

ステアバイワイヤを用いた自動車の操舵性向上 -遊星歯車を用いた2自由度ヨーレート制御の試み-

青木 健一郎*, 堀 洋一 (東京大学)

An Application of 'Steer-by-Wire' System to Two Degrees of Freedom Control of Yaw Angle Rate

Ken-ichiro Aoki and Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Abstract

This paper proposes a novel design method of 'Steer-by-Wire' system to realize AFS (Active Front Steering). To control front wheel angle independent of driver's steering input, the proposed steering system has a planetary gear system. A control law of the planetary gear system which improves the yaw angle rate delay and application of the control law to the proposed steering system are mentioned. Furthermore, two degrees of freedom control strategy that can suppress the disturbance without changing the yaw angle rate response is proposed.

キーワード: 電動パワーステアリング アクティブ前輪操舵 遊星歯車 ヨー角速度 2自由度制御

(Keywords: electric power steering, active front steering, planetary gear, yaw angle rate, two degrees of freedom control)

1. 緒 言

自動車におけるエネルギー効率の向上は、近年最も注目されている自動車技術分野である。エンジンの効率向上やハイブリッドシステムの搭載のみならず、電動パワーステアリング (EPS) の採用により、エネルギー効率が向上している。EPS の消費エネルギーは従来の油圧式パワーステアリングのおよそ5%であり⁽¹⁾、省エネルギー性が要求される乗用車で数多く採用されている。また、EPS の普及と同時に、EPS に搭載されたモータを制御することで、アクティブ前輪操舵 (AFS) を実現することも可能である。

アクティブ前輪操舵は、前輪を積極的に制御することで、車両の運動性能向上や緊急回避動作などが実現できる。1 コラムによる従来構造のパワーステアリングでも AFS は可能であるが、操舵角と前輪舵角が拘束されるため、実現可能な機能は限られている。

近年注目されているステアバイワイヤ (SBW) 方式は、操舵角と前輪舵角の拘束がないためより高度な AFS が実現可能になる。差動機構を用いた SBW は実用化されているが採用例はまだ少数である。

本論文では、SBW により制御される自動車でも AFS を実現する方法として、遊星歯車を用いた新しい構成法を提案する。最初に、ヨーレートフィードバックによる AFS 制御則を遊星歯車を用いた新しい構成による SBW 装置に適用し、従来手法の遊星歯車による差動ステアリングと比較して小さい出力のモータで AFS が実現できることを示す。さらに、2自由度制御への応用を示し、SBW によりヨーレートの操舵応答特性と外乱応答特性を独立に設定できることを示す。

2. 遊星歯車を用いたステアバイワイヤ (SBW) システムの検討

本章では、ステアバイワイヤを実現する方法として遊星歯車による差動機構を応用する。また、遊星歯車機構を1段使うものと2段使うものを比較する。

2.1 . ステアリングの分類

EPS (Electric Power Steering) は、この10年で大きく発展し、実用化されてきた技術である。最初の実用化は軽自動車への適用 (1988) であった⁽²⁾。

従来の EPS は一般的に図1のような構成である。モータは減速装置を介してステアリングコラムと直結している。コントローラは、ねじれ軸によるトルクセンサの情報を入力とし、適切なアシストが行われるようにモータ電流を制御している。

従来の EPS は、トルクセンサを介して操舵角と前輪舵角が拘束されているため、おのおのが自由に動くことはできない。操舵角と前輪舵角の機械的拘束をなくした SBW によるステアリング装置は、その構造により図2に示す2つに分類される。

- 操舵部と転舵部が完全に分離されている (a)
- 操舵部と転舵部が差動機構でつながっている (b)

(a) では、ステアリングホイールの設置場所の自由度が高く、衝突時の安全性も高いといわれている。また、ドライバーへの反力と前輪操舵を独立して制御できるため、制御系の設計が容易である。ただし、路面から伝わる反力を模擬しなくてはならない。反力を模擬するための制御則についても、数

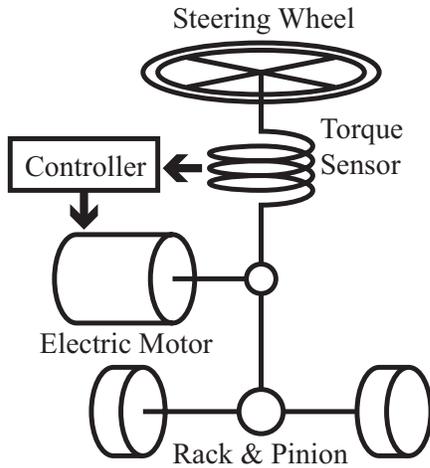


図1 ステアリング装置の一般的構成
Fig. 1. Configuration of steering system.

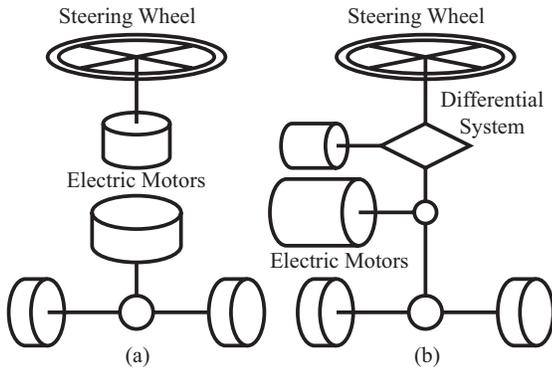


図2 SBW の分類
Fig. 2. Two types of 'Steer-by-Wire' system.

多くの研究がある⁽³⁾⁽⁴⁾。

(b)では、遊星歯車などの差動機構を用いて操舵角と前輪舵角を分離するため、操舵角と前輪舵角の拘束は差動機構の構成に依存する。また、路面反力が機械的に伝達される構成と、伝達されない構成がある。(b)のSBWでは、制御系の設計の際に差動機構の特性を考慮しなければならない。

ただし、(a)と(b)では機械的な構成が異なるものの、制御の自由度は本質的に等しく、角度やトルクを適切に変換することで、同様の制御則を適用することが可能である⁽⁵⁾。

また、(a)のようなSBWでは一般にフェイルセーフ対策が難しく、コンセプトカーとして実現されているものはあるが、一般の乗用車としては市販に至っていない。(b)のようなSBWでは、モータ故障時にも差動部分をロックすることでステアリング動作を続けることが可能である。

2.2 . 遊星歯車機構の基本式

これ以降、操舵部と転舵部が差動機構を通してつながっている、図2(b)の構成によるSBWについて考える。制御上の自由度は(a)の構成と全く同等で、フェイルセーフ対策もとりやすいため、一部の乗用車でも採用されている。

まず遊星歯車機構の基本式を導出する。遊星歯車を用いた差動機構は図3に示す4つの構成要素を持っている。太陽歯車A、遊星歯車B、内歯歯車C、キャリアDとする。本論文ではこれらをまとめて遊星歯車機構と呼ぶことにする。

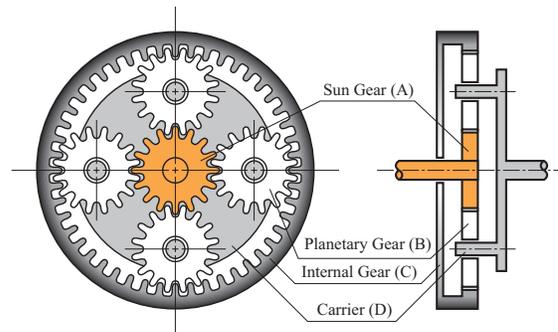


図3 遊星歯車機構
Fig. 3. Planetary gear system.

遊星歯車には、トルク分配と差動機能があり、A, C, Dそれぞれの角度およびトルクを $\theta_A, T_A, \theta_C, T_C, \theta_D, T_D$ とすれば、これらの変数の間に式(2)および式(1)の関係が成り立つ。

$$\theta_C = \frac{-1}{\alpha}\theta_A + \frac{1+\alpha}{\alpha}\theta_D \dots\dots\dots (1)$$

$$T_A = \frac{1}{\alpha}T_C = \frac{-1}{1+\alpha}T_D \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 α は太陽歯車と内歯歯車の直径の比で、 $\alpha = R_C/R_A$ とする。

2.3 . 遊星歯車機構を用いたSBWの新しい構成法

遊星歯車を用いたSBWシステムとして、図4のような構成方法を提案する。ステアリングホイールはキャリアに、差動角を制御するサブモータは内歯車に接続し、太陽歯車を転舵側と接続する。転舵側にはアシストトルクを発生するメインモータが減速機を通して接続され、さらにラック&ピニオンにより前輪を転舵している。

提案するシステムの特徴は、差動部分に1段の遊星歯車機構を用いている点である。通常、遊星歯車を用いた差動機構では図5(a)のように2段の遊星歯車機構を対向させて使用する⁽⁶⁾。2段使用することで差動部分での減速が避けられるた

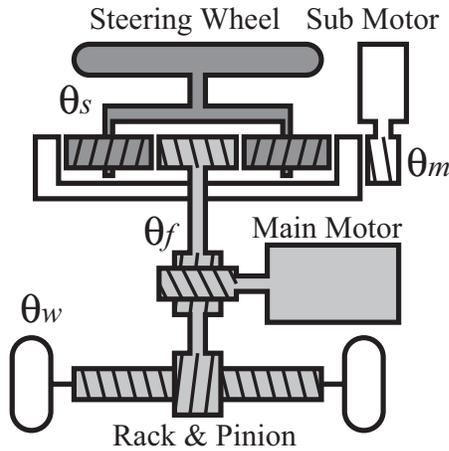


図4 遊星歯車機構を用いたSBWシステム

Fig. 4. Proposed steering system.

め、パワーアシスト部分には既存技術を使うことができる。

提案するシステムでは、1段の遊星歯車機構でありながら差動部分で減速することなくAFSを実現できるため、従来手法と比較して部品点数を削減し、差動部分でのバックラッシュを減少させることができる。次章以降、1段の遊星歯車機構によるSBWシステムを用いてアクティブ前輪操舵(AFS)を実現する方法を提案する。

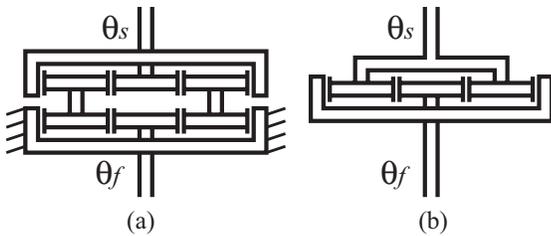


図5 遊星歯車による差動部分の比較

Fig. 5. Difference between conventional and proposed method.

3. 遊星歯車を用いたアクティブ前輪操舵

本章では、1段の遊星歯車機構を用いて、ヨーレートフィードバック制御を実現する方法を提案する。

3.1. 2次元運動方程式

まず、アクティブ前輪操舵の基礎となる車両の運動方程式を簡単に説明する。平面上で2次元運動をしている車両の状態は、重心速度 V 、重心での車体すべり角 β 、ヨー角速度 $\dot{\gamma}$ の3つの量で表すことができる⁽⁷⁾。簡単のため2輪モデルと

して線形化し、状態量 β, γ と前輪舵角 θ_w 入力を用いた状態方程式を式(3)に示す。

$$\dot{x} = Ax + b\theta_w \dots\dots\dots (3)$$

$$A = \begin{bmatrix} -2\frac{K_f+K_r}{MV} & -1 - 2\frac{l_f K_f - l_r K_r}{MY^2} \\ -2\frac{l_f K_f - l_r K_r}{I} & -2\frac{l_f^2 K_f + l_r^2 K_r}{IV} \end{bmatrix},$$

$$b = \begin{bmatrix} \frac{2K_f}{MV} & \frac{2l_f K_f}{I} \end{bmatrix}^t, \quad x = [\beta \quad \gamma]^t \dots\dots\dots (4)$$

$M[kg], I[kgm^2], l_f[m], l_r[m], K_f[N/rad], K_r[N/rad]$ はそれぞれ、車両の質量、慣性モーメント、重心から前後輪までの距離、前後輪1輪当たりのコーナリングフォースである。

ここで、簡単のため $l_f = l_r = l/2, K_f = K_r = K_y$ とすれば、

$$\dot{\gamma} = \frac{-K_y l^2}{IV} \gamma + \frac{K_y l}{I} \theta_w \dots\dots\dots (5)$$

より、 θ_w から γ の伝達関数 P_γ は、

$$\frac{\gamma}{\theta_w} = P_\gamma(s) = \frac{1}{\frac{I}{K_y l} s + \frac{l}{V}} \dots\dots\dots (6)$$

である。よって、ヨーレートは前輪舵角に対して、ほぼ1次遅れの特性を持つことが分かる。慣性が大きくなる、またはコーナリングフォースが小さくなると、ヨーレートの遅れが大きくなる。また、ホイールベースは一定なので直流ゲインは速度に依存することが分かる。実際の車両はさまざまな非線形要素を持っている。これらの非線形要素は主にタイヤ力の非線形性に起因しており、タイヤが発生する力が飽和すると車両の運動が不安定になる。

3.2. ヨーレートフィードバックによるAFS

タイヤ路面間の摩擦係数が小さくなるとヨーレート遅れが大きくなり、初心運転者ではアンダーステアを引き起こす原因となる。ヨーレート遅れを小さくすることでステアリング入力に対する自動車の応答特性が向上し、コーナリングフォースの低い路面でもドライバーの意図したとおりの旋回ができると考えられる。

遊星歯車機構を用いたSBWにより、このようなAFSを実現する方法を示す。いま、前輪舵角 θ_w に対するヨーレートの遅れが1次遅れであると仮定し、

$$\frac{\gamma}{\theta_w} = \frac{1}{J_v s + C_v} \dots\dots\dots (7)$$

とおく。ただし、

$$J_v = \frac{I}{K_y l}, \quad C_v = \frac{l}{V} \dots\dots\dots (8)$$

である。ヨーレート遅れの極は $-C_v/J_v$ なので、ヨーレートをフィードバックすることで極を左に移動させると、遅れが

小さくなる。いま、図4に示した遊星歯車機構において、内歯車の角度 θ_m をサブモータにより位置制御する。制御則は単純にヨーレートに追従させるだけとして、

$$\theta_m = \frac{Nl}{V} \gamma \dots\dots\dots (9)$$

と決める。

$$\theta_m = \frac{1+\alpha}{\alpha} \theta_s - \frac{1}{\alpha} \theta_f \dots\dots\dots (10)$$

であるから、車両のヨーレート応答特性は

$$\frac{\gamma}{\theta_s} = \frac{1}{N} \frac{1}{J_v s / (1+\alpha) + C_v} \dots\dots\dots (11)$$

と計算される。このとき、ヨーレート応答の極は $-(1+\alpha)C_v/J_v$ であるので、ヨーレート遅れは小さくなり、AFSが実現できると考えられる。

AFSの動作を模式的に示すと図6のようになる。縦軸にそれぞれの回転角度を表すと、 $\theta_m, \theta_s, \theta_f$ は一直線上に並ぶ。この直線の動きが角度の変化と対応している。

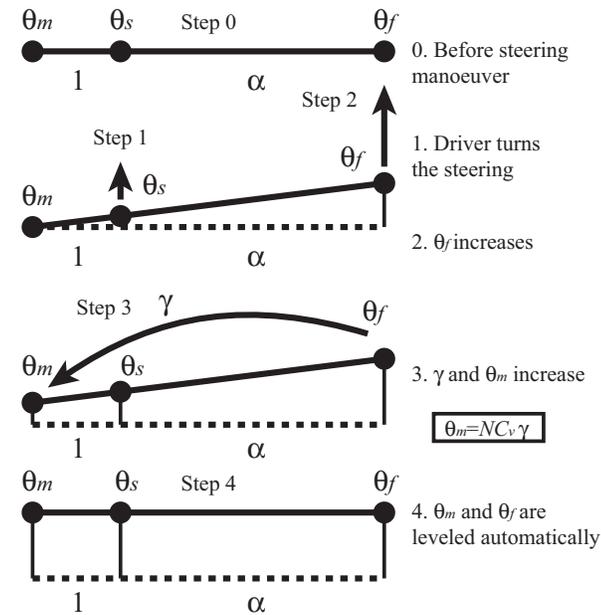


図6 AFS動作の模式図
Fig. 6. Principle of AFS.

θ_m は γ に追従しているため、ステアリングの切りはじめでは θ_s と θ_f のみが動く (Step 1, 2)。このとき、 θ_f は θ_s よりも速く動くので、位相を進める効果がある。実際にヨーレートが発生すると θ_m も動きはじめ (Step 3)、最後に $\theta_m, \theta_s, \theta_f$ がつりあう点で安定する (Step 4)。

すなわち、内歯車の角度を γ に追従させることで、自動的に AFS が実現されることが分かる。また AFS の動作は、遊星歯車機構が角度を演算するという本質的な機能によって実現されている。このような動作は、油圧サーボ機構に似ている。

3.3 . 遊星歯車機構の配置に関する検討

ヨーレートフィードバックによる AFS は、図5(a) のような2段式差動機構によっても実現可能だが、外乱抑圧性能を上げるためには、図5(b) に示した1段式差動機構のほうがモータ出力を小さく抑えられるため有利であることを示す。

ステアリングホイールにかかるトルクを T_s 、転舵側に伝わるトルクを T_f 、サブモータから減速機により増倍されたトルクを T_m とする。

1段式の場合、内歯車にかかるトルクおよび回転速度の関係は

$$T_m = \frac{\alpha}{1+\alpha} T_s \dots\dots\dots (12)$$

$$\omega_f - \omega_s = \alpha(\omega_s - \omega_m) \dots\dots\dots (13)$$

であるが、2段式の場合

$$T_m = \alpha T_s \dots\dots\dots (14)$$

$$\omega_f - \omega_s = \alpha \omega_m \dots\dots\dots (15)$$

である。トルクの面では1段式が4倍小さくて済むが、角速度の面では2段式が小さくなる。これは、2段式が差動角を直接制御しているのに対し、1段式ではすべての角度が等しくなるまでサブモータを駆動するためである。従って、2段式では減速比の大きなギアを用いることで、1段式と同じ出力のモータでも必要なトルクを発生できる。

しかし、ステアリングが静止した状態 ($\omega_s = 0$) で外乱モーメントを抑圧する場合、計算上は2段式も1段式と同じ角速度が必要となる。トルクの伝達関係式は変わらないため、2段式で外乱抑圧効果を得るためには1段式よりも $1+\alpha$ 倍大きなモータ出力が必要となる。

ステアリングを45度切った場合と、ステアリングを保持した状態で2000[Nm]の外乱モーメントが車両に加わった場合における角速度変化のシミュレーションを図7に示す。

ステアリングを回転させている状態では、2段式より1段式のほうが角速度が大きい。外乱を抑している間は2段式と1段式では全く等しい角速度を発生している。すなわち、提案手法は従来の2段式と比較して出力の小さなモータで同じ性能が実現できると考えられる。

4. 2自由度ヨーレート制御への応用

本章では、操舵角に対するヨーレートの目標値応答を保ちながら、ヨーレートフィードバックにより外乱を抑圧するための、2自由度制御を提案する。

4.1 . 2自由度ヨーレート制御

単純なヨーレートフィードバック制御では、外乱応答と目

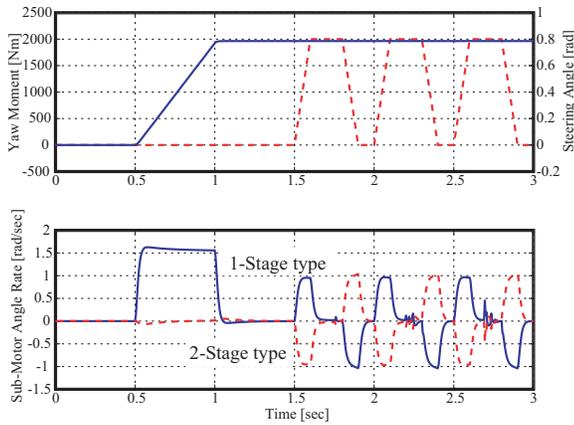


図7 サブモータの角速度の比較

Fig. 7. Angle rate of sub-motor.

目標応答を個別に設定することができない。すなわち、路面摩擦の変化や路面凹凸による外乱を補償するためにフィードバックゲインを大きくすると、目標値応答も速くなる。また、目標値応答を早くするために前輪舵角を大きく切の必要があり、場合によっては前輪の横滑り角が摩擦の限界を超えてしまい、安定性を損なう可能性がある。

一方、2自由度制御では目標値応答と外乱応答を個別に設定することができるため、目標値応答を変えることなく外乱を抑制することができる。2自由度制御によるヨーレートの制御ブロック図を図8に示す。

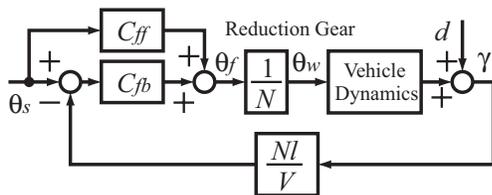


図8 2自由度制御によるAFSのブロック図

Fig. 8. Block diagram of AFS based on two degrees of freedom control.

フィードフォワード制御器を C_{ff} 、フィードバック制御器を C_{fb} とすると、 θ_f は、

$$\theta_f = (C_{ff} + C_{fb})\theta_s - \frac{lNC_{fb}}{V}\gamma \dots\dots\dots (16)$$

である。また、 $\gamma = P_\gamma(s)\theta_w$ とすると、 θ_s から γ までの伝達関数は

$$\frac{\gamma}{\theta_s} = \frac{(C_{ff} + C_{fb})P_\gamma(s)/N}{1 + lC_{fb}P_\gamma(s)/V} \dots\dots\dots (17)$$

と表せる。同時に、外乱抑圧特性は

$$\frac{\gamma}{d} = \frac{1}{1 + lC_{fb}P_\gamma(s)/V} \dots\dots\dots (18)$$

と表せる。また、遊星歯車を用いた提案システムで2自由度ヨーレート制御を実現するためには、内歯車の角度を

$$\theta_m = \frac{1 + \alpha - (C_{ff} + C_{fb})}{\alpha}\theta_s + \frac{C_{fb}Nl}{\alpha V}\gamma \dots\dots (19)$$

のように制御すればよい。なお、3・2で示したヨーレートフィードバックによるAFSは、 $C_{ff} = 1$ かつ $C_{fb} = \alpha$ の特殊な場合であることがわかる。

次に、 C_{ff} に伝達特性を持たせて、目標値応答特性を一定に保つ制御則を導出する。操舵角に対するヨーレートの応答目標値を $P_\gamma(s)/N$ とすると、式(17)より、

$$\frac{\gamma}{\theta_s} = \frac{(C_{ff} + C_{fb})P_\gamma(s)/N}{1 + lC_{fb}P_\gamma(s)/V} = \frac{P_\gamma(s)}{N} \dots\dots\dots (20)$$

である。従って、

$$C_{ff} + C_{fb} = (1 + C_{fb} \frac{l}{V} P_\gamma(s)) \dots\dots\dots (21)$$

である。

2自由度ヨーレート制御の制御則を、1段式差動機構によるステアリングに応用するためには、サブモータの角度を

$$\theta_m = \theta_s + \frac{C_{fb}Nl}{\alpha V}\gamma - \frac{C_{fb}l}{\alpha V}P_\gamma(s)\theta_s \dots\dots\dots (22)$$

のように制御すればよいことがわかる。

4.2 . ヨーレートフィードバック効果の確認

遊星歯車機構を用いてAFSを実現した場合のシミュレーションを行った。モデルは、タイヤの飽和を含む4輪非線形モデルである。

シミュレーションは、路面摩擦係数 $\mu = 1.0$ および $\mu = 0.7$ の路面を想定し、 $V = 40[\text{km/h}]$ でレーンチェンジを行う状況を模擬する。操舵角が等しい条件下、 $C_{fb} = 10$ とした2自由度制御(実線)とフィードバック制御(破線)を行った場合を図9で比較する。同時に $\mu = 0.7$ で $C_{fb} = 100$ としたとき、前輪がグリップを失っている様子(点線)も示す。また、図10に、 $\mu = 0.7$ のとき2自由度制御を行った場合の、 θ_s 、 θ_m 、 θ_f の変化を示す。

外乱応答

$\mu = 1.0$ と $\mu = 0.7$ の場合を比較することで、外乱応答特性の違いを知ることができる。フィードバック制御では、ヨーレートは操舵角に追従しており、路面摩擦の違いによる外乱を抑圧している。2自由度制御でも目標値に追従しており、やはり外乱を抑圧している。

目標値応答

2自由度制御では摩擦係数の違いとは関係なく目標ヨーレートに追従しているため、目標値応答特性は変化していないことがわかる。フィードバック制御ではヨーレートが操舵角に追従しているが、 $C_{fb} = 100$ とした場合に、前輪の摩擦力が飽和してヨーレートが小さくなっていることより、フィードバック制御のみでは車両の安定性を損ないやすくなることが

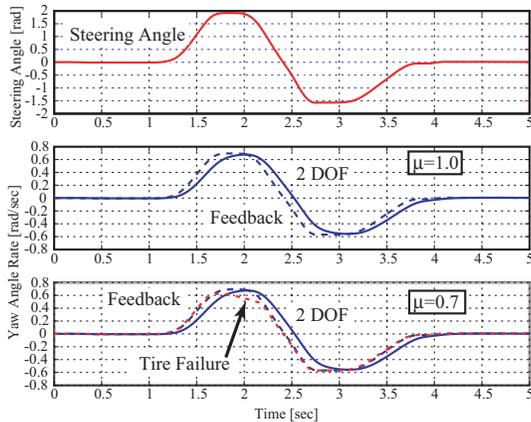


図9 レーンチェンジ・シミュレーション
Fig. 9. Single lane-change simulation.

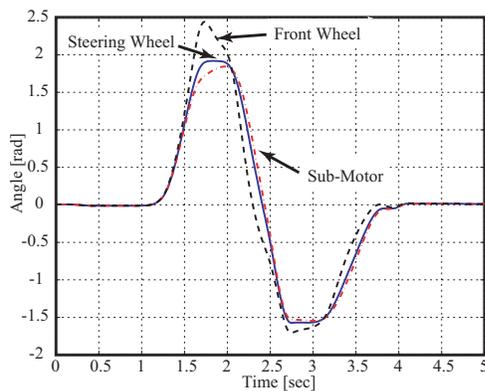


図10 レーンチェンジにおける角度変化
Fig. 10. Angle of each part of steering.

分かる。

角度の変化

$\mu = 0.7$ と路面が滑りやすいため、操舵角よりも前輪舵角が大きく動くことで、ヨーレートを目標値に追従させていることがわかる。

5. 結 言

5.1. ま と め

本論文では、AFS を実現するための SBW システムとして、1 段の遊星歯車機構を持つステアリング装置を提案した。また、ヨーレートフィードバックによる AFS を提案手法に適用した。2 段の遊星歯車機構を持つステアリングと比較して、1 段式では小さな出力のモータで AFS が実現できることが示された。

次に、2 自由度ヨーレート制御を提案し、操舵角からヨー

レートまでの応答特性を変化させることなく、路面摩擦の変化や路面凹凸による外乱を抑圧できることをシミュレーションで確認した。さらに、先に提案した遊星歯車によるステアリング装置へ適用するための制御則を導出し、2 自由度ヨーレート制御が実現可能であることを示した。

5.2. 今後の課題

本論文では、差動角を制御するモータ角度の計算法を示したが、実際のモータでは角度指令から実際の角度が実現するまでに遅れ時間があり、モータ出力の制限や、遊星歯車でのバックラッシュについても考慮していない。今後は、精密なモデルを用いて、サブモータの角度追従方法やメインモータとの協調制御などについて検討を続ける。さらに、実験装置を製作し、提案手法が実現できることを確認する予定である。

遊星歯車機構をステアリングに用いる場合、バックラッシュ管理の難しさや、部品点数の増加が問題となり、市販車での搭載例はほとんどない。しかし、提案手法ではバックラッシュの要因となる遊星歯車機構の使用を 1 段にとどめることができる上、本質的に 2 自由度ヨーレート制御に適した構造である。筆者らは、アクティブ前輪操舵を実現する新しい手法として、提案手法の制御技術を確立していきたいと考えている。

文 献

- (1) “NSK Technical Journal”, No.672, 2001.
- (2) Nakayama, T. and Suda, E., “The present and future of electric power steering”, Int. J. of Vehicle Design, Vol. 15, Nos 3/4/5, pp. 243-254.
- (3) Shiro Nakano, Takanobu Takamatsu, Osamu Nishihara, Hiromitsu Kumamoto, “Steering Control Strategies for the Steer-by-Wire System”, Transaction of JSAE, Vol.31, No.2, pp.53-58, 2000.
- (4) Shirou Nakano, Katsutoshi Nishizaki, Osamu Nishihara, Hiromitsu Kumamoto, “Steering Control Strategies for the Steer-by-Wire System (Second Report)”, Transaction of JSAE, Vol.33, No.3, pp.121-126, 2002.
- (5) Kenichiro Aoki, Yoichi Hori, “A Novel Configuration of EPS (Electric Power Steering) to Use as an Actuator to Realize AFS (Active Front Steering)”, Technical Meeting on Industrial Instrumentation and Control, IEE Japan, IIC-03-54, 2003 (in Japanese)
- (6) Sumio Motoyama, “The Possibilities of Steer-by-Wire on Vehicle Dynamics”, Journal of SAE of Japan, Vol.57, No.2, pp.39-43, 2003.
- (7) Masato Abe, “Vehicle Dynamics and Control”, 山海堂, 1992.