪速の関係  $y$  を操作することで駆動力制御を行う [9]。駆動力制御系はインナーループを車輪速ループとし、アウトーループを駆動力オブザーバが含まれる駆動力ループとする構成になる。駆動力制御には I 制御を用い、その出力が  $y$  の指令値  $y^*$  となる。車輪速制御系への車輪速指令値  $R_x \omega_x^*$  は

$$R_x \omega_x(t)^* = \begin{cases} V(t) + y(t)V(t) & (V(t) \geq \sigma) \\ V(t) + y(t)\sigma & (V(t) < \sigma) \end{cases} \quad (5)$$

で求める [17]。  $V(t) < \sigma$  において第二項の  $y(t)V(t)$  を  $y(t)\sigma$  とするのは  $V = 0$  のとき常に  $R_x \omega_x(t)^* = 0$  となるのを防ぐ為である。駆動力制御器の積分器に積分値の上限  $y_{max}$  及び  $y_{min}$  を設定し、  $y$  の値に制限をかけることでスリップ率を制限することが出来る [17]。駆動トルクオブザーバ設計には

$$\omega_x = \frac{1}{2I_x \cdot s} T_x^* \quad (6)$$

を用いる。各前後輪の角速度を検出することで Fig. 6 に示す駆動トルクオブザーバを作成する。 Fig. 6 において  $\hat{T}_x$  は推定された駆動トルク、  $T_x^*$  は車輪速度制御系の出力である。この時駆動トルク系が十分に高速であると仮定し、検出した各前後輪の角速度から前後輪駆動トルクを推定する [17]。推定された駆動トルクをトルク指令値とし、フィードバックする。駆動力制御系を Fig. 6 に表す。 HITLS における制御対象  $P$  は Fig. 6 で表される駆動力制御系全体を示している。

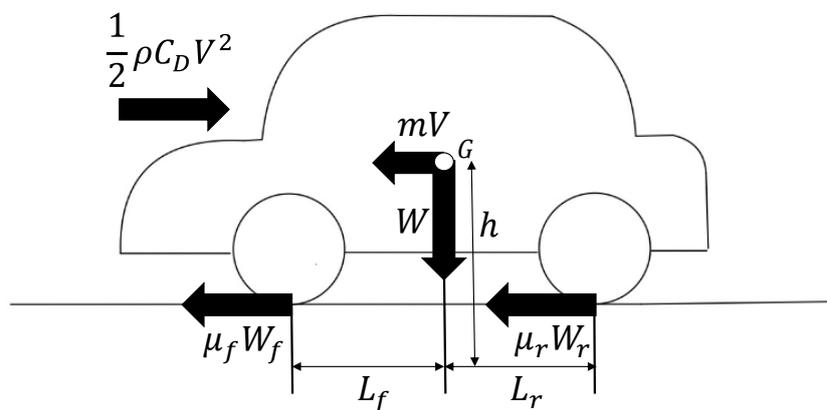


Fig. 4 車両モデル

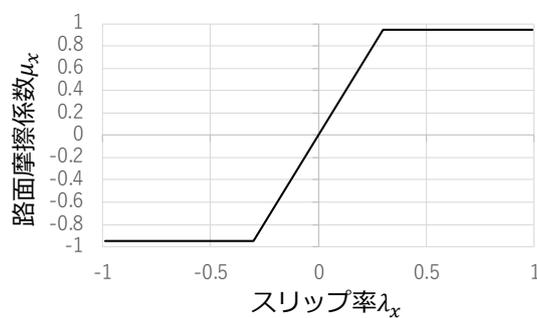
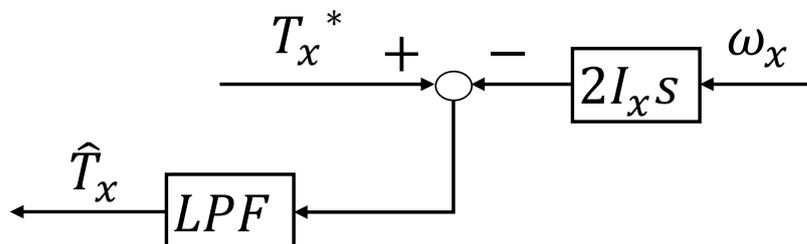
Fig. 5 路面摩擦係数 $\mu_x$ とスリップ率 $\lambda_x$ の関係

Fig. 6 駆動トルクオブザーバ

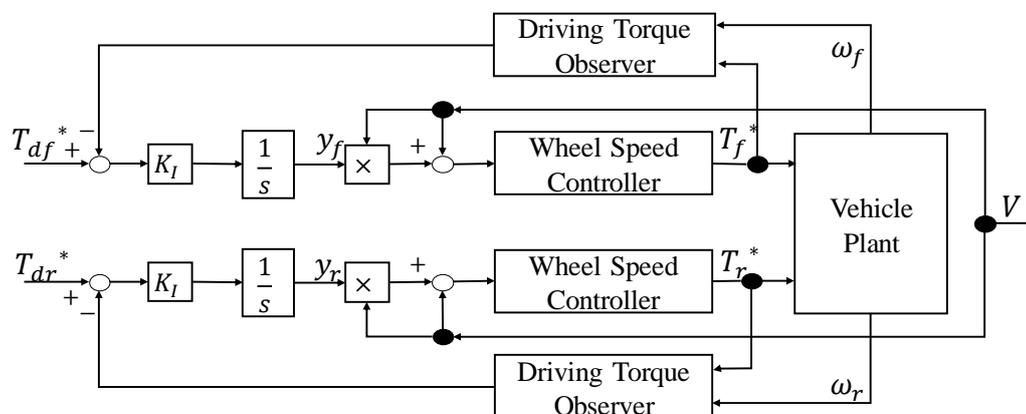


Fig. 7 駆動力制御系

Table 2 式(2)におけるシンボルの意味

シンボル	意味
$x \in (f, r)$	前輪と後輪を表す添え字
$m$	車体重量
$V$	車体速度
$\mu_x$	タイヤ路面摩擦係数
$W_x$	前後輪接地荷重
$\rho$	空気密度
$S$	車体の前面投影面積
$C_D$	車体の空気抵抗
$I_x$	慣性モーメント
$\omega_x$	タイヤの角速度
$R_x$	タイヤ半径
$T_{dx}$	駆動トルク
$L$	前後輪タイヤ間の距離
$L_x$	重心から各タイヤ重心までの距離
$h$	車両重心高さ
$g$	重力加速度
$\lambda_x$	スリップ率

### 3.3 ドライバモデル及び ACC システムの全体図

本論文ではドライバを最適化モデルとして扱う。これは機械が提示する選択肢の中から最適な選択肢をドライバは選ぶと考えた為である。本研究では 2.2 節で述べたような理由から最適化方法として連続時間最適化である主双対勾配法を選んだ。以下に説明する。

#### 3.3.1 主双対勾配法

主双対勾配法の状態方程式表現である主双対勾配アルゴリズムは制約付き凸計画問題の求解手法の一つである。最適化問題は

$$\text{minimize } f(x), \quad (7a)$$

$$\text{subject to } g(x) \leq 0, \quad Ax - b = 0 \quad (7b)$$

で表されるとする[13]。式(7)において  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  は目的関数、式(7b)において  $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  は不等式制約条件、 $A \in \mathbb{R}^{r \times n}$  と  $b \in \mathbb{R}^r$  は等式制約条件に用いられる定数である。この最適化問題では以下の仮定 1 を置く。

仮定 1. 関数  $f, g$  は凸関数であり, 連続的微分可能である. また, 勾配  $\nabla f, \nabla g$  は局所リプシッツ連続である. 集合  $\{x \in \mathbb{R}^n | g(x) < 0, Ax - b = 0\}$  は空集合ではなく,  $f$  は実行可能領域で最小値を有する.

仮定 1 を満たすとき式(7)で表される最適化問題は凸計画問題である.  $x^* \in \mathbb{R}^n$  が最適化問題(7)の最適解となる必要十分条件は KKT 条件

$$\nabla f(x^*) + \nabla g(x^*)\lambda^* + A^T\mu^* = 0, \quad (8a)$$

$$Ax^* - b = 0, \quad (8b)$$

$$\lambda^* \geq 0, \quad g(x^*) \leq 0, \quad \lambda^* \circ g(x^*) = 0 \quad (8c)$$

を満たす  $\mu^* \in \mathbb{R}^n$  と  $\lambda^* \in \mathbb{R}_{\geq 0}^m := [0, \infty)^m$  が存在することである. ただし  $\circ$  はアダマール積である. 式(8)を満たす解  $(x^*, \mu^*, \lambda^*)$  の集合を  $\mathcal{X}^* \subseteq \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^r \times \mathbb{R}_{\geq 0}^m$  とする. ここで最適化問題(7)に対するラグランジュ関数  $L_0: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^r \times \mathbb{R}_{\geq 0}^m$  を

$$L_0(x, \mu, \lambda) := f(x) + \mu^T(Ax - b) + \lambda^T g(x) \quad (9)$$

と定義する[13]. 式(9)において  $x \in \mathbb{R}^n$  は主変数,  $\mu \in \mathbb{R}^r$  は等式制約条件の双対変数,  $\lambda \in \mathbb{R}_{\geq 0}^m$  は不等式制約条件の双対変数である. 主双対法では  $x$  は  $L_0$  を最小化するように,  $\mu$  及び  $\lambda$  は最大化するように更新される. このとき最適化問題(7)の解としての主双対ダイナミクスは

$$\dot{x} = -\nabla f(x) - \nabla g(x)\lambda - A^T\mu, \quad (10a)$$

$$\dot{\mu} = Ax - b, \quad (10b)$$

$$\dot{\lambda} = [g(x)]_{\lambda}^+, \quad \lambda(0) \geq 0 \quad (10c)$$

と表せる. 式(10c)における演算子  $[\cdot]_{\lambda}^+$  は

$$[\delta]_{\varepsilon}^+ = \begin{cases} 0, & \text{if } \varepsilon = 0 \text{ and } \delta < 0 \\ \delta, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

で表される演算を適応することを意味する. ただし  $\varepsilon, \delta \in \mathbb{R}$  である.  $(x, \mu, \lambda)$  が KKT 条件を満たすとき,  $(x, \mu, \lambda)$  は式(10)で表されるシステムの平衡点である. 以上より最適化問題(7)の最適化プロセスのブロック線図は Fig. 8 のように表せる. なお不等式制約条件は本論文では用いない.

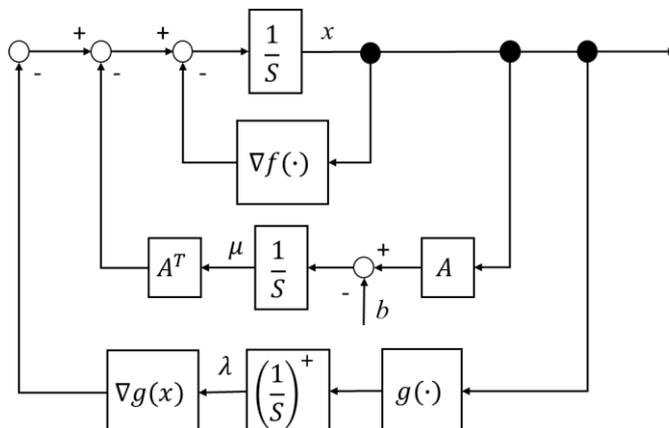


Fig. 8 主双対勾配ダイナミクスのブロック線図

### 3.3.2 ピッチングを用いたドライバモデル

第2節で述べたように、本論文では、ドライバが前後輪の駆動トルク配分量を決定する過程を連続時間最適化問題として扱う。この最適化問題の解法として3.3.1節で述べた連続時間最適化アルゴリズムである主双対勾配アルゴリズムを用いる。このアルゴリズムをドライバモデルとして用いる。ドライバ個性はピッチングの大小で表現されると考える。本論文では

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{2}{I_y} \left\{ \frac{W}{L} (L_r - L_f) + \left( \frac{T_f}{R_f} + \frac{T_r}{R_r} \right) h \right\} \quad (12)$$

で表される車両重心周りのピッチング  $\theta$  を用いる[18]。後輪駆動トルク  $T_r$  は、前輪駆動トルク  $T_f$  の  $c$  倍であると考え、式(12)の右辺に  $I_y/2$  掛けて2乗したものが、本論文における目的関数である。その結果、ドライバの意思決定プロセスは、

$$\min f(T_f) = \left\{ \frac{W}{L} (L_r - L_f) + \left( \frac{T_f}{R_f} + \frac{cT_f}{R_r} \right) h \right\}^2, \quad (13a)$$

$$\text{subject to } g(T_f) = T_f + cT_f = \alpha \quad (13b)$$

で表される等式制約付き最適化問題でモデル化される。ここで、 $\alpha$  は式(1)で示された ACC からの入力である総駆動トルクである。式 (13a) は重心位置のピッチングの2乗を最小にするもので、 $c$  は駆動トルクを後輪にどれだけ配分するかの重みである。重み  $c$  の値を変えることで、駆動トルク配分量とピッチングの大きさが変化する。従って、ピッチングに現れるドライバ個性は、重み  $c$  の値を変えることで再現される。 $c$  が 1 より小さい時前輪駆動、 $c$  が 1 の時 4 輪駆動、 $c$  が 1 より大きい時後輪駆動にドライバが操作しているような状況である。(13b)の制約は、ドライバが配分する前後輪の駆動トルクの和が、式 (1) で設定した制御器からの入力である総駆動トルク  $\alpha$  と等しくなることを意味する。式 (13) は、 $T_r$  とし  $cT_f$  を用いることで、1 変数の関数となり、解析が容易になる。

ドライバモデルは、式(13)で示される目的関数と等式制約を用いた主双対勾配アルゴリズムであり

$$\mathcal{H}: \begin{cases} \dot{T}_f = \lambda \nabla_{T_f} g(T_f) - \nabla_{T_f} f(T_f) \\ \dot{\lambda} = -(g(T_f) - \alpha) \end{cases} \quad (14)$$

と表せる[13][14].  $\mathcal{H}$ は総駆動トルク $\alpha$ を入力し, 前輪トルク $T_f$ を出力する. また, 等式制限条件から設定される前輪駆動トルクと後輪駆動トルクが $\mathcal{H}$ の出力( $T_f$ ,  $T_r = cT_f = \alpha - T_f$ )である. なお, 式(13a)では目的関数として1次式を用いた場合主双対勾配法で用いる $\nabla_{T_f} f(T_f)$ が一定になってしまう為, 2次式を用いている. この時のドライバモデル及びACCシステム全体のブロック線図はそれぞれFig. 9, Fig. 10のように表せる. またFig. 10で用いられている制御器 $\mathcal{K}$ 及び制御対象 $P$ はそれぞれ3.1節のFig. 3で表される $\mathcal{K}$ 及び3.2節のFig. 7で表される駆動力制御系と同一である.

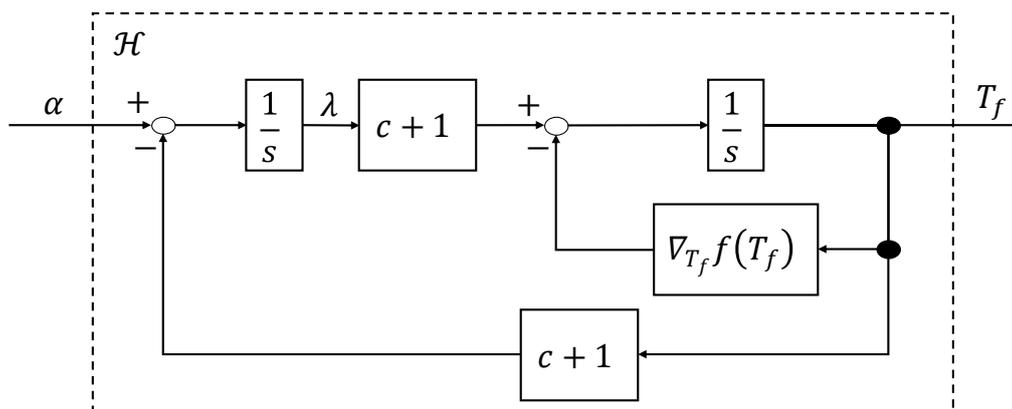


Fig. 9 ピッチングを用いたドライバモデルのブロック線図

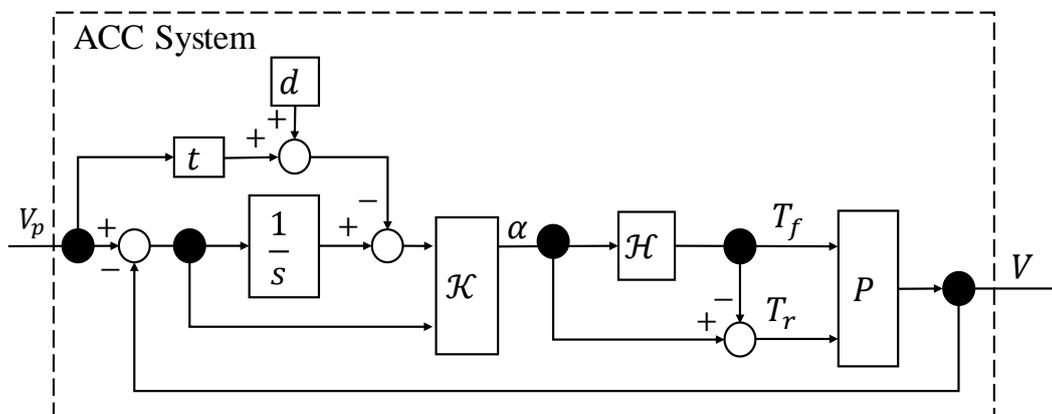


Fig. 10 Fig.10 のドライバモデルを用いたACCのブロック線図

### 3.3.3ピッチングを用いたドライバモデルの解析

ここでは, ACCシステム単体におけるドライバ個性の影響について解析する. ドライバモデルは, 式(13)を式(14)に代入することで,

$$\mathcal{H}: \begin{cases} \dot{T}_f = \lambda \nabla_{T_f} g(T_f) - \nabla_{T_f} f(T_f) \\ \lambda = -(g(T_f) - \alpha) \\ \nabla_{T_f} f(T_f) = X^2 T_f + XY \\ \nabla_{T_f} g(T_f) = c + 1 \\ g(T_f) = T_f + c T_f = \alpha \end{cases}, \quad (15a)$$

$$X = \left( \frac{1}{R_f} + \frac{c}{R_r} \right) h, \quad (15b)$$

$$Y = \frac{W}{L} (L_r - L_f) \quad (15c)$$

と表せる. 式(15)より $\lambda$ は

$$\lambda = \frac{1}{s} \{ -(c+1) T_f + \alpha \} \quad (16)$$

と表せる. 式(16)を式(15)に代入すると

$$\dot{T}_f = \frac{1}{s} \{ -(c+1) T_f + \alpha \} (c+1) - X^2 T_f + XY \quad (17)$$

となる. 式(17)よりドライバモデルの入出力関係は

$$T_f = \frac{(c+1)}{s^2 + X^2 s + (c+1)^2} \alpha + \frac{s}{s^2 + X^2 s + (c+1)^2} XY \quad (18)$$

のように伝達関数表現で表せる. ドライバモデルは, 式(18)のブロック線図である Fig. 11 に等価交換することができる. Fig. 11 より, ドライバモデルはフィードバック項とフィードフォワード項から構成される. 故にドライバ個性は ACC システムにおいてフィードバック項による不確かさ及びフィードフォワード項による外乱として現れる. つまり, ACC システムに対するドライバモデルの影響は「外乱と不確かさがあるフィードバックシステムのロバスト安定性」で評価できることを意味する. 本論文はスモールゲイン定理に基づくロバスト安定性を利用することで, ドライバ個性を反映した ACC システムの安全性を評価する.

ACC システムのロバスト安定性を解析する為, ドライバモデルのフィードバック項に含まれるドライバ個性による ACC システムにおける不確かな伝達特性 $\Delta$ を導入する.  $\Delta$ を求める為,

$$T_f' = H\alpha, \quad (19a)$$

$$H = \frac{(c+1)}{s^2 + X^2 s + (c+1)^2}, \quad (19b)$$

$$T_f' = w_p + \alpha = \Delta\alpha + \alpha, \quad (19c)$$

$$w = \frac{s}{s^2 + X^2 s + (c+1)^2} XY \quad (19d)$$

$$T_f = T_f' + w \quad (19e)$$

を定義する. 式(19)より,  $\Delta$ は

$$\Delta = H - I \quad (20)$$

と表せる. 式(20)を用いた ACC システムを Fig. 12 に示す. これは Fig. 10 と等価である.. 閉ループ系  $M$  はドライバ個性を除く ACC システムである. Fig. 3 の閉ループ系において  $\|\Delta\|_\infty \leq \gamma$  の時, ロバスト安定性を満たす為の必要十分条件は以下の a.及び b.を満たすことである.

- a.  $\|M\|_\infty < 1$
- b.  $M$  が内部安定である.

$M$  の  $\Delta\alpha$  から  $\alpha$  までの伝達関数の極の実部がすべて負であれば  $M$  は内部安定である. そして 3.1 節に示したドライバモデルのフィードバック項におけるドライバ個性が制御器のロバスト性能によって排除されてもフィードフォワード項は残るので, ドライバ個性を完全に排除することはできない. この時提案する ACC システムではドライバモデルのフィードフォワード項によってドライバ個性と安全性が両立していると考えられる.

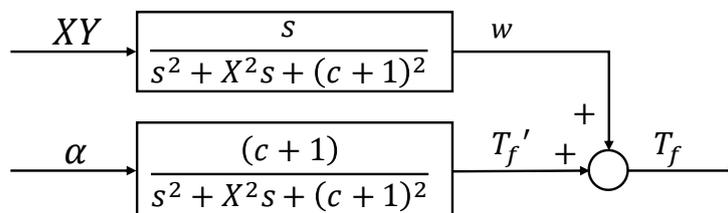


Fig. 11 式(18)のドライバモデルのブロック線図

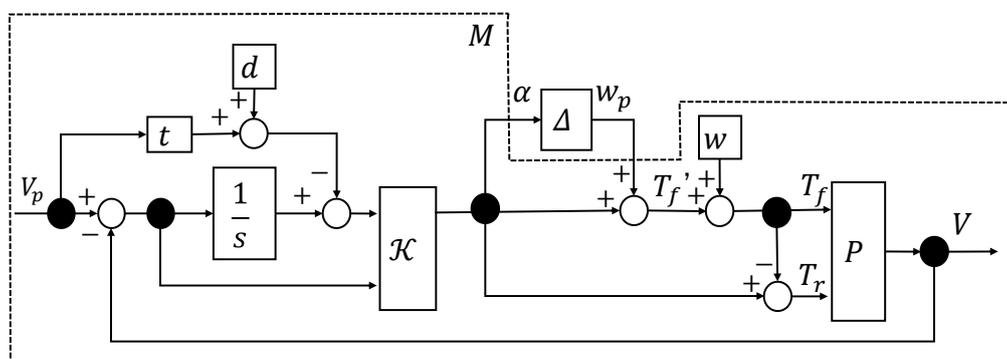


Fig. 12  $\Delta$ を用いて表わした ACC システム

### 3.3.4 既存の目的関数を用いたドライバモデル

前節で提案したドライバモデルと既存の手法を用いたドライバモデルとの比較の為, 本節では既存研究[14]の手法を用いたドライバモデルについて述べる.

既存研究の手法を用いると前後輪それぞれに目的関数

$$F(T_x) = (T_x + a_x)^2 + b_x \quad (22)$$

を設定する。式(22)で表される目的関数は提案した目的関数と比較して車両運動において関連のない式である。すなわちドライバ個性が車両運動のどこに現れるかが不明な式である。既存研究における目的関数、等式制約条件を元に作成したドライバの意思決定プロセスは

$$\min F_x(\mathbf{T}), \quad (23a)$$

$$\text{subject to } G(\mathbf{T}) = \sum_{x=f,r}^n T_x = \alpha \quad (23b)$$

である。ここで $\mathbf{T} = [T_f \ T_r]^T$ である。目的関数 $F_x$ は数式的に車両モデルに対して意味を持たないモデルである。また等式制約条件は前後輪駆動トルクの和がACCからの入力である総駆動トルク $\alpha$ になるという意味のものである。式(10)で表される主双対勾配法に式(23)で示される目的関数と等式制約を用いると

$$\dot{\mathbf{T}} = \lambda' \nabla_{\mathbf{T}} G(\mathbf{T}) - \nabla_{\mathbf{T}} F(\mathbf{T}), \quad (24a)$$

$$\dot{\lambda}' = -(G(\mathbf{T}) - \alpha) \quad (24b)$$

と表せる[13][14]。この主双対勾配アルゴリズムは総駆動トルク $\alpha$ を入力とし、前輪トルク $T_f$ 及び後輪駆動トルク $T_r$ を出力とする。この主双対勾配アルゴリズムでは時間変化する $\alpha$ に対して常に等式制約条件が満たされるとは限らない。そこで過渡状態においても等式制約条件を満たすよう、 $\mathbf{T}$ を等式制約上に射影する[14]と

$$\mathbf{z} = \mathbf{T} + \beta(\mathbf{T})\mathbf{1} \quad (25)$$

となる。ここで $\mathbf{z} = [z_f \ z_r]^T$ である。ただし $\mathbf{1} \in \mathbb{R}^2$ は全要素が1の列ベクトルとする。ここで $\beta(\mathbf{T}_x)$ は実数値をとり、

$$G(\mathbf{z}) = \alpha \quad (26)$$

を満たすものとする。式(25)(26)より

$$G(\mathbf{z}) = G(\mathbf{T}) + 2\beta(\mathbf{T}) = \alpha \quad (27)$$

となるため、

$$\beta(\mathbf{T}_x) = -\frac{G(\mathbf{T}) - \alpha}{2} \mathbf{1} \quad (28)$$

と表せる。以上より射影 $\mathbf{z}$ は

$$\mathbf{z} = \mathbf{T} - \frac{G(\mathbf{T}) - \alpha}{2} \mathbf{1} \quad (29)$$

と表せる。よって既存研究を元に作成したドライバモデルは

$$\mathcal{H}': \begin{cases} \dot{\mathbf{T}} = \lambda' \nabla_{\mathbf{T}} G(\mathbf{T}) - \nabla_{\mathbf{T}} F(\mathbf{T}) \\ \dot{\lambda}' = -(G(\mathbf{T}) - \alpha) \\ \mathbf{z} = \mathbf{T} - \frac{G(\mathbf{T}) - \alpha}{2} \mathbf{1} \end{cases} \quad (30)$$

と表せる[14]. このドライバモデルのブロック線図を Fig. 13 に示す. またこのドライバモデルを用いた ACC システムは Fig. 14 で表され, 制御器 $\mathcal{K}$ 及び制御対象 $P$ はそれぞれ 3.1 節の Fig. 3 で表される $\mathcal{K}$ 及び 3.2 節の Fig. 7 で表される駆動力制御系と同一である.

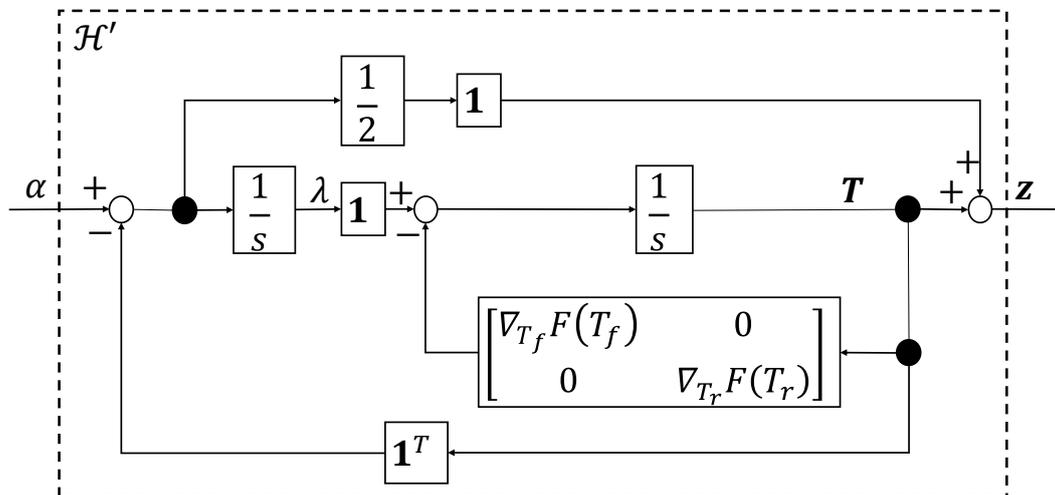


Fig. 13 既存の目的関数を用いたドライバモデル

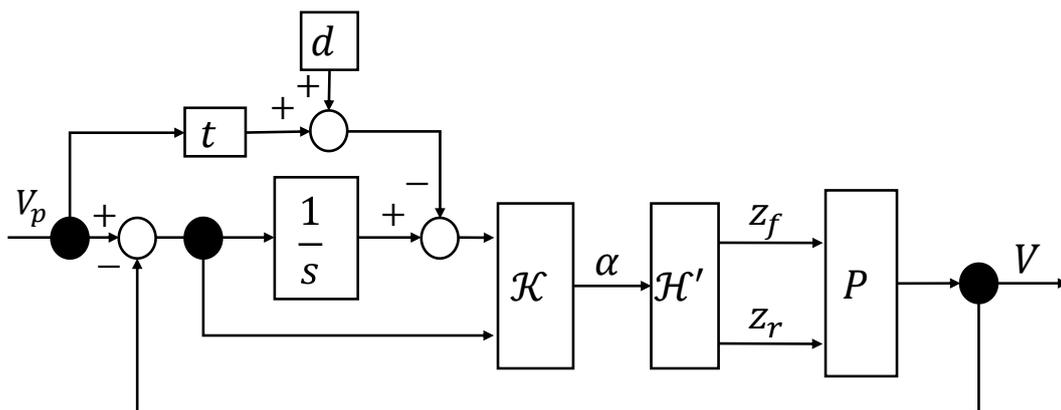


Fig. 14 既存の目的関数を用いた ACC システムの概要

### 3.3.5 既存の目的関数を用いたドライバモデルの解析

本節では既存研究の手法を用いたドライバモデルの解析を目的関数に着目して行う[14]. 目的関数 $F(T_x)$ は

$$F(T_x) = \tau_x T_x^2 + \gamma_x T_x + \phi_x \quad (31)$$

と記述できるとする. ただし $\tau$ は正数,  $\gamma$ 及び $\phi$ は実数である. 今回 $\tau_x = 1$ となる.

式(31)より目的関数の勾配 $\nabla_{T_x} F(T_x)$ は

$$\nabla_{T_x} F(T_x) = 2\tau_x T_x + \gamma_x$$

で表される. これよりドライバモデル $\mathcal{H}'$ は Fig. 15(a)で表される. Fig. 15(a)は Fig. 15(b)に変換できる. 故に

$$\hat{\mathbf{T}} = \frac{1}{s+2} (\hat{\lambda}(s)\mathbf{1} - \hat{\mathbf{v}}(s)) \quad (32)$$

と表せる. ただし  $\mathbf{v} = [v_f \ v_r]^T$  である. また  $\hat{\boldsymbol{\varphi}}(s)$  はそれぞれ  $\boldsymbol{\varphi}$  をラプラス変換したものである. 式(29)に式(32)を代入すると

$$\hat{\mathbf{z}}(s) = \frac{1}{s+2} (\hat{\lambda}(s)\mathbf{1} - \hat{\mathbf{v}}(s)) - \frac{G(\hat{\mathbf{T}}(s)) - \hat{\alpha}(s)}{2} \mathbf{1} \quad (33)$$

となる. 式(24b)(33)より

$$\hat{\mathbf{z}}(s) = -\frac{s^2 + 2s + 2}{2s(s+2)} \{G(\hat{\mathbf{T}}(s)) - \hat{\alpha}(s)\} \mathbf{1} - \frac{1}{s+2} \hat{\mathbf{v}}(s) \quad (34)$$

が得られる. ここで  $G(\hat{\mathbf{T}}(s)) = \mathbf{1}^T \hat{\mathbf{T}}(s)$  であるため,

$$\hat{\mathbf{z}}(s) = \frac{s^2 + 2s + 2}{2s(s+2)} \{\hat{\alpha}(s) - \mathbf{1}^T \hat{\mathbf{T}}(s)\} \mathbf{1} - \frac{1}{s+2} \hat{\mathbf{v}}(s) \quad (35)$$

となる. また等式制約条件より

$$G(\mathbf{T}) = \sum_{x=f,r}^n T_x = \alpha$$

であるため,

$$\mathbf{1}^T \hat{\mathbf{z}}(s) = \hat{\alpha}(s)$$

が成り立つ. 故に式(35)の両辺に左から  $\mathbf{1}^T$  を掛けると

$$\hat{\alpha}(s) = \frac{s^2 + 2s + 2}{s(s+2)} \{\hat{\alpha}(s) - \mathbf{1}^T \hat{\mathbf{T}}(s)\} - \frac{1}{s+2} \mathbf{1}^T \hat{\mathbf{v}}(s) \quad (36)$$

となる. 式(36)より

$$\mathbf{1}^T \hat{\mathbf{T}}(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 2} (2\hat{\alpha}(s) - s\mathbf{1}^T \hat{\mathbf{v}}(s)) \quad (37)$$

を得る. 式(37)を式(35)に代入すると

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{z}}(s) &= \frac{1}{2} \hat{\alpha}(s)\mathbf{1} + \frac{1}{2(s+2)} \mathbf{1}^T \hat{\mathbf{T}}(s)\mathbf{1} - \frac{1}{s+2} \hat{\mathbf{v}}(s) \\ &= \frac{1}{2} \hat{\alpha}(s)\mathbf{1} + \frac{1}{2(s+2)} \left( \frac{1}{2} \mathbf{1}^T \mathbf{1} - \mathbf{I} \right) \hat{\mathbf{v}}(s) \end{aligned} \quad (38)$$

と表せる. ドライバモデルは, 式(38)のブロック線図である Fig. 15(c) に等価交換することができる. Fig. 15(c) よりドライバ個性が現れるパラメータ  $\mathbf{v}$  がフィードフォワード入力になっており, 個性が制御ループ外に出されることがわかる.

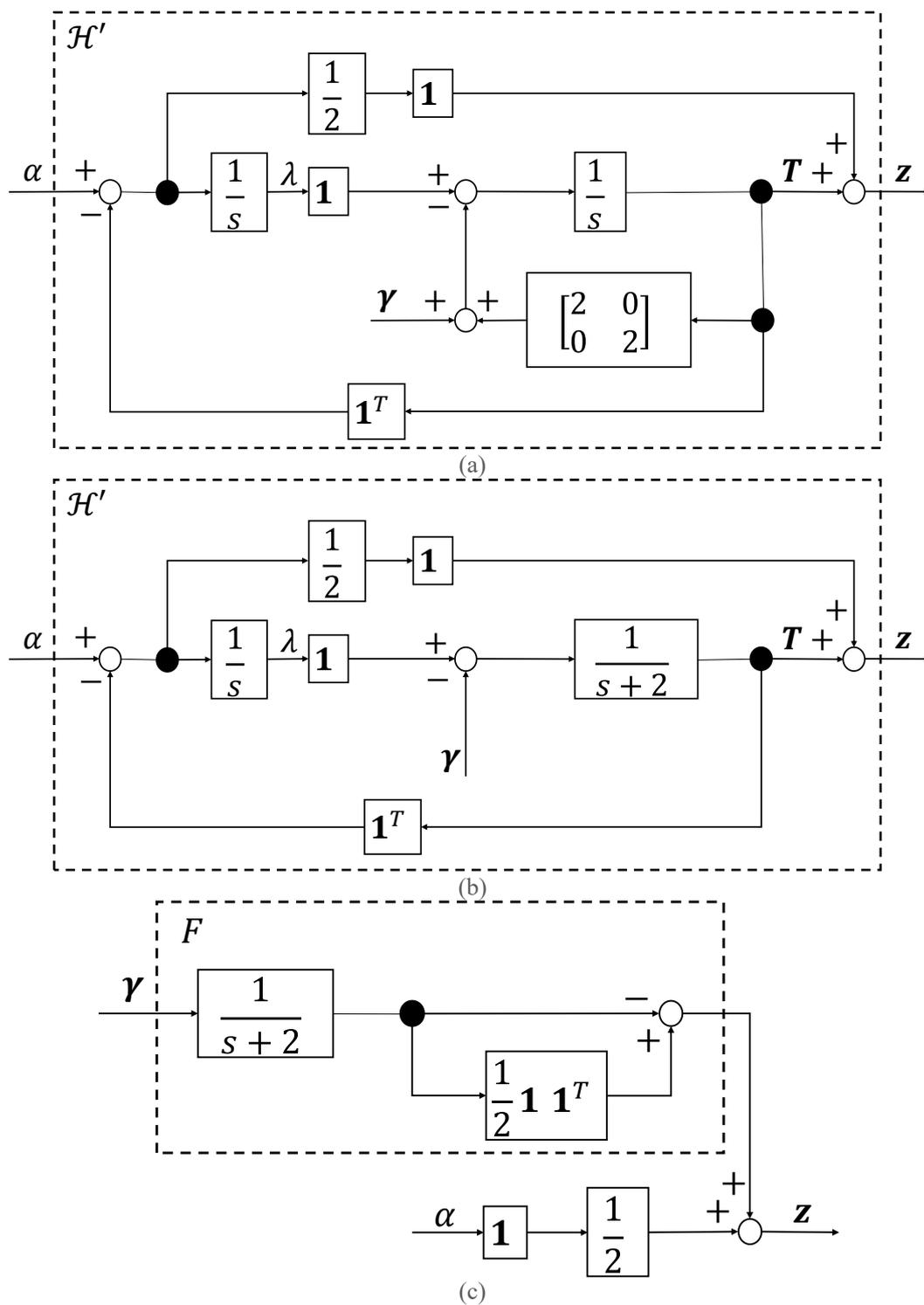


Fig. 15 既存の目的関数を用いたドライバモデル

## 第4章 プラトーン走行

プラトーンは ACC 車両を複数台直列に繋げたものを本論文では示す。本章では 3 章までに述べた ACC システムを用いたプラトーンについて述べる。また 3.3.3 節ではドライバー個性が制御ループ内にもたらす影響についてのみしか解析を行っていない。そこで本章では String Stability の定義及び ACC 車両を複数台繋げたときのドライバー個性のもたらす影響について解析を行う。本論文におけるプラトーン走行で用いるモデルは、Fig. 10 で表されるピッチングに現れるドライバー個性を反映した ACC システムである。これを 5 台縦列につなげてプラトーンとする。プラトーンを Fig. 16 に示す。

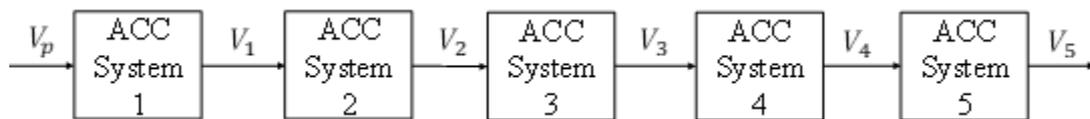


Fig. 16 プラトーンの入出力関係

### 4.1 String Stability の定義

プラトーンにおいて  $i$  台目の車両速度を  $v_i$ 、 $i$  番目の車両位置を  $x_i$  とすると

$$x_i = \frac{1}{s} v_i, \quad (39a)$$

$$v_i = G_i(s) v_{i-1} \quad (39b)$$

が成り立つ。  $s$  はラプラス演算子である。式(1c)(39)より目標車間距離と実際の車間距離の偏差  $\varepsilon_i$  は

$$\varepsilon_i = x_{i-1} - x_i - t_{hw} v_p - d_0 \quad (40)$$

と表せる。また式(40)より  $i$  台目の車両の  $\varepsilon_i$  から  $i+k$  台目の車両の  $\varepsilon_{i+k}$  の伝達関数として

$$\bar{G}_{i,k} = \frac{\varepsilon_{i+k}}{\varepsilon_i} \quad (41)$$

と定義する[12]。プラトーンの ACC モデルは直列に繋がれている為式(41)は

$$\bar{G}_{i,k} = G_i \cdot \frac{\{G_{i+1} \cdots G_{i+k-1} \cdot v_i (1 - G_{i+k} - s \cdot t_{hw})\} - s \cdot d_0}{v_i (1 - G_i - s \cdot t_{hw}) - s \cdot G_i d_0} \quad (42)$$

とも表せる。  $\bar{G}_{i,k}$  は  $i$  台目から  $i+k$  台目まで全ての車両における  $G_i$  に依存する。

また String stability は以下のように定義される[12]。

#### 定義 1

$$\sup_{\varepsilon_i \neq 0} \frac{\|\varepsilon_{i+1}\|_2}{\|\varepsilon_i\|_2} = \|\bar{G}_{i,1}\|_\infty \leq 1 \quad (43)$$

が満たされるとき、String stability を満たす。

よって式(42)(43)より  $i$  台目から  $i+k$  台目の車両において

$$\|\bar{G}_{i,k}\|_{\infty} \leq 1 \quad (44)$$

が満たされるとき String stability を満たす。

#### 4.2 提案するプラトーンにおける String stability の条件

本論文で提案したドライバモデルは伝達関数で表される為、ドライバモデルを含む ACC システムにおける  $\bar{G}_{i,k}$  を求めることができる。そこで Fig. 16 に示す本論文で用いるプラトーンにおける 1 台目の車両の  $\varepsilon_1$  から 5 台目の車両の  $\varepsilon_5$  までの伝達関数  $\bar{G}_{1,2}$ ,  $\bar{G}_{2,3}$ ,  $\bar{G}_{3,4}$ ,  $\bar{G}_{4,5}$  を本節では求める。伝達関数  $\bar{G}_{1,2}$ ,  $\bar{G}_{2,3}$ ,  $\bar{G}_{3,4}$ ,  $\bar{G}_{4,5}$  を求める為、プラトーン 1 台目の ACC システムを Fig. 17 とする。Fig. 16 のように Fig. 17 で表される ACC システムを直列に繋げたものをプラトーンとする。Fig. 17 は Fig. 10 で示される ACC システムと等価であり、ドライバモデルの出力は  $\mathbf{T} = [T_f \ T_r]^T$  である。また Fig. 17 において

$$K_{dis} = K_{Pdis} + \frac{1}{s} K_{Idis}, \quad (45a)$$

$$K_{vel} = K_{Pvel} + \frac{1}{s} K_{Ivel} \quad (45b)$$

とする。  $\bar{G}_{1,2}$  を最初に求める。 Fig. 17 より

$$V_1 = (H_1\alpha + w_1)P = [H_1\{K_{dis}\varepsilon_i + K_{vel}(v_p - v_1)\} + w_1]P \quad (46)$$

と表せる。また

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{s}(v_p - v_1) - t_{hw}v_p - d_0 \quad (47)$$

と表せる。式(46)に(47)を代入すると車両 1 の速度は

$$V_1 = \frac{1}{\{s(1 + K_{vel}H_1P) + K_{dis}H_1P\}} \cdot [\{K_{dis}(1 - s \cdot t_{hw}) + s \cdot K_{vel}\}H_1PV_p - s \cdot K_{dis}H_1Pd + s \cdot P] \quad (48)$$

と表せる。よって  $G_1$  は

$$G_1 = \frac{H_1P}{\{s(1 + K_{vel}H_1P) + K_{dis}H_1P\}} \cdot \{K_{dis}(1 - s \cdot t_{hw}) + s \cdot K_{vel}\} \quad (49)$$

と求められる。同様に  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ ,  $G_4$ ,  $G_5$  を求めるとそれぞれ

$$G_2 = \frac{H_2P}{\{s(1 + K_{vel}H_2P) + K_{dis}H_2P\}} \cdot \{K_{dis}(1 - s \cdot t_{hw}) + s \cdot K_{vel}\}, \quad (50a)$$

$$G_3 = \frac{H_3P}{\{s(1 + K_{vel}H_3P) + K_{dis}H_3P\}} \cdot \{K_{dis}(1 - s \cdot t_{hw}) + s \cdot K_{vel}\}, \quad (50b)$$

$$G_4 = -\frac{H_4P}{\{s(1 + K_{vel}H_4P) + K_{dis}H_4P\}} \cdot \{K_{dis}(1 - s \cdot t_{hw}) + s \cdot K_{vel}\}, \quad (50c)$$

$$G_5 = -\frac{H_5 P}{\{s(1 + K_{vel}H_5P) + K_{dis}H_5P\}} \cdot \{K_{dis}(1 - s \cdot t_{hw}) + s \cdot K_{vel}\} \quad (50d)$$

となる. よって式(42)(50)より

$$\bar{G}_{1,2} = G_1 \cdot \frac{\{V_1(1 - G_2 - s \cdot t_{hw})\} - s \cdot d_0}{V_1(1 - G_1 - s \cdot t_{hw}) - s \cdot G_1 d_0}, \quad (51a)$$

$$\bar{G}_{2,3} = G_2 \cdot \frac{\{V_2(1 - G_3 - s \cdot t_{hw})\} - s \cdot d_0}{V_2(1 - G_2 - s \cdot t_{hw}) - s \cdot G_2 d_0}, \quad (51b)$$

$$\bar{G}_{3,4} = G_3 \cdot \frac{\{V_3(1 - G_4 - s \cdot t_{hw})\} - s \cdot d_0}{V_3(1 - G_3 - s \cdot t_{hw}) - s \cdot G_3 d_0}, \quad (51c)$$

$$\bar{G}_{4,5} = G_4 \cdot \frac{\{V_4(1 - G_5 - s \cdot t_{hw})\} - s \cdot d_0}{V_4(1 - G_4 - s \cdot t_{hw}) - s \cdot G_4 d_0} \quad (51d)$$

となるので

$$\|\bar{G}_{1,2}\|_{\infty} \leq 1,$$

$$\|\bar{G}_{2,3}\|_{\infty} \leq 1,$$

$$\|\bar{G}_{3,4}\|_{\infty} \leq 1,$$

$$\|\bar{G}_{4,5}\|_{\infty} \leq 1$$

を満たすとき, 提案するプラトーンは String stability を満たしている.

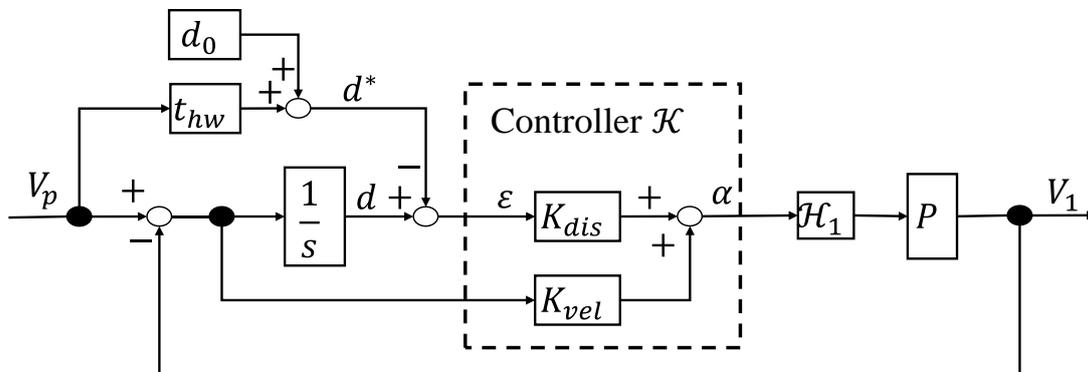


Fig. 17 プラトーン1台目のACCシステム

## 第5章 数値実験

### 5.1 ACC 車両 1 台のシミュレーション

#### 5.1.1 ピッチングを用いた車両のシミュレーション結果

3.3.2 節で述べたピッチングを用いたドライバモデルを用いた HITLS において MathWorks 社製数値計算ソフト MATLAB を使用して数値実験を行った。また各ドライバの重みの目的関数の重みをそれぞれ  $c_1$ ,  $c_2$  とし、ドライバ 1 の運転する車両を Vehicle 1, ドライバ 2 の運転する車両を Vehicle 2 とする。数値実験で用いたパラメータは Table 3 に示す。

初めに提案手法のロバスト安定性について検証する。  $\|\Delta_1\|_\infty = 1.0001$ ,  $\|\Delta_2\|_\infty = 1.0016$ ,  $\|M\|_\infty = 6.9159 \times 10^{-5}$  となり、ボード線図は Fig. 18 のようになった。また  $M$  の伝達関数の極の実部は全て負になった。したがって提案手法による ACC システムはロバスト安定条件を満たす為、ロバスト安定である。その為ドライバ個性が現れるのか確認する必要がある。

Fig. 19 はそれぞれのピッチング、駆動トルク配分、車速、車間距離の結果である。Fig. 19(a) よりピッチングの過渡状態において、ドライバ個性が表れていることが分かる。この過渡状態の違いはドライバモデルのフィードフォワード項に現れるドライバ個性によるものである。また Fig. 19(b) より Vehicle 1 と Vehicle 2 では駆動トルク配分量が異なることが分かる。Fig. 19(c), Fig. 19(d) より車速、車間距離共に目標値に収束していることが分かる。従って ACC は機能しており、運転は安全であると考えられる。また Fig. 19 よりドライバの重み関数  $c$  が大きいほどピッチングが大きくなることが分かる。

以上の結果よりドライバモデルのフィードフォワード項が ACC システムの過渡特性にドライバ個性として影響を与えつつも、フィードバックループがロバスト安定ならば安全性と個性の両立が達成されることが明らかになった。

Table 3 5.1.1 節におけるシンボルの値

シンボル	値	単位
$m$	1640	kg
$L_f$	1.288	m
$L_r$	1.512	m
$L$	2.8	m
$I_f$	1050.9	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$I_r$	1050.9	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$h$	0.8	m
$S$	2.13	$\text{m}^2$
$C_D$	0.28	
$R_f$	0.3186	m
$R_r$	0.3186	m
$g$	9.81	$\text{m}/\text{s}^2$
$\rho$	1.293	$\text{kg}/\text{m}^3$
$K_{Pdis}$	9.0750	
$K_{Idis}$	0.25820	
$K_{Pvel}$	158.45	
$K_{Ivel}$	$5.2651 \times 10^{-8}$	
$c_1$	5	
$c_2$	1	

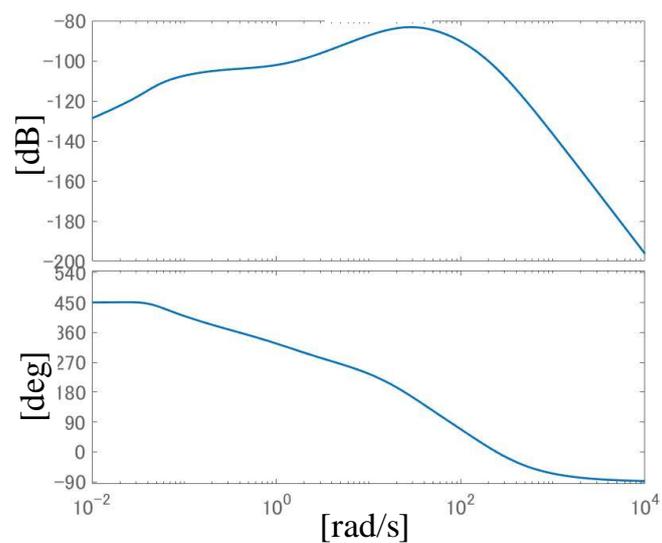


Fig. 18 提案した目的関数を用いた ACC システムのボード線図

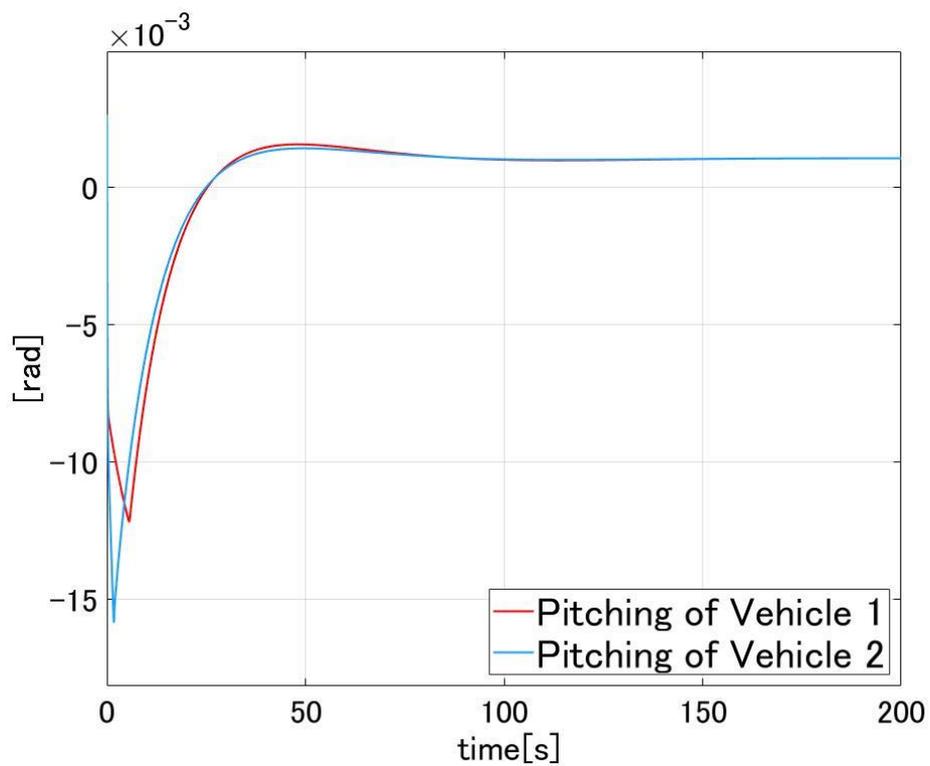


Fig. 19(a) 提案した目的関数を用いた ACC システムのピッチング

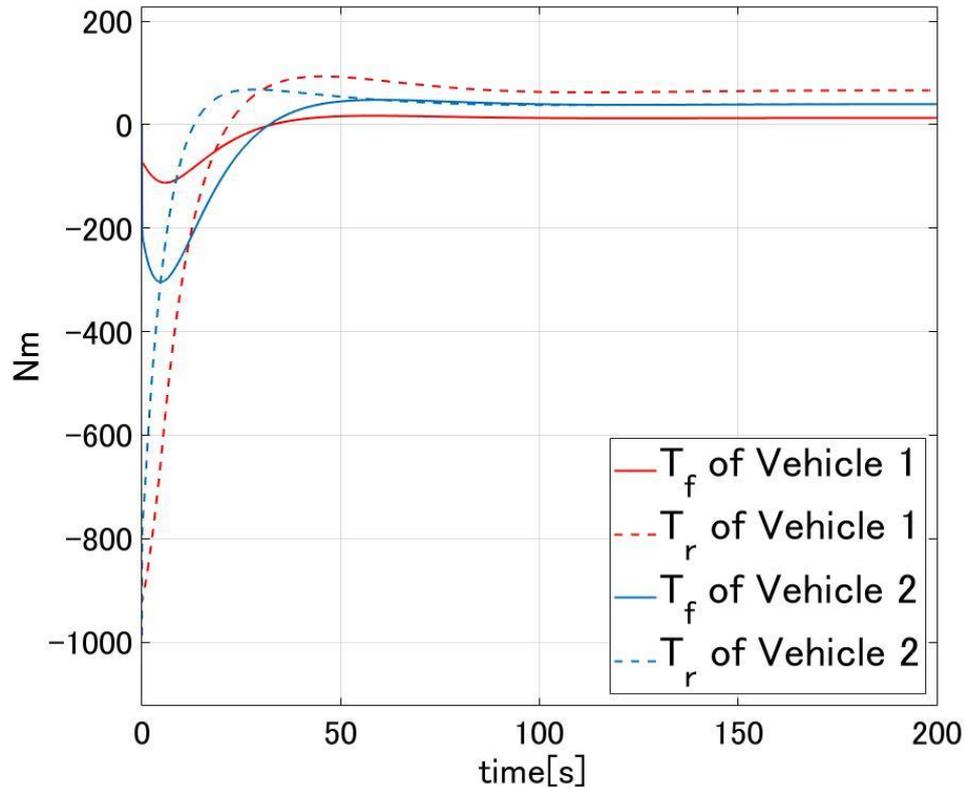


Fig. 19(b) 提案した目的関数を用いた ACC システムの駆動トルク配分

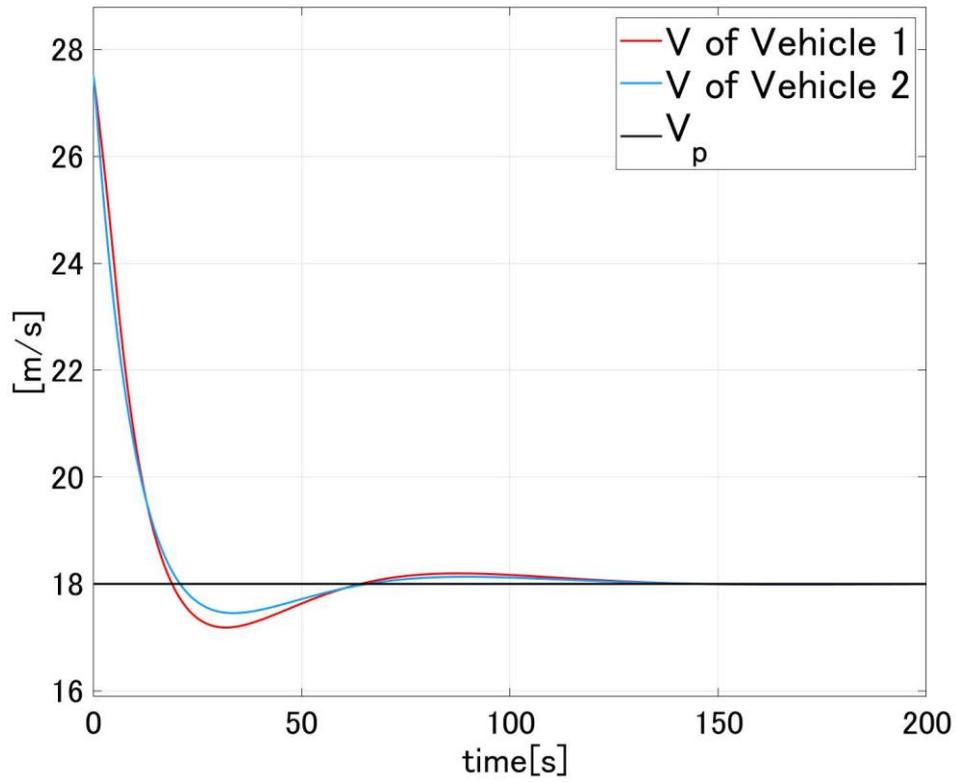


Fig. 19(c) 提案した目的関数を用いた ACC システムの車速

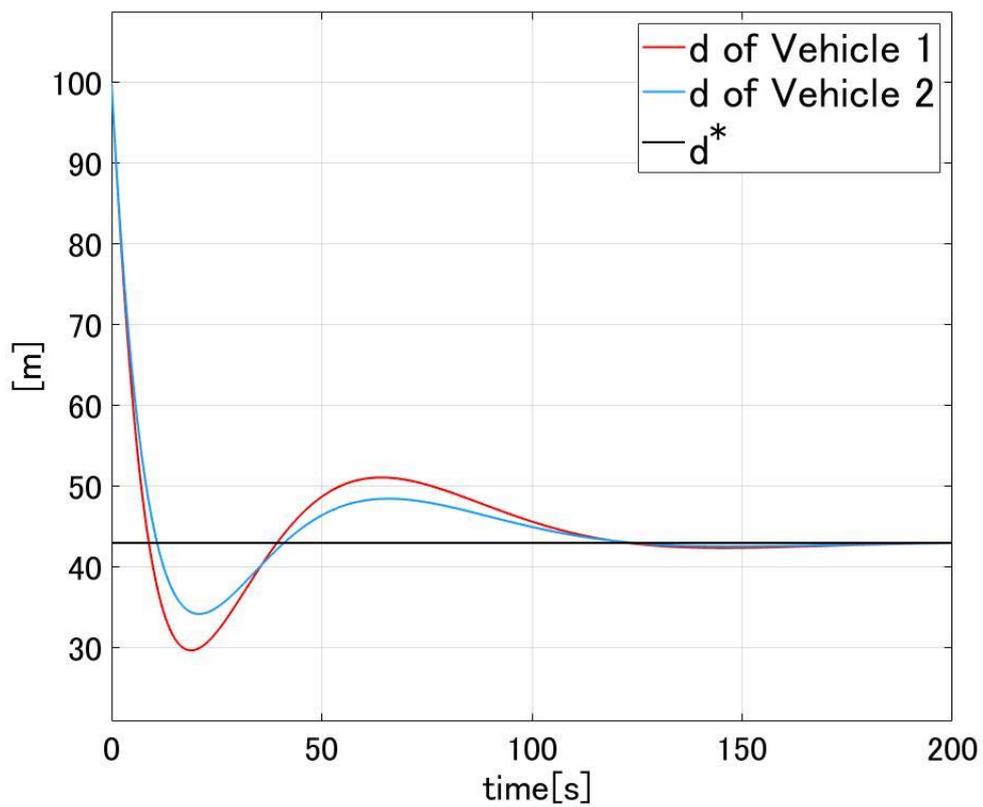


Fig. 19(d) 提案した目的関数を用いた ACC システムの車間距離

### 5.1.2 既存研究の手法を用いたモデルのシミュレーション結果

3.3.4 節で述べたドライバモデルを用いた HITLS において MatWorks 社製数値計算ソフト MATLAB を使用して数値実験を行った。また各ドライバの重みの目的関数の重みをそれぞれ  $(a_{1f}, b_{1f}, a_{1r}, b_{1r})$ ,  $(a_{2f}, b_{2f}, a_{2r}, b_{2r})$  とし、ドライバ 1 の運転する車両を Vehicle 1, ドライバ 2 の運転する車両を Vehicle 2 とする。Fig. 20 に結果を示す。数値実験で用いたパラメータは Table 4 に示す。ここに記載されていないパラメータは全て Table.1 と同一である。

ドライバ 1, ドライバ 2 を含む ACC システムの極の実部はすべて負であり、システムが内部安定であることを確認した。Fig. 20 はそれぞれのピッチング、駆動トルク配分、車速、車間距離の結果である。Fig. 20(a)よりピッチングの過渡状態において、ドライバ個性が表れていることが分かる。その結果 Fig. 20(b)より Vehicle 1 と Vehicle 2 では駆動トルク配分量が異なることが分かる。Fig. 20(c), Fig. 20(d)より車速、車間距離共に目標値に収束していることが分かる。従って ACC 機能及び運転は安全であると考えられる。また一方で提案したドライバモデルを用いた時と異なり、配分されたトルクが負に収束してしまっている。実際の車両制御において駆動トルクが負に収束している状況は無い。その為このドライバモデルは駆動トルク配分において現実的ではない。

Table 4 5.1.2 節におけるシンボルの値

シンボル	値	単位
$a_{1f}$	300	-
$b_{1f}$	50	-
$a_{1r}$	10	-
$b_{1r}$	100	-
$a_{2f}$	10	-
$b_{2f}$	500	-
$a_{2r}$	500	-
$b_{2r}$	100	-

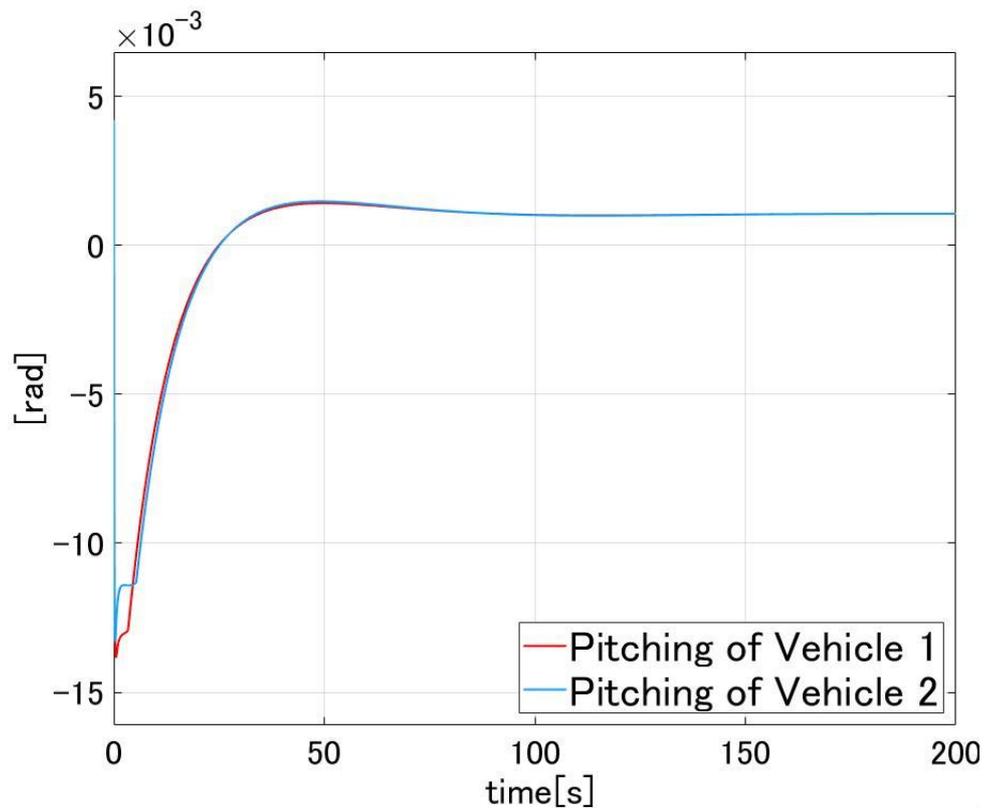


Fig. 20(a) 既存の目的関数を用いた ACC システムのピッチング

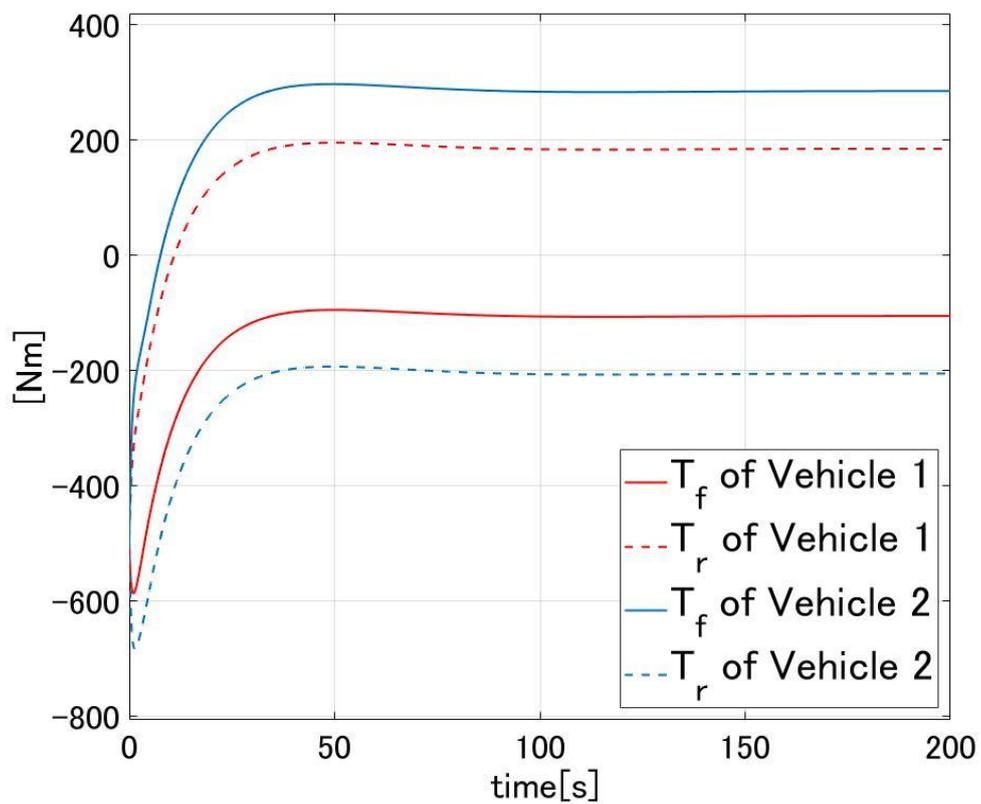


Fig. 20(b) 既存の目的関数を用いた ACC システムの駆動トルク配分

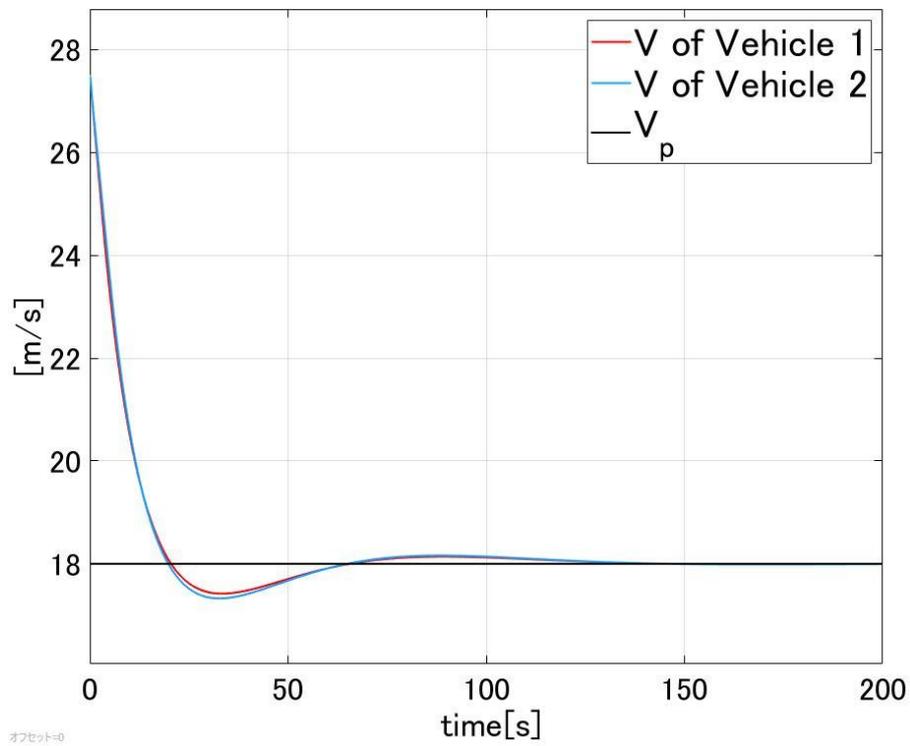


Fig. 20(c) 既存の目的関数を用いた ACC システムの車速

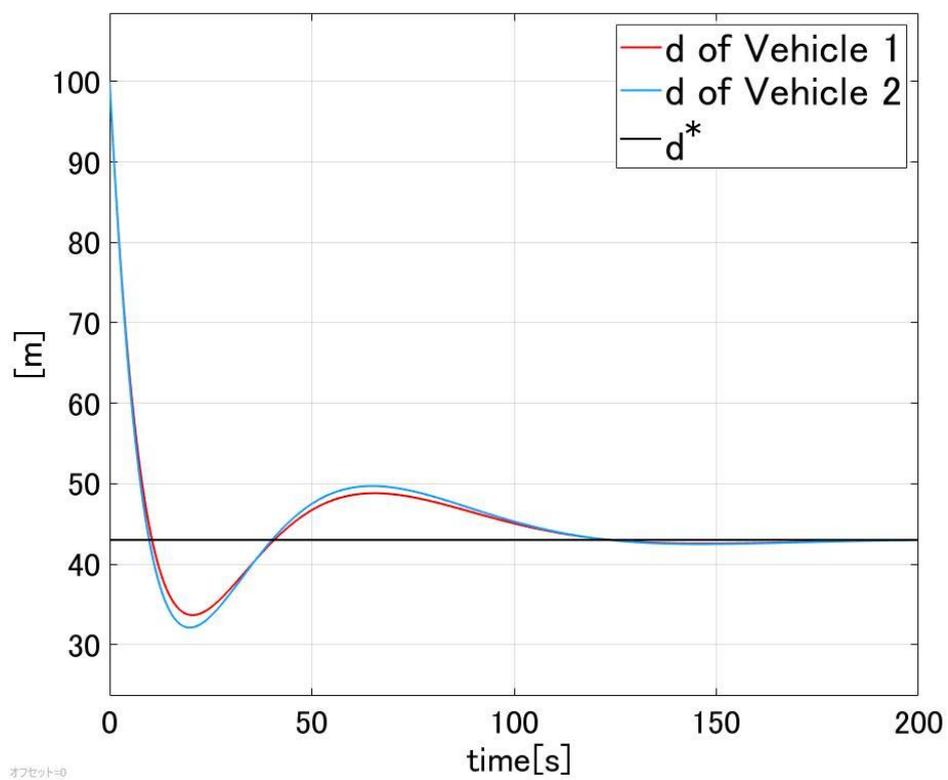


Fig. 20(d) 既存の目的関数を用いた ACC システムの車間距離

## 5.2 プラトウーン走行

### 5.2.1 String stability が満たされないプラトウーン走行

3.3.2 節で述べたドライバモデルを用いた HITLS において MatWorks 社製数値計算ソフト MATLAB を使用して数値実験を行った。また各ドライバの重みの目的関数の重みをそれぞれ  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$  とし、ドライバ 1 の運転する車両を Vehicle 1, ドライバ 2 の運転する車両を Vehicle 2, ドライバ 3 の運転する車両を Vehicle 3, ドライバ 4 の運転する車両を Vehicle 4, ドライバ 5 の運転する車両を Vehicle 5 とする。Fig. 21 に結果を示す。数値実験で用いたパラメータは Table 5 に示す。ここに記載されていないパラメータは全て Table 3 と同一である。

提案手法の String stability の有無を確認する。第 4.2 節で述べた  $\|\bar{G}_{1,2}\|_\infty, \|\bar{G}_{2,3}\|_\infty, \|\bar{G}_{3,4}\|_\infty, \|\bar{G}_{4,5}\|_\infty$  はそれぞれ 10.4064, 10.3719, 4.0195, 4.5052 となった。よって後輪駆動の車両がプラトウーンに多いと、String Stability を満たさないことが明らかである。

また Fig. 21 において先頭車両は 150 秒前後で一度減速している。車速及び車間距離が目標値に追従している一方で、4 台目と 5 台目の車間距離が 0[m] に非常に近くなる瞬間がある。よって危ない運転になっていることが明らかである。このような運転が事故や渋滞に繋がる。

Table 5 5.2.1 節におけるパラメータ

シンボル	値	単位
$c_1$	10	-
$c_2$	10	-
$c_3$	10	-
$c_4$	5	-
$c_5$	1	-

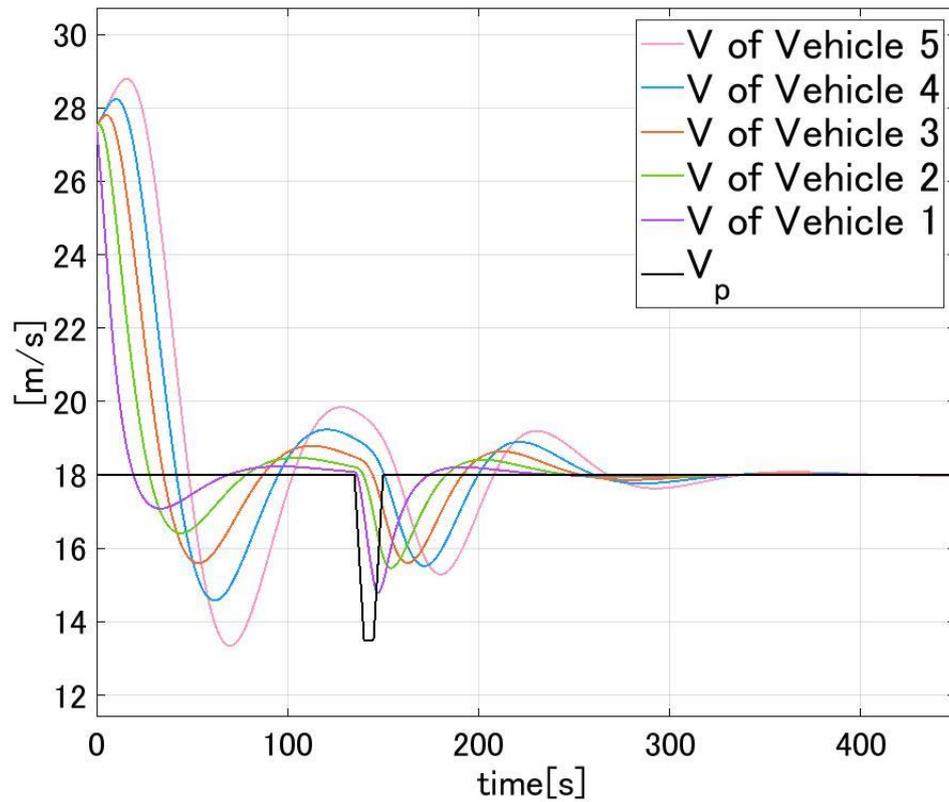


Fig. 21(a) String stability を満たされないプラトーンにおける各車両の車速

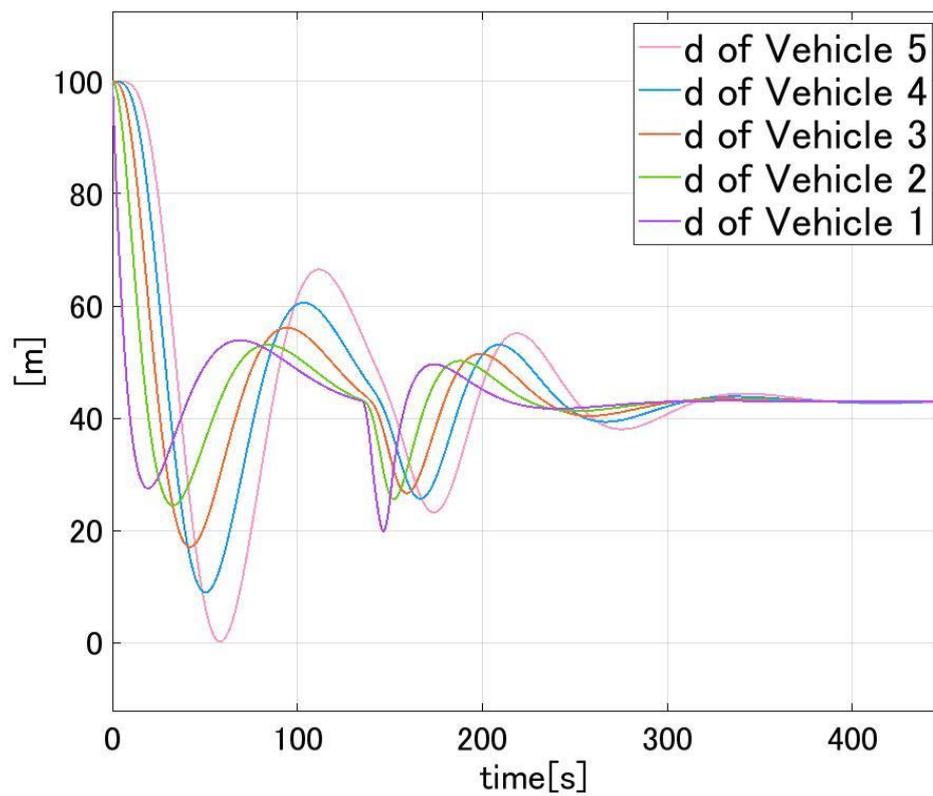


Fig. 21(b) String stability を満たされないプラトーンにおける各車両の車間距離

### 5.2.2 String stability が満たされるプラトーン走行

3.3.2 節で述べたドライバモデルを用いた HITLS において MatWorks 社製数値計算ソフト MATLAB を使用して数値実験を行った。また各ドライバの重みの目的関数の重みをそれぞれ  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$  とし、ドライバ 1 の運転する車両を Vehicle 1, ドライバ 2 の運転する車両を Vehicle 2, ドライバ 3 の運転する車両を Vehicle 3, ドライバ 4 の運転する車両を Vehicle 4, ドライバ 5 の運転する車両を Vehicle 5 とする。Fig. 22 に結果を示す。数値実験で用いたパラメータは Table 6 に示す。ここに記載されていないパラメータは全て Table 3 と同一である。

提案手法の String stability の有無を確認する。第 4.2 節で述べた  $\|\bar{G}_{1,2}\|_\infty, \|\bar{G}_{2,3}\|_\infty, \|\bar{G}_{3,4}\|_\infty, \|\bar{G}_{4,5}\|_\infty$  はそれぞれ 0.41035, 0.85470, 0.85472, 0.85472 となった。よって前輪駆動の車両がプラトーンに多いと、String Stability を満たされることが明らかである。

Fig. 22 において Fig. 21 と同様に先頭車両は 150 秒前後で一度減速している。車速及び車間距離が目標値に追従している。また各車両の車間距離は最も小さくても 2[m] 程度あり、安全な走行になっている。従ってプラトーンにおいて ACC 機能は安全に機能していると考えられる。

5.2.1 節と本節のシミュレーション結果より完全自動運転の時と同様に String Stability を満たす範囲内であれば、ドライバが ACC を気にせずに操作介入を行っても ACC 機能が達成される、つまり個性と安全性が両立することがわかる。

Table 6 5.2.2 節におけるパラメータ

シンボル	値	単位
$c_1$	1	-
$c_2$	0.1	-
$c_3$	0.1	-
$c_4$	0.1	-
$c_5$	0.1	-

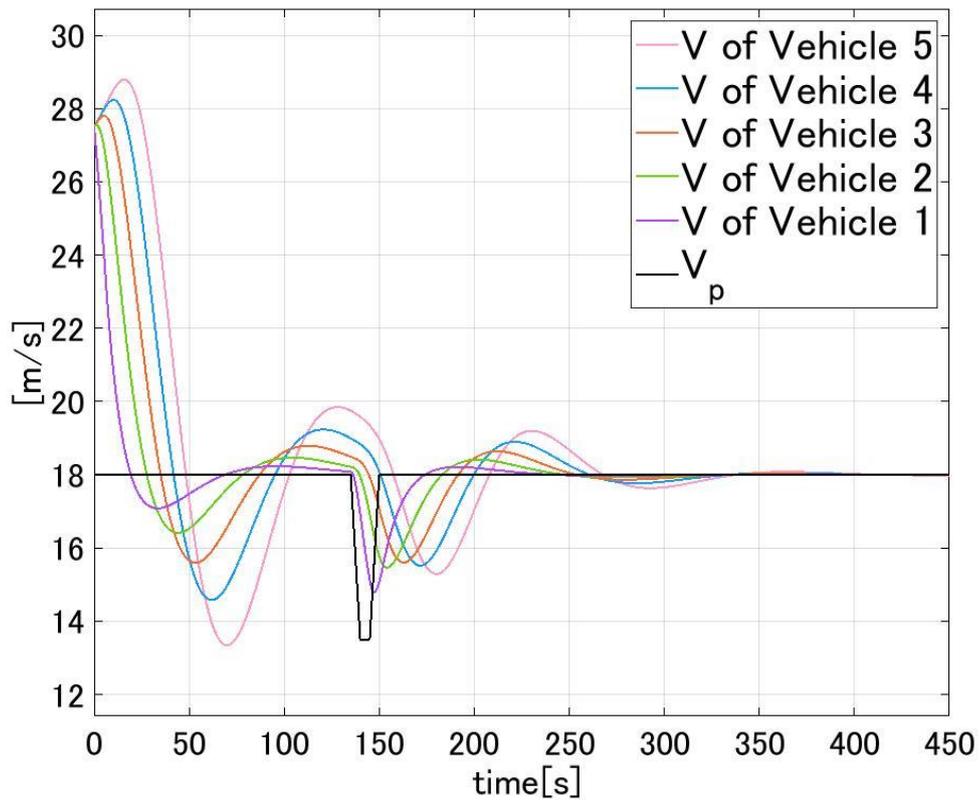


Fig. 22(a) String stability を満たすプラトーンにおける各車両の車速

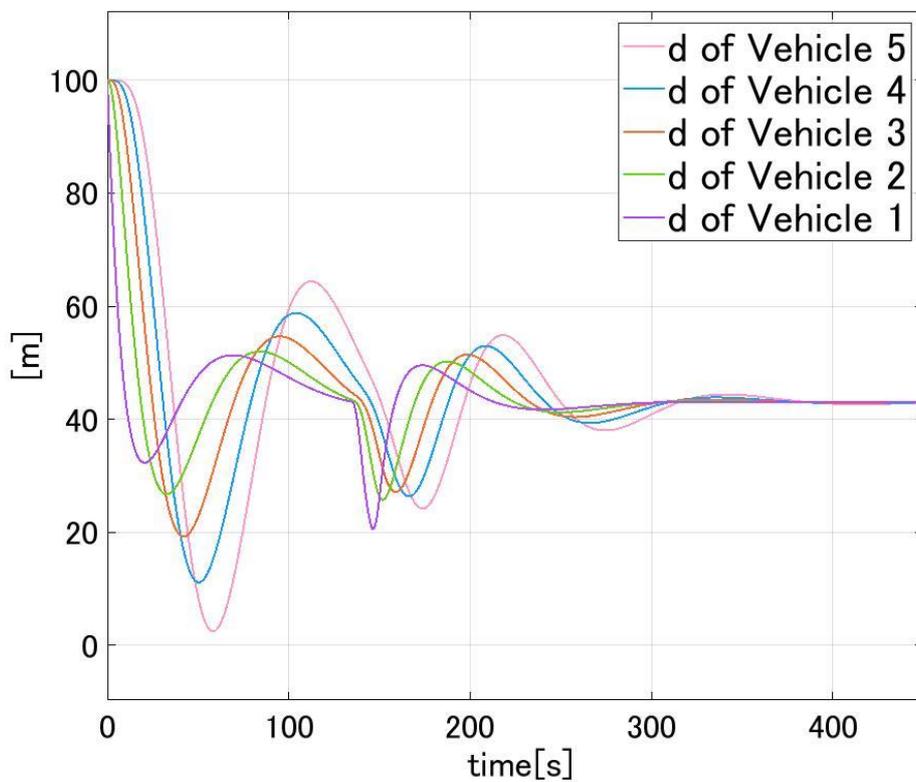


Fig. 22(b) String stability を満たすプラトーンにおける各車両の車間距離

## 第6章 結論

### 6.1 まとめ

既存の ACC の多くはドライバの操作にシステムが介入する人間機械協調型の制御であるが、本研究ではドライバの嗜好を車両制御に反映させることに着目した。本論文ではピッチングに現れるドライバ個性を反映した ACC 及びそれを用いた車両 5 台から構成されるプラトーンを提案した。

本論文ではまず個性を反映した ACC を作成した。ACC では制御対象をタイヤも含めた車両直進モデルとし、駆動トルク配分にドライバ個性を出す為ピッチングに関する評価関数を使用したドライバモデルを設計した。そして提案した ACC は数値実験にてドライバ個性を反映した駆動力配分を行った上で目標値に収束しており、ドライバ個性と安全性が両立していることが明らかとなった。また ACC システムにおけるドライバ個性は ACC システムに対する不確かさと外乱として現れる。その為 ACC システム単体においてドライバ個性が安全に反映できているかの評価方法としてスモールゲイン定理の意味でのロバスト安定性が使用できることを提案した。

本論文の最後に提案した ACC 搭載車両 5 台からなる個性を反映したプラトーン走行に取り組んだ。数値実験では ACC システム 5 台からなるプラトーンにおいて先頭車両が急ブレーキをかけた際、ドライバ個性により安全な車間距離を保てる場合と保てない場合を検証した。結果として、完全自動運転の時と同様に String Stability を満たす範囲内であれば、ドライバ個性と安全性が両立することがわかった。よってプラトーンにおけるドライバ個性が安全に反映できているかの評価方法として String stability を使用できることが明らかになった。

### 6.2 今後の課題

本論文の課題として前輪後輪それぞれの駆動トルクを変数とする 2 変数を用いた目的関数の作成があげられる。本論文では後輪駆動トルクを前輪駆動トルクによって表した為、1 変数の目的関数となっている。ピッチングにドライバ個性が現れると考え目的関数を作成したが、ピッチング以外にもドライバの制御出力はある。ピッチング以外のドライバ個性を考える際 2 変数で表すことができればより多くの目的関数を考えることができる。と考える。

## 謝辞

研究室に配属されてから 3 年間根気強く熱心に指導して下さった主任指導教員澤田賢治准教授に深く感謝申し上げます。先生のご指導を上手く受け止められず頓珍漢な方向に研究や論文を進めようとした私を見放さずに来て下さったおかげで、ここまで研究を進めることができました。ここに感謝申し上げます。

秘書の長田様にも感謝申し上げます。学会参加や TA の申請書など様々な面でお世話になりました。ありがとうございました。

D の先輩方にも感謝申し上げます。藤田様にはセキュリティ班の後輩でないにもかかわらず、制御に関する基本的な質問を何度もさせていただきました。嫌な顔一つせずに答えて下さり、ありがとうございました。佐藤様には特に中間報告書の時に大変お世話になりました。佐藤様のおかげで中間報告書を書きあげることができました。ありがとうございました。

阪田様には残った唯一の同期として研究生活において大変お世話になりました。ありがとうございました。研究は全く関係ないにもかかわらず、考えを整理するのに付き合ってくださったのは大変助かりました。また同期であるという甘えから所々粗雑な対応を取ってしまったことをここに謝罪いたします。

堀内さん、藤本君を始めとする研究室のメンバーにも大変お世話になりました。堀内さんと藤本君には自分の研究に精一杯で十分に卒論の添削等ができなかったことをお詫びいたします。研究室の皆様に感謝いたします。本当にありがとうございました。

## 参考文献

- [1] 経済産業省製造産業局自動車課：自動車を取り巻く現状と電動化の推進について，  
<https://www.esisyab.iis.u-tokyo.ac.jp/symposium/20200804/20200804-01.pdf>
- [2] 綱島均，中代重幸，吉田秀久，丸茂喜高：クルマとヒコークで学ぶ制御工学の基礎，コロナ社，pp. 129-137 (2011)
- [3] Linlin Zhang, Feng Chen, Xiaoxiang Ma, and Xiaodong Pan: Fuel Economy in Truck Platooning: A Literature Overview and Directions for Future Research, *Journal of Advances Transportation*, Vol. 2020, Article ID 604012 (2020)
- [4] A. Nguyen, J. Rath, T. Guerra, R. Palhares, H. Zhang : Robust Set-Invariance Based Fuzzy Output Tracking Control for Vehicle Autonomous Driving Under Uncertain Lateral Forces and Steering Constraints, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation systems*, Vol. 22, No.9, pp.5849-5860 (2021)
- [5] 倉持拓明，内海章，池田徹志，加藤弓子，長澤勇，高橋和彦：高度自動運転における力覚フィードバックを用いた操舵の共有に関する快適性の評価，*SJ Interaction 2019*，2B-48，pp. 648-653 (2019)
- [6] 吉本 達也，深尾 隆則：ドライバ特性を考慮したアダプティブクルーズコントロール，*日本機械学会論文集*，Vol.84，No. 868 (2018)
- [7] 西脇和弘，家澤雅宏，高橋正樹：車間距離と車両加速度のトレードオフを考慮したアダプティブクルーズコントロール，*日本機械学会論文集*，Vol. 87，No. 900 (2021)
- [8] H. Li, C. Wu, D. Chu, L.Lu, K. Cheng : Combined Trajectory Planning and Tracking for Autonomous Vehicle Considering Driving Styles, *journal of IEEE Access*, Vol. 9, pp. 9453-9463 (2021)
- [9] M. Inoue, V. Gupta : “Weak” Control for Human-in-the-Loop Systems”, *IEEE CONTROL SYSTEMS LETTERS*, 3, No.2, pp. 440-445 (2019)
- [10] S. Music, S. Hirche : Control sharing in human-robot team interaction, *Annual Reviews Control*, Vol. 44, pp. 342-354 (2017)
- [11] David Costa, Flavia Pires, Nelson Rodrigues, Jose Barbosa, Getulio Igrejas, Paulo Leitao : Empowering Humans in a Cyber-Physical Production System : Human-in-the-loop Perspective, *IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems*, pp. 139-144
- [12] Chi-Ying Liang, Hwei Peng : String Stability Analysis of Adaptive Cruise Controlled Vehicles, *JSME International Journal, Series C*, Vol. 43, No. 3, pp. 671-677 (2000)
- [13] Syunya Yamashita, Takeshi Hatanaka, Jyunya Yamauchi, Masayuki Fujita : Passivity-based generalization of primal-dual dynamics for non-strictly convex cost functions, *Automatica* 112, pp1-11 (2020)

- [14] 吉田圭佑, 井上正樹, 畑中健志: 需要家の嗜好を取り入れた地域エネルギー管理—最適化をループに含んだ制御系の解析と設計—, システム制御情報学会論文誌, Vol. 32, No. 7, pp. 275-283 (2019)
- [15] 社団法人自動車技術会: 自動車技術ハンドブック<第 10 分冊>設計 (EV・ハイブリッド) 編, pp. 304-305 (2011)
- [16] 田村健太, 澤田賢治, 新誠一: 自動車の前後制動力配分のシミュレーションモデルベース最適化, システム制御情報学会論文誌, pp. 197-208 (2017)
- [17] M. Yoshimura, H. Fujimoto : Driving Torque Control Method for Electric Vehicle with In-Wheel Motors, 電気学会論文誌, Vol. 181, No. 3, pp. 721-728 (2012)
- [18] 大川進, 本田昭: よくわかる図解とシミュレーションで学ぶ自動車のモーションコントロールの技術入門, 山海堂, pp. 88-89 (2006)
- [19] 井村順一: システム制御のための安定論, コロナ社, pp175 (2007)