

FWLQIによる4WSアクチュエータの ロバスト制御

Robust Control of 4WS Actuator using FWLQI

藤原 幸広* 浜本 恭司*
Yukihiro FUJIWARA Kyoji HAMAMOTO

要 旨

車両の操縦安定性を向上させるシステムとして4輪操舵システム(4WS)が知られている。また、後輪操舵アクチュエータ機構も様々な方式が提案されている。

本稿では、ステアバイワイヤ方式の後輪操舵アクチュエータに対して後輪舵角の制御要求を明確化し、それを満たす制御設計法の検討を行った。

具体的には、操舵アクチュエータのあらゆる動作環境における要求仕様に最適サーボ制御(LQI制御)を適用し、またその動作環境によって相反する要求仕様に周波数重みによる最適サーボ制御(FWLQI制御)を適用するように制御系を構成することによって、設定した要求性能を達成できた。

ABSTRACT

The four-wheel steering system (4WS) is well known as the system for improving vehicle handling and stability performance. Rear wheel steering in these systems employ a number of different actuator mechanisms.

In this paper, the requirements for the control of rear wheel steering are clearly defined for the steer-by-wire type of actuator, and design method for the controller are studied to meet them.

The optimal servo control (LQI control) is applied to the required specifications for all conditions, and the frequency dependent optimal servo control (FWLQI control) is applied to the required specification that conflict with each other for particular conditions. Through this control system construction, all the required specifications are achieved.

1. まえがき

自動車の操縦安定性を向上させる技術の一つとして前輪を操舵するだけではなく後輪も操舵する4輪操舵(4WS)システムが知られている。また後輪操舵方式も機械的リンク機構を持つ機械式をはじめとし、電子制御油圧式、更にはステアバイワイヤ方式である電子制御電動式も開発され既に量産化されている。^{1) 2)}

特に、ステアバイワイヤ方式のアクチュエータの開発背景としては、構成部品の低減、軽量化、制御自由度および精度の向上、車両搭載性向上などの要求があり、その実現には高い信頼性をもつセンサ、駆動源、機械的伝達機構などのハードウェア開発およびシステム信頼性

の考え方の確立が必要であった。

しかしながらこれまでの4WSアクチュエータの開発においては、ハードウェア開発に重点がおかれ、制御設計の見地から見た操舵アクチュエータの要求仕様があまり明確ではなかった。特に、アクチュエータの応答性に関して言えば、その制御帯域が狭いと、明らかに車両の過渡特性改善における4WSのメリットが減少する。

これに対する一例として、直進状態からステップ的なステアリング操作をした時の車両横加速度応答の周波数応答特性が、後輪操舵アクチュエータの応答遅れによってどのような影響をうけるのかを示すためにシミュレー

* 栃木研究所

ションを行った。その結果をFig.1に示す。なお、このシミュレーションにおいて用いた車両は、2.2Lクラスの小型車で、車速は100km/hとしている。

これを見ると、アクチュエータの応答遅れのない理想的な4WSは、2WSに対して横加速度特性における位相遅れが少なく、また周波数が高くなってくるとこの傾向が顕著となる。

一方、後輪操舵アクチュエータの応答遅れを考慮した4WSでは、このアクチュエータの応答帯域（今回のシミュレーションでは、1 Hzに設定している）を超えるあたりから横加速度応答における位相が遅れ始め、2 Hzあたりからは、2WSよりも位相遅れが大きくなるという結果が得られた。

このように、後輪操舵アクチュエータの応答遅れは、4WSシステムの性能、特に横加速度応答特性に大きく影響するといえ、この性能を損なわないようにアクチュエータの応答性を確保しなければならない。

また、商品性の点から要求仕様を考えると、その一つとしてアクチュエータの作動音を所定レベル以下に抑えるという要求がある。しかし、応答性を上げると当然作動音が大きくなることが予想される。

このように4WSアクチュエータの制御系に要求される仕様には相反するものがあり、それぞれの仕様には適値が存在すると言える。

このような背景から我々は、この4WSアクチュエータの制御系に対して要求仕様を整理し、その実現手段として藤崎³⁾らによる二自由度最適サーボ制御の適用を試みた。加えて、制御入力に周波数重みを考慮することで応

答性要求と作動音低減要求を最適化する設計法を検討し、その効果を確認した。

本稿では、これらの内容について報告する。

2. 4輪操舵システム

本題にはいる前に4WSシステムの説明を行う。4WSの構成は、Fig. 2に示す様に、車速センサ（スピードセンサ、後輪車輪速センサ）、舵角センサ、コントロールユニット（ECU）、後輪操舵アクチュエータで構成される。

コントロールユニットには、舵角センサ、車速センサの信号より目標とする後輪舵角を決定し、後輪操舵アクチュエータに組み込まれている後輪操舵舵角センサからの信号により、目標舵角と実舵角との差を算出し、それに基づいてアクチュエータを制御するサーボ系が構成されている。

2. 1. 後輪操舵アクチュエータ構成

Fig. 3に後輪操舵アクチュエータを示す。このアクチュエータは、駆動源であるDCモータと、このモータの回転をシャフトスクリューのストロークに変換するボールスクリュー機構、制御停止の場合シャフトスク

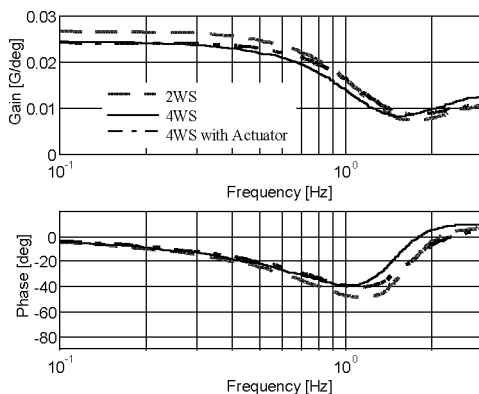


Fig. 1 Frequency Response of Lateral Acceleration

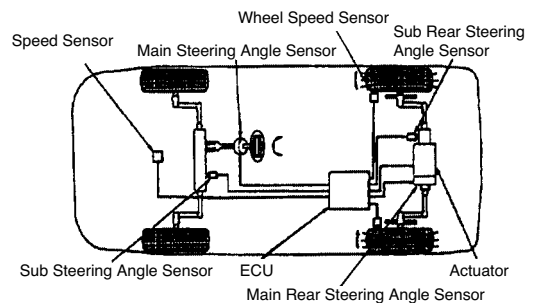


Fig. 2 4WS System

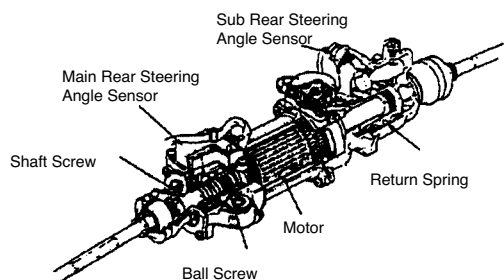


Fig. 3 Steering Actuator

リュー位置を中立に保持させるためのリターンズプリング、モータの角度を検出する主後輪舵角センサとシャフトスクリュのストロークを検出する副後輪舵角センサから構成される。

なお、主後輪舵角センサの信号が制御用として使われ、副後輪舵角センサはシステムスタート時における後輪舵角の初期値設定と主後輪舵角センサの故障検知用として使われる。

2. 2. アクチュエータの制御概要

アクチュエータは、モータ印加電圧を入力、後輪舵角を出力としている。なお、モータの印加電圧は、電源電圧に対する所望の印加電圧の比であるデューティ値により発生させている。また、後輪舵角はモータの回転角から近似的に算出している。制御器は、この後輪舵角信号と所望の目標舵角との差を求め後輪舵角を目標舵角に追従するようにデューティ値を計算する。

今回のように、現代制御理論、特に状態フィードバック制御の構成で設計を行う場合、状態量を明確にし、かつ全状態量が検出できなければならない。そこで、4WS アクチュエータにおける状態量は、モータ系のダイナミクスが支配的であることからモータの回転角と回転角速度とする。これは、後輪舵角と後輪舵角速度を状態量に設定するということである。また、検出できない舵角速度信号は、本来ならばオブザーバ等で推定しなければならないが、ECUでの計算負荷低減のため、今回は後輪舵角の差分値で算出した。

3. 制御系設計

3. 1. 制御要求仕様の設定

まず、アクチュエータの制御要求項目とその定量化の方針を次のように考える。

1. 応答性

横加速度応答特性とECUパワーユニットの電流容量とのトレードオフをとること。(本システムの場合では、パワーユニットの電流容量でアクチュエータの応答性の上限が決定されることになる)

2. 安定性

目標後輪舵角指令値の最大変化量に対して、アクチュエータ制御系が不安定とならないこと。(有限でステップ的な目標値印加に対してシステムが安定であることを要求する)

3. 定常特性

後輪舵角偏差が可能な限り小さいこと。(最大後輪舵角値 (8 deg) の1%以下)

4. ロバスト性

ラック外力(路面負荷)に対して定常特性が維持されること。(ラック剛性に対するタフネス)

5. 商品性(本稿では作動音低減としている)

作動音の検定者による官能評価で判定基準以上であること。

これらを考慮して要求項目を定量化した結果をTable 1にまとめる。なお、応答性は、100%のデューティ値を超えない最大の応答特性をシミュレーションより予測して設定した。

ところで、実際にはこれらの要求仕様を4WSのすべての作動環境で達成する統一的な制御設計手法を検討するのは、あまり現実的ではない。

Table 1 Specifications of 4WS Actuator

Term	Specifications
1.Response	Response of Actuator is above 5Hz at middle and high speed regions.
2.Stability	Stabilize actuator in bounded input.
3.Steadiness	Steady error is below 0.08deg.
4.Robustness	Response, stability and steadiness performance are robust at all conditions of actuator.
5.Quality	Mechanical noise level is above 6 points at evaluation of experts.

従って、制御設計法については次の方針をもって検討することとし、次節より設計過程を説明する。

- 少なくとも項目2～4については、あらゆる作動環境で満足する必要がある、これを基本制御則として位置付ける。
- 項目1と項目5は、相反する仕様であるため、作動環境に対して要求仕様をバランスさせることが可能な設計法でなければならない。これを拡張制御則として基本制御則を補正する構成とする。

3. 2. アクチュエータのモデリング

現代制御理論による制御設計は、まず制御対象の動特性をあらわす数式モデルの作成から行う。また、数式モデルの作成は、大きく分けて、運動方程式などから求める物理モデルと制御対象の入出力データから求めるシステム同定手法による実験モデルの二通りの方法がある。

本稿で対象にしている4輪操舵アクチュエータは、基本的にDCモータと機械的伝達機構で構成されるため物理的構造が明らかであるが、粘性摩擦係数などパラメータに不明なものがあるため、今回はシステム同定により実験的に求めた。

なお、システム同定によるモデリングは次のようにして行った。まず、アクチュエータに加える入力信号はPWMデューティ値とし、信号波形は擬似ランダム信号であるM系列信号とした。

また、出力信号は、後輪舵角（主舵角センサ値）とし、前章で説明したアクチュエータ構成から数式モデル構造を二次の連続系状態空間モデルとした。

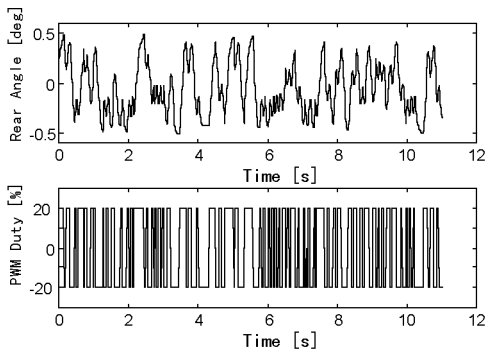


Fig. 4 Experimental Data for System Identification

同定実験は、パーソナルコンピュータによりM系列信号を計算させ、この信号をECUに転送してPWM信号を発生させた。この時の後輪舵角信号をECUにて5ms周期で計測した。得られた入出力データをFig. 4に示す。さらに数式モデルの係数は、計測データと同定モデル出力の2乗誤差を最小にするように最小2乗法により決定した。結果として得られたモデルを式(1)に示す。

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -813.5 & -109.2 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ 2859 \end{bmatrix} U \\ Y &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} X \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 X は、後輪舵角と舵角速度の状態変数ベクトル、 U はPWMデューティ値、 Y は後輪舵角である。

3. 3. 制御器の設計

3. 1. で述べた基本制御則として、藤崎³⁾らによる二自由度最適サーボ制御(LQI制御)の適用を検討した。この制御手法によれば、状態フィードバックにより安定性を確保でき、さらに定常特性改善のための積分器が附加されることによって制御アルゴリズムが実現される。さらにこの積分器のゲインによるロバスト性の度合い、他の要求項目に影響しないように独立して設定できるという点から要求仕様の実現に最適な手法であると思われる。

また、拡張制御則として、制御入力に周波数重み関数を設定して状態フィードバックゲインを求めるFWLQI制御を採用した。これにより、作動音の発生の原因となる周波数帯域の制御入力の変動を低減できる。加えて、車速によりこの周波数重み関数を切りかえることで低速では作動音低減を中高速では応答性というように車速によって要求仕様をバランスさせることを意図している。

以下に、この基本制御則と拡張制御則について概要を説明する。

(1) 基本制御則(LQI制御)

藤崎によると二自由度最適サーボの制御ブロックは、Fig. 5のようにあらわされる。

この設計法によれば、最適フィードバックゲイン K_s 、フィードフォワードゲイン K_f により過渡応答を含めた理想的な応答を決定できる。なお、それぞれのゲインは、最適レギュレータ理論により求められる。一方、 K_z は、

目標舵角と実舵角の偏差 (e) の積分値 (w) を打ち消すためのフィードバックゲインである。これによって、制御対象のモデル化誤差あるいはパラメータ変動(これは、システム同定時の予測誤差およびアクチュエータ構成部品の特性ばらつきや特性劣化に相当する)により理想応答とならない時のみ誤差信号 (z) が発生し、この信号が積分ゲイン G_i を介して制御入力に反映される。このように、 G_i はロバスト性要求に対して有効に働き、フィードバックゲイン K_s は応答性、安定性要求、フィードフォワードゲイン K_f は定常特性要求に対して働く。さらに G_i および K_s はそれぞれの要求に対して独立に設定できる。

また、式 (2) にこれらゲインの計算式を記す。

K_s : 最適レギュレータ理論から求める。

$$K_f = -[C(A+BK_s)^{-1}B]^{-1} \quad (2)$$

$$K_z = C(A+BK_s)^{-1}$$

G_i : 任意

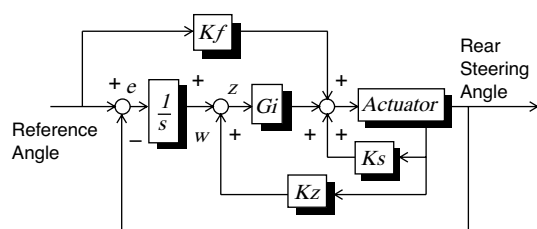


Fig. 5 Block Diagram of LQI Controller

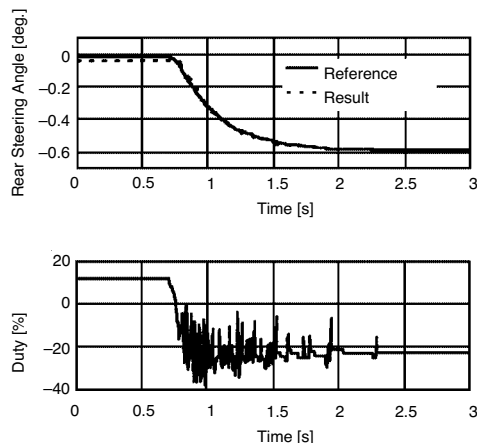


Fig. 6 Experimental Result of LQI Controller

また、式 (1) より A 、 B 、 C の係数を次のようにおく。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -813.5 & -109.5 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 2859 \end{bmatrix}, C = [1 \ 0]$$

既に述べたように、舵角速度は検出できないため後輪舵角の差分値を使用する。

(2) 拡張制御則 (FWLQI 制御)

基本制御則は、フィードバックゲインが周波数に依存せず固定であるため、制御対象をモデル化したときの近似誤差、あるいはセンサノイズなど中高周波数帯域での特性変動に対して感度が高いという傾向がある。

従って、アクチュエータのモデリングにおいて無視したダイナミクスなどによる影響が、Fig. 6 のように制御入力であるデューティ値の変動を招き、結果として作動音が発生することがわかっている。⁴⁾

この対応として、最適レギュレータ理論における評価関数の制御入力項に周波数重みをつけ、振動の原因となる周波数帯域における制御エネルギーを抑制する手法を検討した。

また、アクチュエータの応答性と作動音の発生が車速でバランスされるように周波数重みの設定を車速のパラメータとした。具体的には、車速が 30km/h 以下では、作動音低減を重視するため周波数重みはハイパスフィルタ特性を持たせる。また、30km/h 以上では、応答性を重視するため周波数重みはオールパス特性、つまりゲイン特性が周波数によらず固定値となる特性に設定し、通常の LQI 制御へ制御構造を移行させるようにした。

次に、この FWLQI 制御の設計過程を説明する。

まず、今回の問題はサーボ系であるので状態変数、制御入力を定常値からの偏差系として考え、それぞれ偏差状態変数 $\bar{X}$ と偏差制御入力 $\bar{U}$ とすると、最適制御理論という評価関数は、

$$J = \int_0^{\infty} (\bar{X}^T Q \bar{X} + \bar{U}^T R \bar{U}) dt \quad (3)$$

となりこの関数 J を最小にするようにフィードバックゲインが決定されることになる。

次にこの評価関数をパーシバルの等式により周波数領域に変換する。今回は、制御入力の重み R だけを周波数

に依存させるため式 (4) のようになる。

$$J = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [\bar{X}^T(-j\omega) Q \bar{X}(j\omega) + \bar{U}^T(-j\omega) R(j\omega) \bar{U}(j\omega)] d\omega \quad (4)$$

ここで

$$Q = C^T C, \quad R(j\omega) = D_f^T(j\omega) D_f(j\omega) \quad (5)$$

とおく。さらに新しい変数を次のように仮定する。

$$\bar{w}(j\omega) = C \bar{X}(j\omega), \quad \bar{v} = D_f(j\omega) \bar{U}(j\omega) \quad (6)$$

そうすると式 (4) の評価関数は、

$$J = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [\bar{w}^T(j\omega) \bar{w}(j\omega) + \bar{v}^T(j\omega) \bar{v}(j\omega)] d\omega \quad (7)$$

これを再びパーシバルの等式により時間領域に戻すと

$$J = \int_0^{\infty} [\bar{w}^T(t) \bar{w}(t) + \bar{v}^T(t) \bar{v}(t)] dt \quad (8)$$

ここで D_f^{-1} ローパスフィルタ特性に設定し、状態空間表現として式 (9) のように定義する。

$$\begin{aligned} D_f^{-1} : \bar{Z} &= F \bar{Z} + G \bar{v} \\ \bar{U} &= H \bar{Z} + M \bar{v} \end{aligned} \quad (9)$$

$\bar{Z}$ は、 D_f^{-1} の偏差状態変数である。

以上を用いて、拡大系をつくると

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{Z} \\ \bar{X} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} F & 0 \\ BH & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Z} \\ \bar{X} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G \\ BM \end{bmatrix} \bar{v} \\ e &= [DH \quad C] \begin{bmatrix} \bar{Z} \\ \bar{X} \end{bmatrix} + DM \bar{v} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで e は目標 - 実舵角の偏差

さらに拡大系の重み Q_f を次のように設定する。

$$Q_f = Q_0 [DH \quad C]^T [DH \quad C] \quad (11)$$

ここで Q_0 は、セッティングパラメータである。さらに、 $\bar{v}$ を新しい制御入力とすると、この問題は通常の最適レギュレータ問題となる。従って、式 (10) の拡大系にて

最適レギュレータ問題を解き、偏差状態変数を通常の状態変数に戻すと最適入力は、

$$v = \begin{bmatrix} F_S & K_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z \\ X \end{bmatrix} + K_f \gamma \quad (12)$$

ここで F_S, K_S : 状態フィードバックゲイン

K_f : フィードフォワードゲイン

γ : 目標舵角

また、 v は仮想的な入力であるから、式 (6) より実際の入力である U を求めると

$$U = D_f^{-1} v \quad (13)$$

であるため、既に述べたように実システムへの入力にローパスフィルタが直列に結合された形となる。

さらに、積分打ち消しフィードバックゲインは、次のように求めることができる。

$$\begin{bmatrix} F_Z & K_Z \end{bmatrix} = C_{AUG} / (A_{AUG} + B_{AUG} [F_S \quad K_S]) \quad (14)$$

ここで

$$\begin{aligned} A_{AUG} &= \begin{bmatrix} F & 0 \\ BH & A \end{bmatrix}, \quad B_{AUG} = \begin{bmatrix} G \\ BM \end{bmatrix} \\ C_{AUG} &= [DH \quad C] \end{aligned}$$

このようにして得られた制御ブロックは、Fig. 7 のようになる。

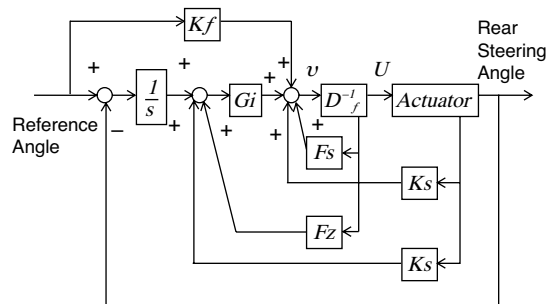


Fig. 7 Block Diagram of FWLQI Controller

3. 4. シミュレーション結果

前節で説明した拡張制御則について、その効果を確認するためシミュレーションを行った。シミュレーションで使ったアクチュエータモデルは、基本的に3. 2. で得られた制御設計用のモデルを使用する。しかし、このモデルをそのまま使えばシミュレーションするまでもなくよい結果が得られるため、舵角速度にパラメータノイズを加えることでより実システムに近いモデルに拡張した。

なお、パラメータノイズは、舵角速度信号に応じた信号が、さらに舵角速度信号にフィードバック的に加わるノイズと定義する。パラメータノイズを加える意味は、舵角速度の算出を後輪舵角信号の微分で求めることによって発生するノイズを考慮したいという理由による。

このようなアクチュエータモデルに基いて、まず最初に基本制御則であるLQI制御でシミュレーションした結果をFig. 8に示す。

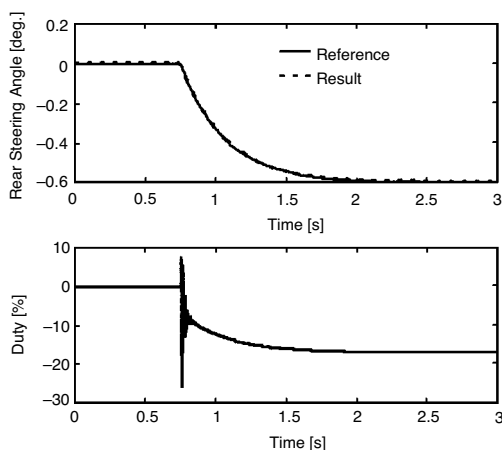


Fig. 8 Simulation Result of LQI Controller

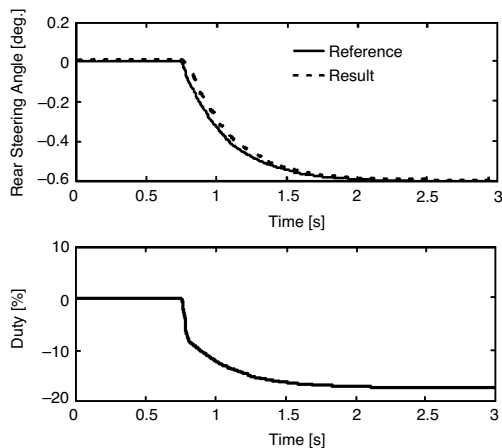


Fig. 9 Simulation Result of FWLQI Controller

Fig. 8をみると、後輪舵角の操舵に対してデューティ値にノイズが発生している。従って、このシミュレーションで使ったアクチュエータモデルは、比較的良好に実現象を表していると予想される。既に述べた様に、このデューティ値におけるノイズがアクチュエータ作動音の発生源となっている。また、目標後輪舵角（実線）と実後輪舵角（点線）は、完全に一致しており、応答性に関してはかなりの性能が発揮されていることがFig. 6の実験結果からも伺える。

続いて、同様の条件で、拡張制御則であるFWLQI制御でのシミュレーション結果をFig. 9に示す。

これをみると、デューティ値にほとんどノイズが発生しておらず、従って、作動音の低減に対し大きな効果があると予想できる。

しかしながら、LQI制御の時にはなかった目標後輪舵角（実線）に対する後輪実舵角（点線）の応答遅れが発生しており、アクチュエータの応答性に関しては、LQI制御に比較して悪化すると予想される。

4. 実車テスト結果

前章で設計した制御則（FWLQI制御）をECUに組み込み、実車にてテストを行った。

Fig. 10にテストデータを示す。シミュレーションの結果から予想されたように、周波数重みにより制御入力（デューティ値）の微振動が抑制されていることがわかる。この結果、アクチュエータ作動音の音圧レベルは15dBほど低減された。

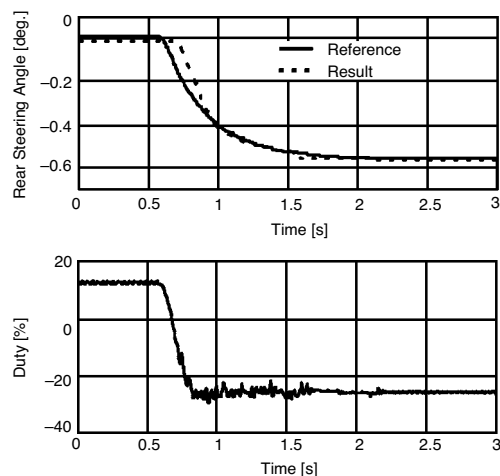


Fig. 10 Experimental Result of FWLQI at 0km/h

Table 2 Actuator Test Result

Term	Test Result	Judgment
1.Response	6 Hz (above 30km/h)	OK
2.Stability	Stabilize at input of 0.5deg	OK
3.Steadiness	Steady error is 0.024deg	OK
4.Robustness	Robust in disturbance input of 100kgf	OK
5.Quality	6 points	OK

ただし、シミュレーションから予想された通り、初期的に実舵角の応答遅れが発生している。そのため、応答特性が重視される車速領域においては（本稿では、後輪操舵の同相制御を行う30km/h以上の車速に設定している）入力に対する周波数重みの周波数特性をオールパス特性にし、基本制御則であるLQI制御に移行させるようにすることで応答遅れの影響を解消した。また、Fig. 11は、120km/hの車速でのアクチュエータ応答特性に対するテスト結果である。これをみると、制御入力は若干振動的であるが、初期的な遅れがなくなっており応答性が改善されていることが確認できる。

続いて、要求項目の2～4について検証したところ、Table 2のように要求値を満足していることがわかる。

さらに、要求項目の1、5については、据え切り時に作動音低減（商品性）を、中高速時に応答性を重視させるように拡張制御則における重み関数を最適化することで、車速に応じて要求性能をバランスすることができた。

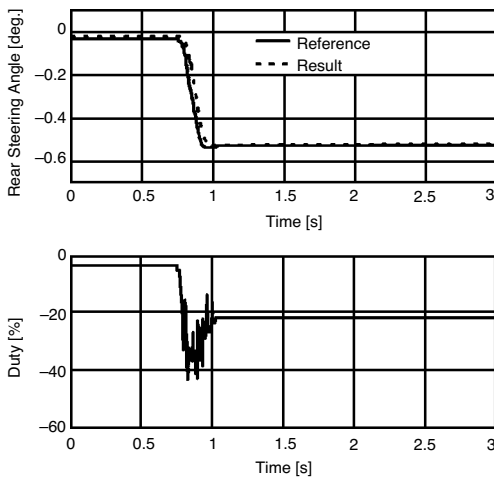


Fig. 11 Experimental Result of FWLQI at 120km/h

5. まとめ

本稿では、4WSアクチュエータについて、次の項目の報告を行った。

- (1) 4WSアクチュエータに要求される制御仕様を明確化した。
- (2) 相反する要求仕様を車速に応じて最適化する制御則を提案し、実車テストにてその効果を確認した。

なお、拡張制御（FWLQI制御）について、車速に依存して変化する重み関数に対する制御系の大域的安定性は、中村らによって証明されており⁵⁾、理論と実機において本制御系の安定性が保証されている。この安定性についての考慮は、制御系が不安定になると最悪故障モードに至る4WSシステムの信頼性を考える上で非常に重要な事項であると言える。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、有益な御助言をいただいた、早稲田大学内田健康教授と大学院生の中村勇一郎氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 数藤、山村、伊藤、橋ヶ谷、「電動式後輪操舵用アクチュエータのロバスト制御」、自動車技術会 学術講演会前刷集 932、1993、PP 203-206
- 2) 伊藤、「電動式後輪操舵システムとロバスト制御」、モータ技術シンポジウム講演資料、1994
- 3) 藤崎、池田、「最適サーボ系の2自由度構成」、計測自動制御学会論文集、28、3、1992、PP 343-350
- 4) 藤原、鶴宮、古海、寺山、内田、「周波数依存評価関数型2自由度最適サーボによる4WSアクチュエータ制御」、第3回制御理論応用シンポジウム資料、1995、PP 51-56
- 5) 中村、藤原、鶴宮、内田、「スケジュールド4WSアクチュエータのLMIを用いた安定解析」、第38回自動制御連合講演会前刷集、1995、PP 233-234

■著 者■



藤 原 幸 広



浜 本 恭 司