

2つのモータと差動機構によりアクティブ前輪操舵 (AFS) を実現するシステムの提案

青木 健一郎*, 堀 洋一 (東京大学)

Consideration on a Steering System to Realizes AFS (Active Front Steering) Consists of Two Motors and a Differential Mechanism

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

Abstract

In this paper, a novel design method of EPS (Electrical Power Steering) is proposed to be applied to AFS (Active Front Steering). The proposed EPS consists of a pair of planetary-gear-systems and two motors. It can not only output AFS compensation angle but also cancel the interference between AFS action and driver's reaction force. This paper also proposes a new AFS system, which compensates the transfer delay from steering angle to yaw rate, as an application of proposed EPS. Finally, expected future trends of steering system are considered.

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
(Keywords: electric power steering, active front steering, planetary gear)

1. 緒 言

自動車技術として近年急速な発展を遂げているのが、省エネルギー技術と事故防止技術である。前者の例として電動パワーステアリング (EPS) は従来の油圧式に比べ省エネルギー性に優れており⁽¹⁾、近年 EPS を搭載する自動車が増加してきている。また後者の例としては、アクティブ前輪制御 (AFS) を用いた車両姿勢制御により安定性の向上が期待されている⁽²⁾。

自動車における車両姿勢制御手法としては、アクティブ後輪操舵 (ARS) が4輪操舵 (4WS) として実用化されているが、広く普及するには至っていない。AFSによっても安定化は可能であるが、操舵感や安全性に直接かわる前輪をアクティブ制御するため装置の構成が難しかった。近年実用化された AFS には、ドライバーの危険な操舵を自動的に修正したり、車両に加わる外乱を補償するものなどがある。

AFS を実現するためには、ステアリングホイールと車輪の間に、操舵角 θ_h と補償舵角 $\Delta\theta_f$ を足し合わせ、転舵角 θ_f を出力する機構が必要である。このとき補償舵角は高速かつ正確に制御され、ドライバーに対しても適切な反力が伝わる必要がある。

EPS では、高速かつ正確なモータ制御の利点を生かすことができる点で、AFS のアクチュエータとして適していると考えられる。しかし従来の EPS は AFS のアクチュエータとして設計されていないため、AFS を実現するためには自由度の制約がある。

本研究では、ステアリングアクチュエータとしてモータのみを使用した EPS を扱い、AFS を実現するときに必要となる制御器および機械的な構成を検討する。検討にあたって、EPS の機能として次の3点に着目する。

- 操舵角および AFS 補償舵角の和を出力する
- AFS 作動時にも適切な反力がドライバーに伝わる
- 操舵トルクをアシストする

2章では AFS を実現するために EPS に求められる要件を述べる。3章では、機械系に遊星歯車による差動機構を応用し、2つのモータを制御する EPS を提案し、さらにステアバイワイヤ (SBW) と比較する。さらに、差動式ステアリングの AFS への応用を提案する。4章ではステアリング研究の展望を述べる。

2. 電動パワーステアリング (EPS) の分類

2.1 一般的なステアリングの構成

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) であり、初期にはドライバーの入力トルクをアシストするのみであった。油圧式と比較してアシスト特性の調整が容易であるため、アシストゲインは速度により可変とすることができた⁽⁴⁾。また、EPS の制御として、PID 制御によりハンドルの戻り特性を改善する提案⁽⁵⁾、運転状況に応じ、ルールベースの反力制御を行う提案⁽⁷⁾ などがある。

EPS を含むステアリング装置を図1に示す。トルクを検出するためのトーションバーを境に、ドライバー側を操舵側、タイヤ側を転舵側とすると、軸ねじれを含む2慣性システムとして表現可能である。アシストトルクは減速機構を通して転舵側に入力される。

ここで、ドライバーの操舵トルク T_h から転舵 θ_f までの伝達関数は、式 (1) のように表せる。

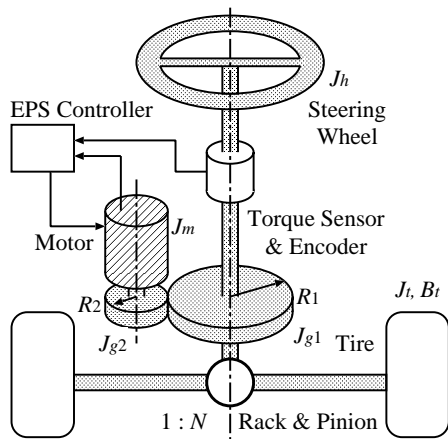


図1 ステアリング装置の構成

Fig. 1. Configuration of steering system.

$$\frac{\theta_f}{T_h} = \left(\frac{1}{K P_h(s) P_f(s)} + \frac{1}{P_h(s)} + \frac{1}{P_f(s)} \right)^{-1} \dots (1)$$

ただし、 K はトーションバーの剛性、 $P_h(s)$ はステアリングホイールのモデル、 $P_f(s)$ は転舵側のモデル（タイヤ部を含む）の伝達関数である。

このモデルでは非線形要素を含んでいないが、実際のステアリング装置は飽和やヒステリシス、バックラッシュを含む非線形システムである。しかし、これらの非線形要素は小さいとして本研究では線形モデルとして扱う。

2.2 . AFS を実現する EPS の構成方法

本研究で実現目標とする AFS は、機械的な操舵角 θ_h および補償舵角指令 $\Delta\theta_f$ を入力とし、転舵角 θ_f を出力するようなステアリングシステムとする。制御系または機械系の違いにより、図 2 に示すような 3 種類の構成を考え、AFS の実現が可能であるか考察する。

- (1) 1 モータを利用した従来構成
- (2) 2 モータを利用した差動構成
- (3) 操舵部と転舵部を切り離す Steer By Wire (SBW)

(1) は従来の EPS である。AFS では差動角を実現する必要があるが、従来型ではステアリングホイールとタイヤが直結しているため、AFS は実現できない。

(2) はステアリングコラムに差動装置を取り付け、差動角を制御するモータを追加し 2 モータ構成としている。2 つのモータを適切に制御することで、AFS が実現できる可能性がある。この構成は 3 章で検討する。

(3) はステア・バイ・ワイヤ (SBW) と呼ばれ、操舵部と転舵部が機械的に分離している。SBW では、操舵力や反力の機械的伝達がないため、これらをモータ制御により模擬する必要が

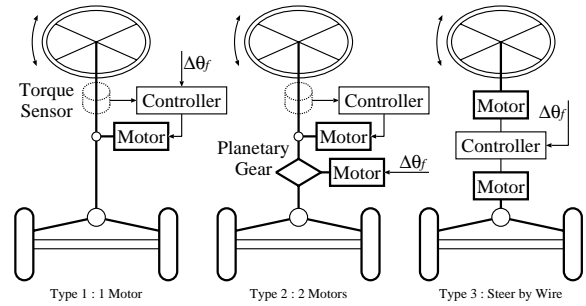


図2 EPS による AFS アクチュエータの実現法

Fig. 2. Three types of AFS actuator based on EPS.

ある^(?)。

2.3 . 反力と補償舵角の非干渉化問題

ステアリングホイールを通してドライバーが感じる反力は重要な情報を持っている。反力が伝達されない場合、ドライバーの負担増加や安定した操縦が損なわれることが知られている^(?)。従来型 EPS では、トーションバーのねじれに比例した力が反力として機械的に伝わるが、差動機構がある場合にもこの反力は適切に伝達される必要がある。

例えば、AFS の動作により補償舵角が制御された場合、AFS のためにドライバーが感じる反力が変化する可能性がある。反力の変化がドライバーの予想範囲を超えるとドライバーは異常な外乱として認識し、これを抑制する方向に力を加えるため、AFS の動作と干渉する危険性がある。差動機構を含むステアリングの場合、このような干渉を防ぐため、AFS の動作が反力として伝わらないような設計をしなければならない。

AFS の動作がドライバーに影響を与えないような非干渉化の評価は $\Delta\theta_f$ からステアリングホイール角までの伝達関数 $\theta_h/\Delta\theta_f$ をもって行うことにする。

3. 差動機構と 2 つのモータを有する EPS

3.1 . 装置の構成と動作原理

本章では、図 2 で示したタイプ 2 に相当する、2 つのモータと差動機構を用いたステアリングについて考察する。遊星歯車を用いた差動式ステアリングを図 3 に、ブロック図を図 4 に示す。

差動機構における伝達式は

$$T_r = T_f = \frac{1}{\alpha} T_C, \\ \theta_f - \theta_h = \alpha \theta_C \dots \dots \dots (2)$$

である。

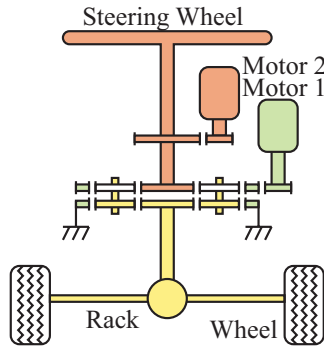


図3 1対の遊星歯車と2つのモータを用いたEPSの構成

Fig. 3. Configuration of EPS with a pair of planetary gear systems and two motors.

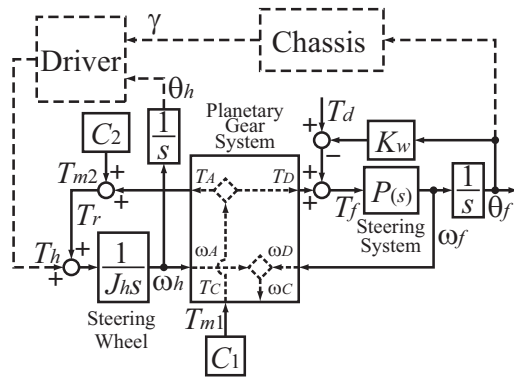


図4 2モータと遊星歯車機構によるEPS

Fig. 4. Block diagram of EPS with a planetary gear system and two motors.

通常のステアリングを実現するには、操舵角 θ_h と転舵角 θ_f を等しくするため $\theta_C = 0$ になるようにモータ1を制御する。角度の次元で定常誤差を0にするために、 ω_C に対してPI制御とすると、モータ1は従来のトーションバーと同じ働きを持つ。一方AFS実現のためには、モータ1により θ_C を $\Delta\theta_f$ に追従させるため、制御則は式(3)のようになる。

$$T_{m1} = (K_p + \frac{K_i}{s})(\omega_C - \Delta\dot{\theta}_f) \dots\dots\dots (3)$$

このときモータ1が発生するトルク T_{m1} はステアリングホイールに伝わり、ドライバーは反力を感じるが、AFS動作時には補償舵角実現のためのトルクが反力として伝達されるので、AFSと反力を非干渉化の必要がある。非干渉化のための補償トルクはモータ2により出力する。 $\Delta\theta_f$ と T_A の関係は

$$\Delta\dot{\theta}_f = \Delta\omega_f = P(s)T_f = (1 + \alpha)P(s)T_A \dots\dots\dots (4)$$

と表せるので、反力の補償式は式(5)のように計算される。

$$T_{m2} = -T_A = \frac{1}{1 + \alpha} \frac{\Delta\dot{\theta}_f}{P(s)} \dots\dots\dots (5)$$

補償すべきトルクを正確に求めるためにはステアリングモデル $P(s)$ の逆モデルが必要である。モデルは同定によって求めることができるが、本研究で同定方法には触れない。

トルクアシスト機能は、モータ1から操舵側に伝達されるトルクの一部を、モータ2で吸収することで実現できる。アシスト比を λ とすると反力は $1/\lambda$ に小さくすればよく、式(6)のようにモータ2を制御する。

$$T_{m2} = \frac{-1 - \lambda}{\alpha} \frac{1}{\lambda} T_{m1} \dots\dots\dots (6)$$

式(3)、式(5)および式(6)に示した制御則により、AFS補償舵角実現とトルクアシストを独立に制御し、AFSと反力の非干渉化が達成される。

3.2 . ステアバイワイヤとの比較

図3に示した差動式ステアリングでは、モータの取り付け位置として図5に示す3種類が考えられる。差動部のモータ1、操舵部のモータ2、転舵部のモータ3が発生するトルクをそれぞれ T_{m1} , T_{m2} , T_{m3} とする。遊星歯車とモータを反力 T_r および転舵トルク T_f を出力とする1つのシステムとして考えると、式(2)により

$$T_r = T_A + T_{m2} = \frac{1}{\alpha} T_{m1} + T_{m2} \dots\dots\dots (7)$$

$$T_f = T_D + T_{m3} = \frac{1}{\alpha} T_{m1} + T_{m3} \dots\dots\dots (8)$$

と表せる。ゆえに2モータをどのような組み合わせで選んでも、 T_r と T_f を独立に出力可能な2自由度ステアリングであり、3章で述べた制御則がすべての場合で応用可能である。

また、ステアバイワイヤと比較した場合、差動式ステアリングにおいてモータ1およびモータ3を使用した場合がステアバイワイヤと同じ構造である。さらに、差動式ステアリングの機能は2モータの選び方によらず等しいので、図3に示したステアリングは広義にSBWと呼ぶことができる。

3.3 . AFSへの応用

3章で提案した差動式ステアリング装置の応用としてヨーレート $\dot{\gamma}$ の位相遅れを補償するAFSを提案する。

一般に、自動車は重量が増えると操舵に対する車両運動の遅れが大きくなることが知られている。特にバンやトラックでは、積載時と空車時で重量が大きく異なるため、重量に合わせて操舵のタイミングを調整しながら運転している。

いま、平面上で運動をしている車両の状態を、図6に示す重心速度 V 、重心での車体すべり角 β 、ヨーレート $\dot{\gamma}$ の3つの量

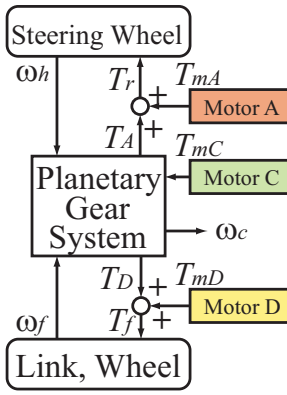


図5 遊星歯車とモータの一般的構成

Fig. 5. General configuration of planetary gear system and motors.

で表し、線形2輪モデルを導入すると、前輪舵角 θ_f を入力とした状態方程式 (9) として表すことができる。

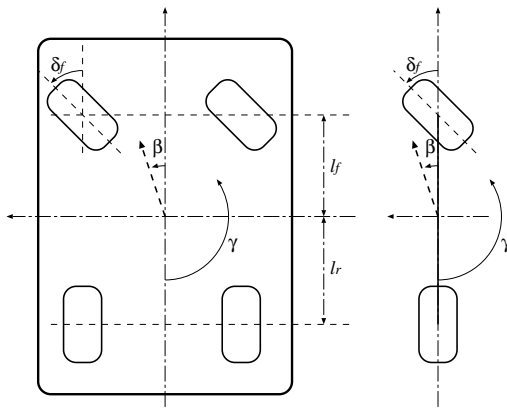


図6 4輪モデルと2輪モデル

Fig. 6. 4-wheel model and 2-wheel model.

$$\dot{x} = Ax + bu \dots\dots\dots (9)$$

ただし、

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

$$b = \begin{bmatrix} \frac{2K_f}{MV} & \frac{2l_f K_f}{I} \end{bmatrix}^t, \quad x = [\beta \ \gamma]^t, \quad u = \theta_f \quad (10)$$

さらに、操舵により車両に発生する γ は、式 (9) を変形することで、式 (11) のような2次系の応答として導くことができる⁽³⁾。

$$\frac{\gamma}{\theta_f} = G(0) \frac{1 + T_r s}{1 + 2\frac{\zeta}{2\pi f_n} s + \frac{1}{(2\pi f_n)^2} s^2} \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 $G(0)$ は定常円旋回におけるヨーレートである。また、 f_n は固有振動数、 ζ は減衰定数で、車体重量や速度に依存し、自動車の過渡的な運動特性を大きく左右するパラメータである。

いま、 $M = 1000, 2000[\text{kg}]$ 、速度 $V = 60[\text{km/h}]$ としたときの操舵から γ までの周波数特性を図7の実線および鎖線で示す。重量の増加に伴い位相遅れとゲインの低下が大きくなること分かる。

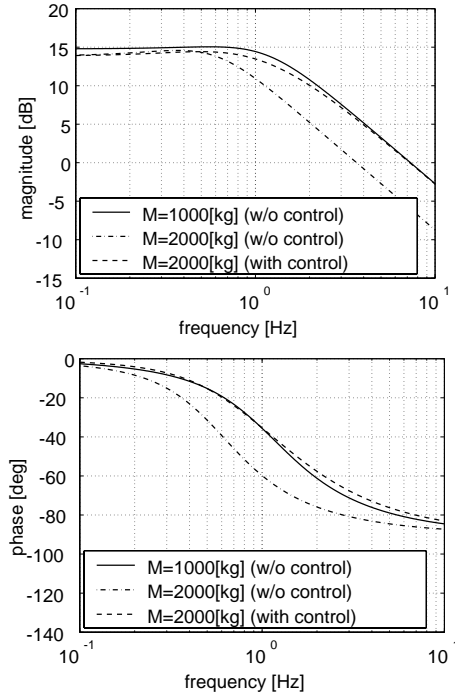


図7 γ/θ_h の周波数特性

Fig. 7. Bode plot of γ/θ_h

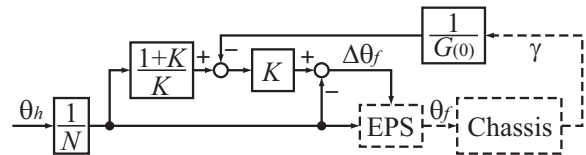


図8 AFSによる姿勢制御系

Fig. 8. Block diagram of AFS.

このような応答遅れを AFS で補償するために、図8に示すヨーレートフィードバックによる遅れ補償を行う。

$M = 2000[\text{kg}]$ のとき $K = 1$ としてフィードバック制御を行ったときの周波数特性を、図7の破線で示す。AFSの効果により、周波数特性が $M = 1000[\text{kg}]$ の場合とほぼ等しくなるこ

とがわかる。

さらに、2つのモータを3章で示した制御則で制御することで、AFSの介入による反力の変化を伴わずに、重量や速度の変化による運転感覚の違和感を補償することが可能である。

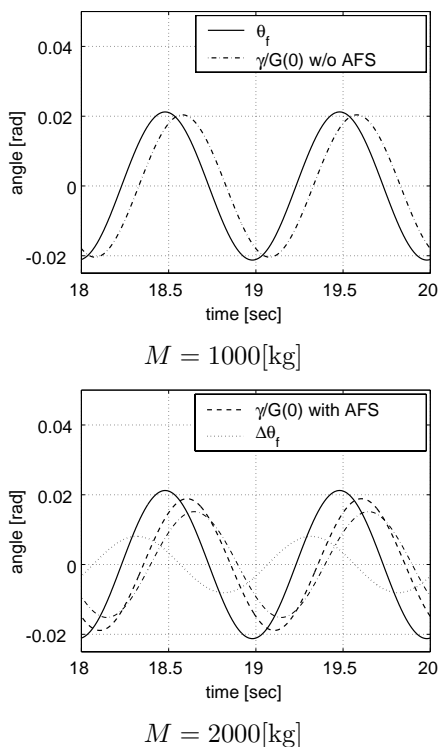


図9 周期操舵に対する γ の応答
Fig. 9. Response of yaw rate.

図9に、周期操舵に対する γ の応答と、 $M = 2000$ [kg] における AFS 補償舵角のシミュレーション結果を示す。 $M = 2000$ [kg] の場合、前輪補償舵角 (図中点線) を足し合わせることで $M = 1000$ [kg] の場合とほぼ等しい γ 応答が得られることが分かる。

4. ステアリング技術の展望

さて、著者らは以上の通り卒業研究を行ってきたが、その後ステアリングメーカや自動車メーカとのディスカッションを通し、次のような指摘を受けた。

- 提案した EPS は既に各社で検討されている
- 遊星歯車のバックラッシによりステアリングが不自然になる
可変ギア比ステアリングは、一部の車種で既に商品化されていたが、遊星歯車を使用したものではなかった。遊星歯車を使用した AFS は BMW 社より 2003 年 7 月に販売開始される 5 シリーズに搭載される^(?)。本研究とは歯車の組み合わせが異なるほか、反力を機械的に伝達するためウォームギアにより差動

角を駆動しているという特徴があり、SBW とは異なる。

著者らはステアリングに関する技術動向を調べ、今後のステアリング技術の展望について検討した。図10に著者らが考えるステアリング技術における3つの領域を示す。

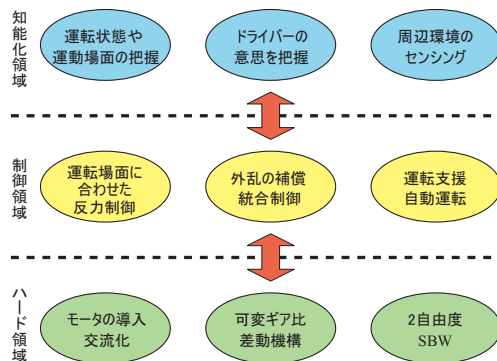


図10 ステアリング技術における3つの領域
Fig. 10. Outline of steering technology.

3つの領域とは、ハードウェア領域、制御領域、知能化領域である。これらの領域における技術の進歩は、それぞれ密接にかかわっている。

ハードウェア領域

ステアリング装置は古くから研究され、数多くの理論が発表されている。現在ではほとんどの自動車にパワーステアリングが搭載されているが、近年では油圧に代わり EPS を使用する自動車が増えている。特にモータの交流化と低騒音化、高出力化が進んでいる。一方、BMW が実用化した差動式ステアリングでは、今まで1自由度であったステアリングを2自由度に拡張した。さらに、反力を直接伝達しないSBWに関する研究は、今後とも盛んに行われると考えられる。

制御領域

また、EPSを採用することで油圧と比較して正確な反力制御が可能になり、制御領域が大きく進歩した。今後は、2自由度ステアリングによる外乱補償、運転支援、さらに自動運転への拡張が考えられる。

知能化領域

知能化領域では自動車の運動状態や運転場面の把握、ドライバーの意思の把握、環境情報の把握をモータの制御に取り入れる動きがある。運転場面や環境に合わせたステアリング制御を行うためには、正確な反力制御や2自由度ステアリングの実現など、他の領域の進歩が不可欠であると同時に、運転支援や自動運転を実現するためには、運転場面や環境を正確に把握することが重要である。

このように、各領域は密接にかかわりつつ発展を続けている。

知能化領域にはまだ深く研究されていない部分が多い。例えばドライバーの意思の把握や、SBW における反力の与え方、周辺環境の把握とドライバーへの提示方法など、さまざまな議論がなされている。

5. 結 言

本研究では、AFS を実現するためのステアリングとして、差動機構を利用したステアリングを提案した。また、その応用の一例としてヨーレートの遅れを補償する AFS を提案した。同時に本研究のような提案は過去にもなされていることがわかった。

最後にステアリング技術の展望について述べたが、著者らは今後、知能化領域に注目し、研究を進めていく予定である。

文 献

- (1) " *NSK Technical Journal* ", No.672, 2001.
- (2) Masao Nagai, Motoki Shino, Feng Gao, "it Study on Inetgrated Control of Front Steering Angle and Direct Yaw Moment, 自動車技術会学術講演会前刷集 No.5-01, 2001.
- (3) Masato Abe, "Vehicle Dynamics and Control", 山海堂, 1992.
- (4) 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.
- (5) Ji-Hoon Kim, Jae-Bok Song, " *Control logic for an electric power steering system using assist motor* ", Mechatronics 12 (2002), pp. 447-459.