

非線形最適制御理論の AT制御への適用の実際

MBD姫路コンファレンス
2015/4/3 三菱電機姫路製作所

アイシン・エイ・ダブリュ 株式会社
技術本部 第1制御技術部
梅村 哲央

1. 背景と目的
2. 制御系設計
3. 制御実装における注意点
4. 実機試験
5. まとめ

0. 弊社紹介

アイシン・エイ・ダブリュ株式会社 会社概要



設立	1969年5月15日
資本金	264億8千万円
出資比率	アイシン精機(株) 53.8% トヨタ自動車(株) 42.0% その他 4.2%
従業員数	14,369名 (2014年3月時点 単独)

AT/CVT/HV

NAVI

【2013年度の事業概要】

販売台数	駆動系 : 658万台
	ナビ : 150万台 {ハード:128万台 ソフト:22万台}
売上高	連結:1兆 530億円
	駆動系 : 9,577億円 ナビ : 953億円



0. 弊社紹介

弊社製品紹介：駆動系

FR8速AT LEXUS LS460



4WD Hybrid Transmission LEXUS LS600h



i-REAL (ホイールモータシステム)



※)参考資料:トヨタ自動車 Webサイト

1. 背景と目的
2. 制御系設計
3. 制御実装における注意点
4. 実機試験
5. まとめ

1. 背景と目的

■ 自動変速機 (Automatic Transmission : AT) に求められる性能

運転時の快適性

- 乗り心地
- 加速性能
- ...



相反

低燃費性

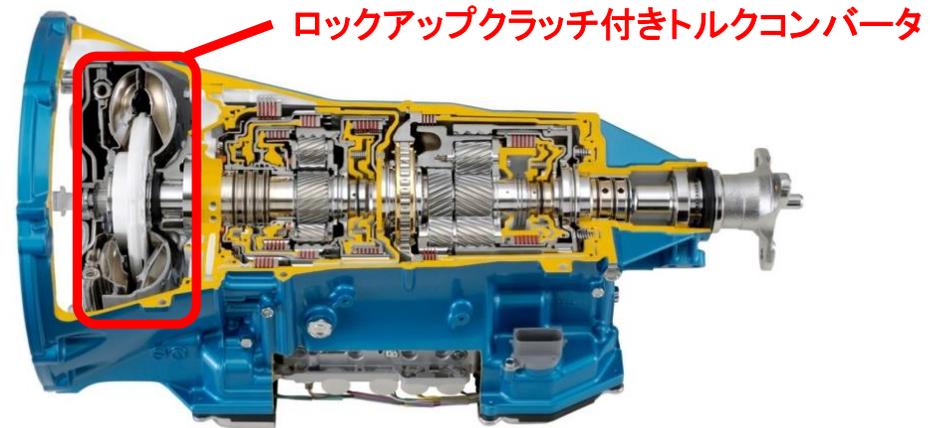
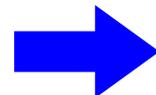


Fig. 自動変速機 (8速)

■ トルクコンバータ (Torque Converter : TC)

- 流体を介してトルクを伝達 (増幅) → **快適性向上**
- トルク損失大 → **燃費悪化**

低燃費性と快適性の両立



制御理論によって実現

1. 背景と目的

■ ロックアップスリップ制御

- 油圧によってロックアップクラッチを操作し, エンジン回転速度とタービン回転速度の差:スリップ回転速度を制御する.
- スリップ回転速度を狙いの値に保つことで低燃費性と快適性の両立が実現される.

■ ロックアップスリップ制御の難しさ

- システムの持つ入出力特性の大幅な変動
 - 温度による流体(オイル)の粘性変化
 - クラッチ部の摩擦特性変化
 - タービン回転速度変化によるトルク伝達特性変化

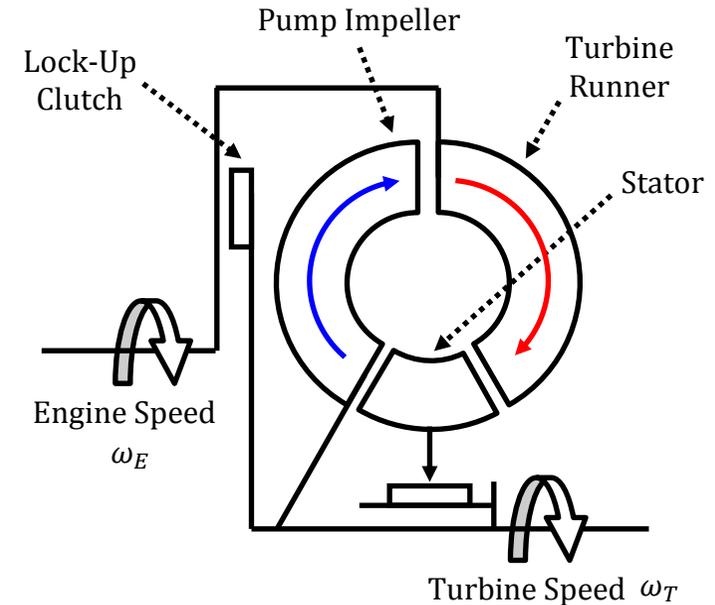


Fig. トルクコンバータ

1. 背景と目的

■ ロックアップスリップ制御

- 油圧によってロックアップクラッチを操作し, エンジン回転速度とタービン回転速度の差:スリップ回転速度を制御する.
- スリップ回転速度を狙いの値に保つことで低燃費性と快適性の両立が実現される.

■ ロックアップスリップ制御の難しさ

- システムの持つ入出力特性の大幅な変動
 - 温度による流体(オイル)の粘性変化
 - クラッチ部の摩擦特性変化
 - タービン回転速度変化によるトルク伝達特性変化

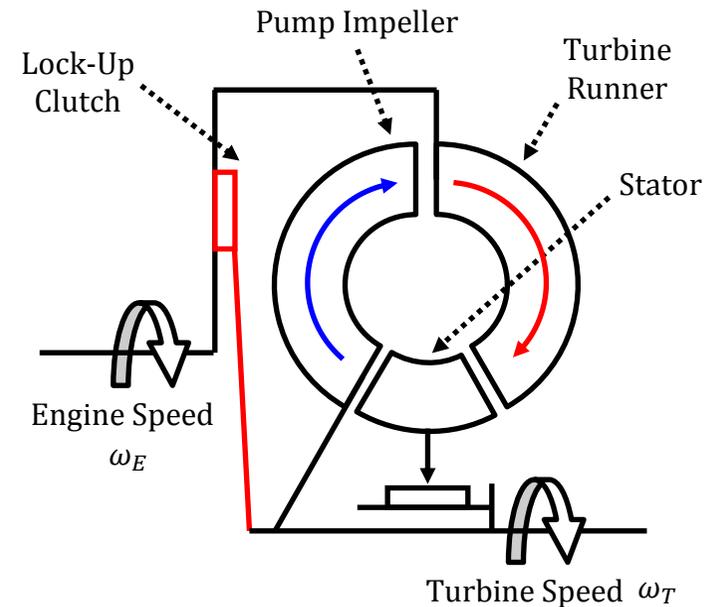


Fig. トルクコンバータ

1. 背景と目的

■ 従来研究とその課題

- システムの特性変動を考慮した H_∞ 制御¹⁾
→ 応答性に難あり
- システムの特性変動を線形パラメータ変動系としたゲインスケジューリング制御²⁾
→ コントローラが複雑になり, 実装が困難

目的の設定

- 大きな特性変動に対して安定性, 応答性を保証すること
- 車載用コンピュータ(ECU)に実装が可能であること

LPV表現されたシステムに対して最適出力レギュレーション問題を適用

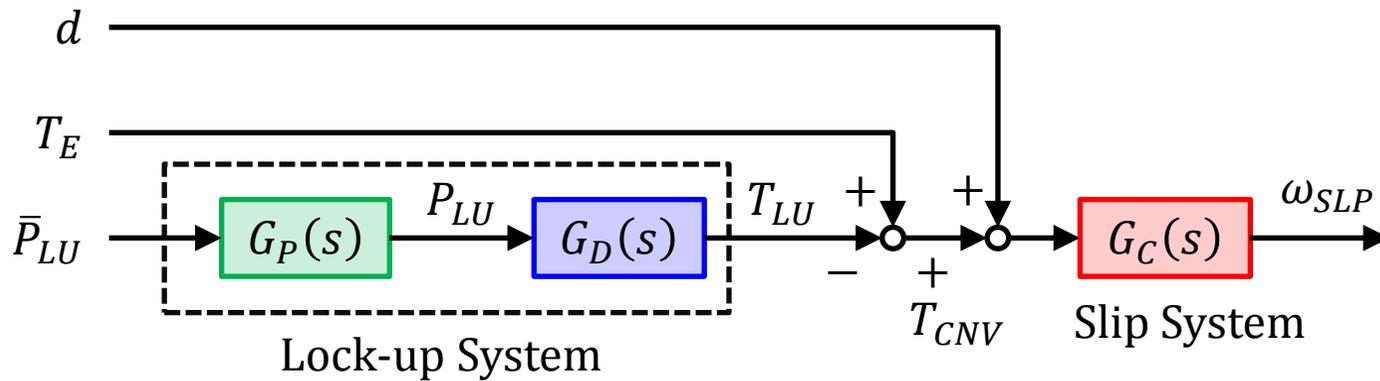
1) 日比野ら: H_∞ 制御理論適用によるトルクコンバータロックアップクラッチ・スリップ制御系のロバスト安定化

2) 平田ら: ゲインスケジュールド H_∞ 制御適用によるロックアップクラッチのスリップ回転速度制御系の性能向上

1. 背景と目的
2. 制御系設計
3. 制御実装における注意点
4. 実機試験
5. まとめ

2. 制御系設計

■ LPV表現によるモデリング



- \bar{P}_{LU} : 油圧指令値
- P_{LU} : 実油圧
- T_{LU} : クラッチトルク容量
- T_E : エンジントルク
- d : 外乱トルク
- T_{CNV} : コンバータトルク
- ω_{SLP} : スリップ回転

Fig. ロックアップスリップシステムのブロック図

遅れ要素:

$$G_P(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

むだ時間要素:

$$G_D(s) = G_{LU} \cdot e^{-Ls}$$

LPVシステム:

$$G_C(s) = \frac{1}{J_E s + C_{LSP}(\omega_T)}$$

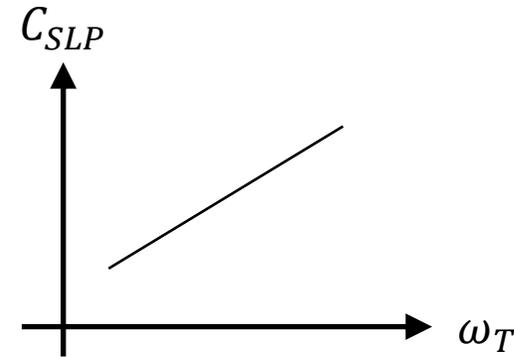


Fig. タービン回転と変動パラメータの相関

← タービン回転に依存する変動パラメータ

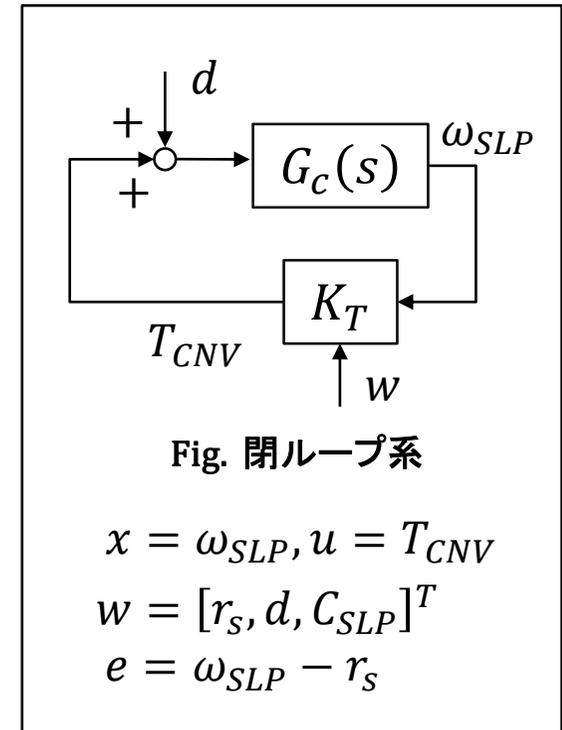
2. 制御系設計

■ 制御系設計: 最適出力レギュレーション問題

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = -\frac{1}{J_E} x C_{SLP} + \frac{1}{J_E} u + d \\ \dot{w} = 0 \\ e = x - r_s \\ J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (e^T e + \dot{e}^T R_J \dot{e}) dt \end{array} \right. \begin{array}{l} \leftarrow \text{状態方程式} \\ \leftarrow \text{外部システム} \\ \leftarrow \text{制御出力} \\ \leftarrow \text{評価関数} \end{array}$$

与えられたシステムに対して評価関数を最小化する最適制御問題

➡ 動的計画法の適用



■ コントローラ: K_T

$$T_{CNV} = -J_E \left(R_J^{-1} P_{ric}(\omega_s - r_s) - \frac{1}{J_E} \omega_s C_{SLP} + d \right)$$

偏差情報 (偏差情報)

変動パラメータ (変動パラメータ)

外乱トルク (外乱トルク)

2. 制御系設計

■ 閉ループ系の構成

- 特徴**
- ・ 複数のフィードバックループ
 - ・ 高次のハイゲインコントローラ
 - ・ 積分器を含むオブザーバ

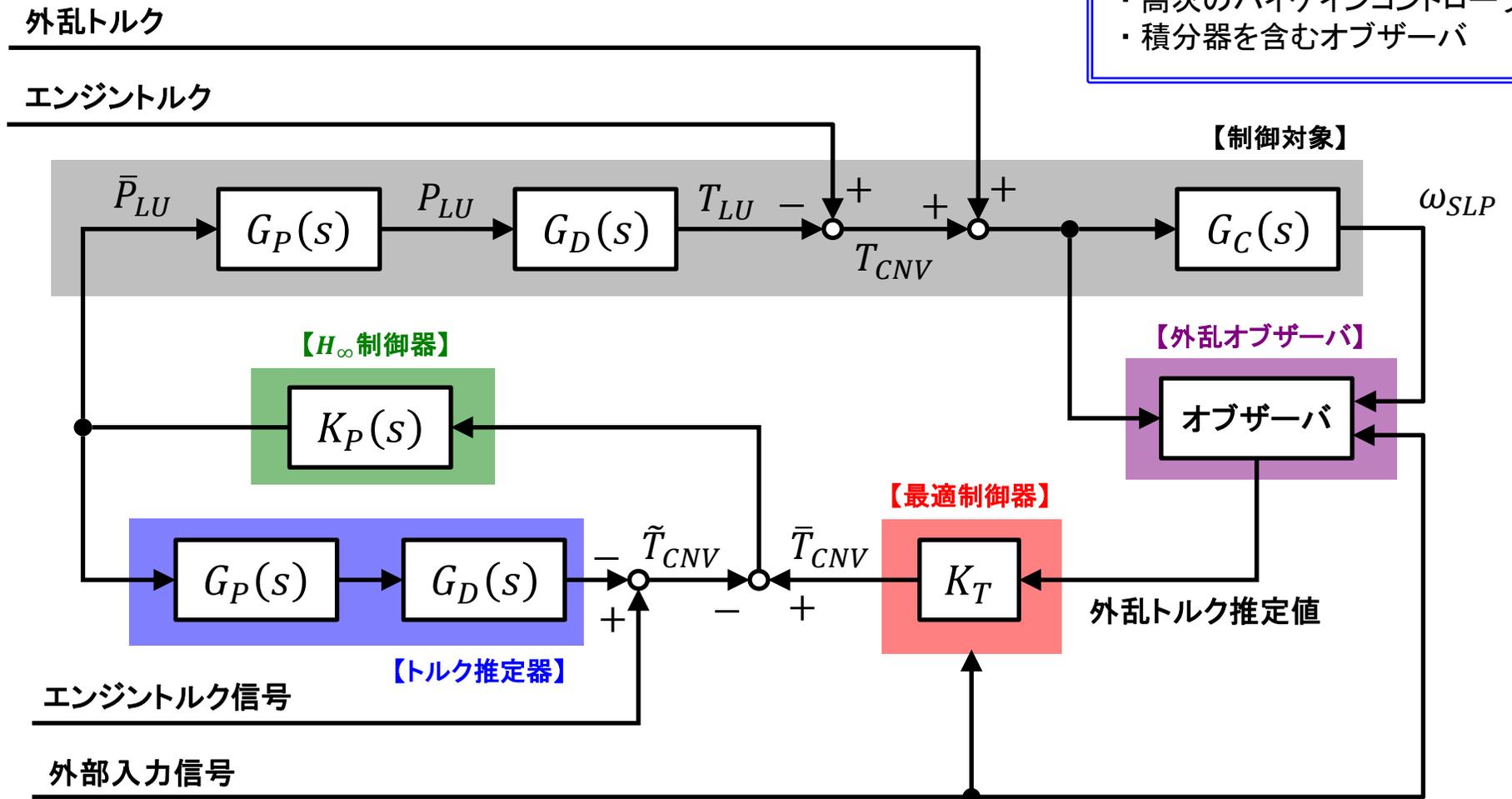


Fig. 閉ループ系構成

1. 背景と目的
2. 制御系設計
3. 制御実装における注意点
4. 実機試験
5. まとめ

3. 制御実装における注意点

■ 机上計算(シミュレーション)との違い

シミュレーションでは主にPCを用いて制御入力が計算されるが、実際は車載用コンピュータ(ECU)にて計算される。

一般的なPCと比較すると、ECUの方が低価格であるが、計算能力、メモリ量、ROM容量など、おおよそ全ての性能において劣っている。

➡ 実装のための様々な制約

- 複雑な演算を行えない。
- 大規模なマップを用いることが出来ない。
- 演算に用いるデータの型(※)，有効桁数
- 計算周期
-



Fig. 車載用コンピュータ(ECU)

(※)倍精度浮動小数点型, 単精度浮動小数点型, 固定小数点型, 整数型など, 使用するECUに応じて設定する必要がある。

3. 制御実装における注意点

■ 制御実装における注意点

• 計算負荷の低減

ECUは性能に比べて計算処理量が多い。

できるだけ計算負荷を減らし、コンピュータの誤作動を防ぐことが重要。

【低次元化】

- コントローラを低次元化させることで計算負荷の増大を抑え、離散化、量子化誤差を減少させる。
- 計算負荷と制御性能のトレードオフに注意する。

例) 8次伝達関数を4次へ低次元化
(誤差ハンケルノルム最小化法)

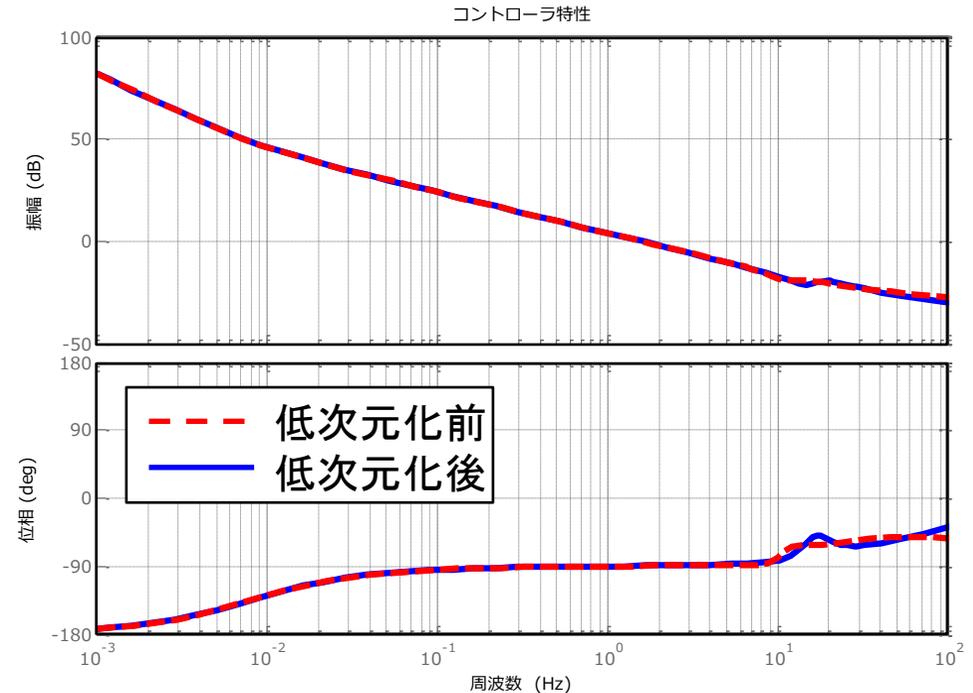


Fig. 低次元化

3. 制御実装における注意点

■ 制御実装における注意点

- 適切な制御周期

H_∞ コントローラ, オブザーバなど微分項や積分項を含むコントローラを実装する場合, 連続系シミュレーションと離散系シミュレーションで結果が異なる.

【離散化】

- ECUの計算負荷, ベースとなるソフトウェアの制御周期, 入出力信号のサンプリング周期等を考慮し, コントローラの適切なサンプリング時間を決定, 離散化を行う.
- 計算負荷と制御性能のトレードオフに注意する.

例) MATLAB【c2d】コマンドを用いる場合...

zoh : ゼロ次ホールド

foh : 三角近似

impulse : インパルス不変法による離散化

tustin : 双一次メソッド

matched : 極-零点マッチング法

3. 制御実装における注意点

■ 制御実装における注意点

• データ型の定義

設計したコントローラをECUへ実装する際にはデータ型の定義が必要。

- double型
 - float型/single型
 - 4byte整数型
 - 2byte整数型
- 計算精度良 / 処理負荷大

↕

計算精度悪 / 処理負荷小

【量子化】

- 制御性能と量子化誤差のトレードオフを図り、応答性が許容できる範囲で制御ゲインを抑える。
- 適切な量子化単位(LSB)の変換を行い、有効桁数を調整する。

例) 適切な量子化がされない場合・・・

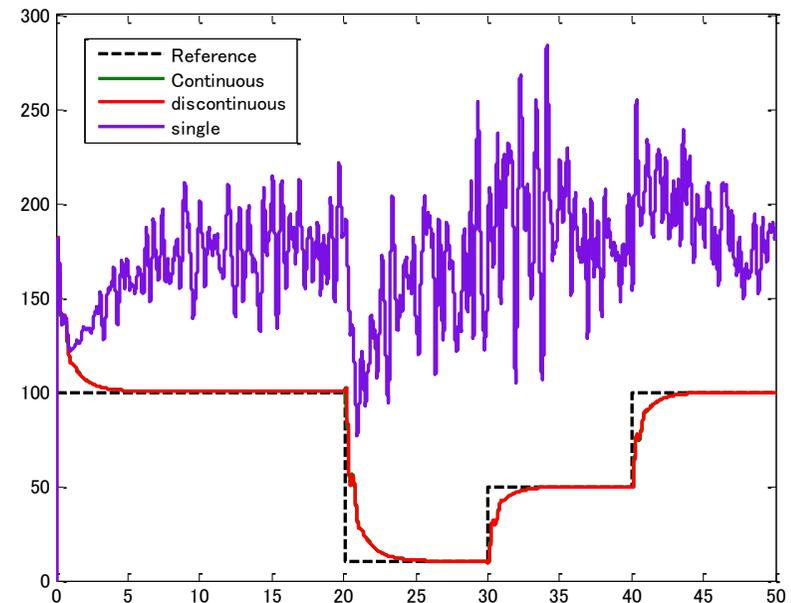


Fig. データの欠損による制御系の不安定化

1. 背景と目的
2. 制御系設計
3. 制御実装における注意点
4. 実機試験
5. まとめ

4. 実機試験

■ 試験環境

- 前輪駆動方式 1600ccクラス車両を使用
- 車載用ECUへコントローラを実装
 - 演算周期 10[ms]
 - 単精度浮動小数点型の演算

■ コントローラ実装のための工夫

- 複数のフィードバックループを持たせて並列演算化し、離散化/量子化誤差を抑える
- 高次ハイゲインコントローラを低次元化
- 全ての演算を同一の型で行うことで、型変換による演算負荷を抑える

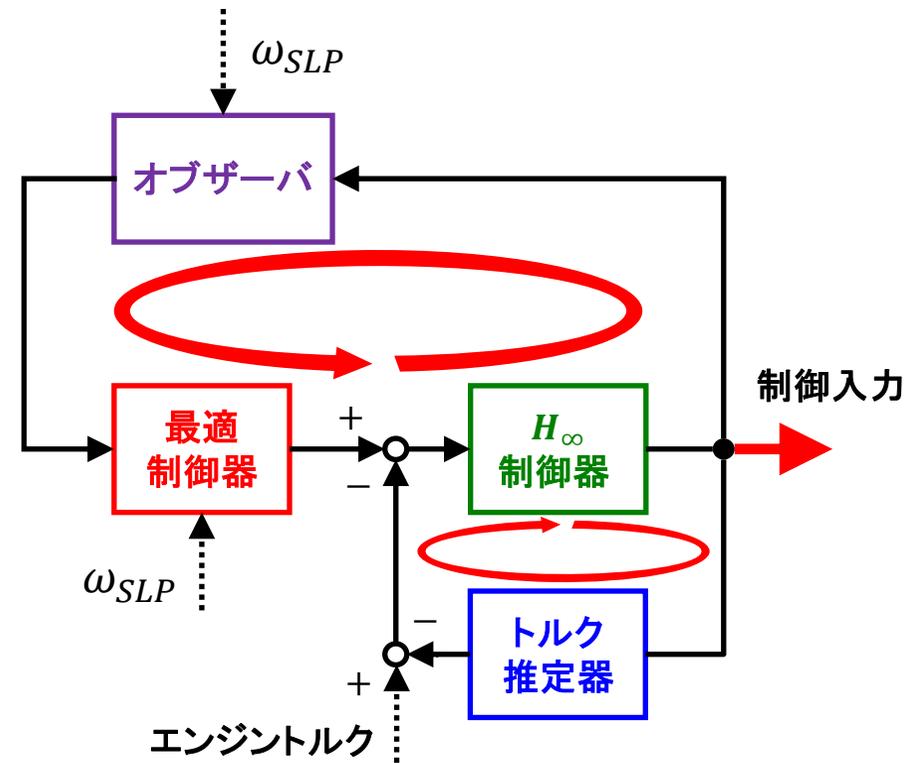


Fig. コントローラ構成

4. 実機試験

■ 実機試験結果

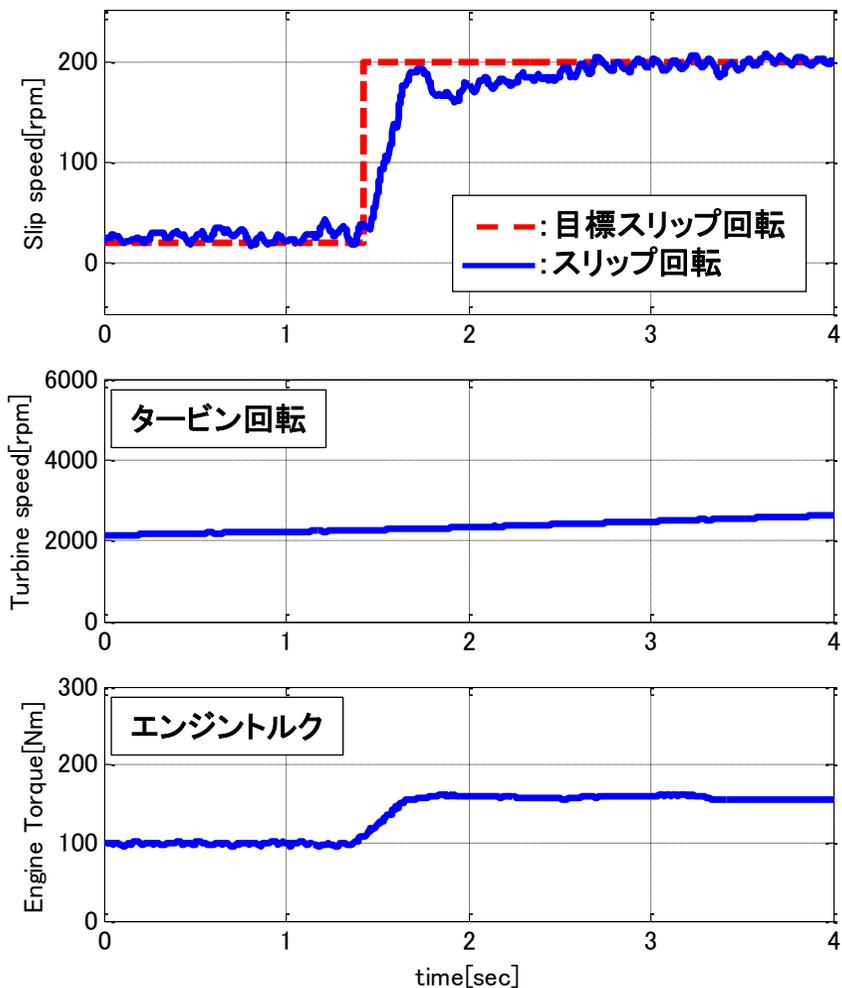


Fig. 中速度走行中の目標回転変化

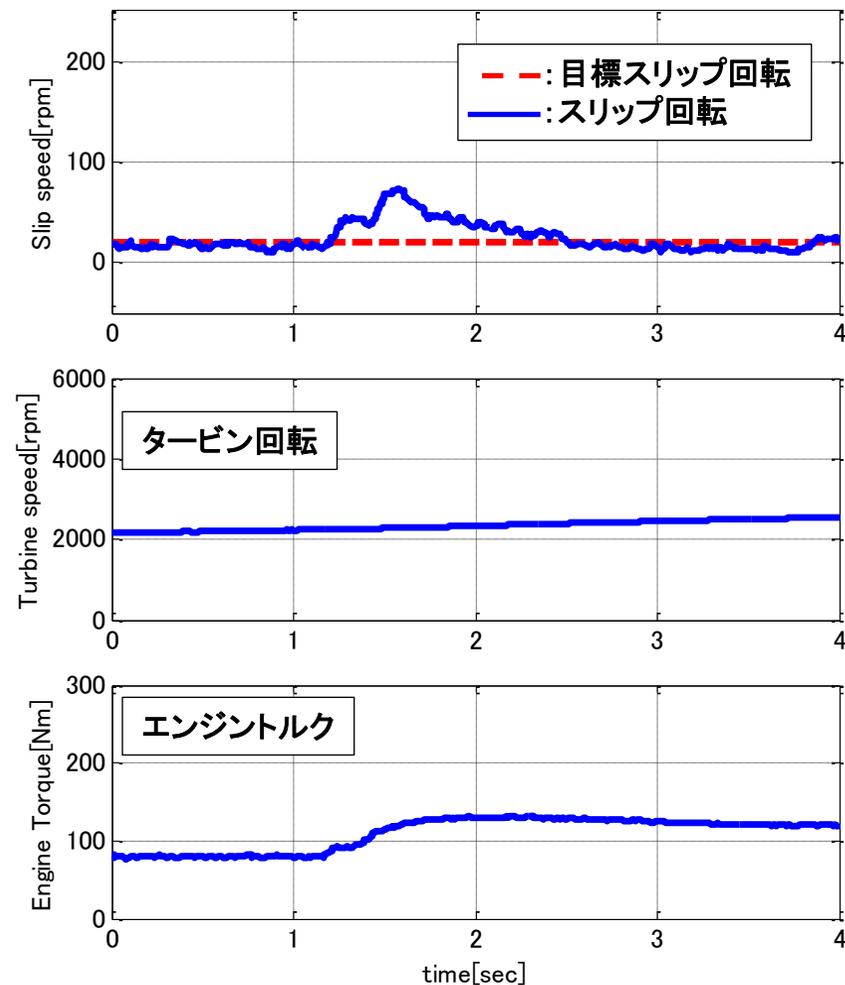


Fig. 中速度走行中のトルク変動

1. 背景と目的
2. 制御系設計
3. 制御実装における注意点
4. 実機試験
5. まとめ

5. まとめ

- 大きな特性変動に対して安定性, 応答性を保証するコントローラ設計
- ECUに実装が可能となるような制御器の構成
 - LPV表現されたシステムに対して最適出力レギュレーション問題の適用
 - 外乱オブザーバ
 - アクチュエータに対する低次の H_∞ コントローラ
 - 簡易なコンバータトルク推定機構
- 実装上の工夫
 - 複数のフィードバックループ
 - 高次ハイゲインコントローラの低次元化
 - 同一型での演算

工夫次第で複雑な制御理論を実装することは可能.
狙いの制御性能を少し下げたほうが実装しやすい印象.