

四輪 IWM (In Wheel Motor) 横滑り防止制御の開発

新事業推進本部 小型 e モビリティ開発部 萩原 正俊

1. 取組背景・内容

近年、自動車の電動化が進むなか、ホイール内にトラクションモータを搭載する IWM を採用する自動車も登場している。この IWM を採用するメリットは、ホイール内にモータを搭載できるため車室内空間を広く確保できることと、駆動輪ごとにモータを搭載するため、それぞれの正負トルクを独立して制御できることである。この後者のメリットを生かし、電動ブレーキを使わない横滑り防止機能を実験した文献¹⁾²⁾が公開されている。これらは四輪のうち、二輪が IWM で構成される車両で実験されており、IWM のメリットを最大限に発揮できると考えられる四輪 IWM 車両での検証結果は示されていない。

当社では現在、電動ブレーキを使わない四輪 IWM の横滑り防止制御を開発し、その性能を車両で検証しており、本稿で、操舵安定性を評価するための車両開発から車両アンダーステア時の横滑り防止効果検証の実施までを報告する。

2. 評価車両開発

評価車両には、市販されているガソリン車をベースに、機能・特性が把握できる高圧バッテリーシステム、インバータ（1ユニットで2個のIWMを個々に駆動）、IWM、ステアリング角度センサ、ジャイロセンサ（車両中央に配置）を搭載した。サスペンションはフロント、リア共にダブルウィッシュボーン式にした。油圧ブレーキはドライバーのペダル操作により発生した油圧のみで機能するようにした。また、充電による評価の待ち時間を短縮するために、エンジンと発電機を搭載し、シリーズハイブリッド方式の車両にした。また、これらのシステムを制御するコントローラは、当社のVCU（Vehicle Control Unit）とEFI ECU（Electronic Fuel Injection Electronic Control Unit）で構成し、実装するソフトウェアも開発した。主要なシステムの搭載レイアウトを示す写真を図

1 に、IWM の主要特性とフロントサスペンション構成を図2に示す。

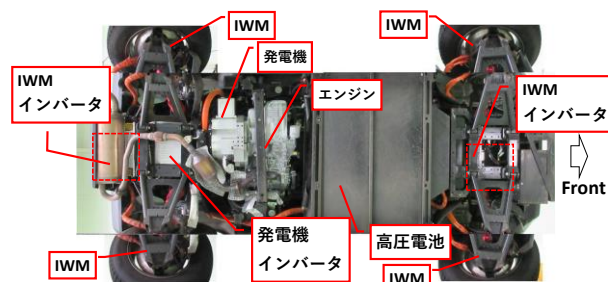


図1 システム搭載レイアウト（底面から撮影）



- ・外径×幅：Φ337mm×95mm
15インチホイール対応
- ・最高回転数：1,250rpm
- ・最大トルク：300Nm/400rpm
- ・最大出力：13.6kW/18.5PS
- ・定格トルク：80Nm/960rpm
- ・定格出力：8kW/10.8PS

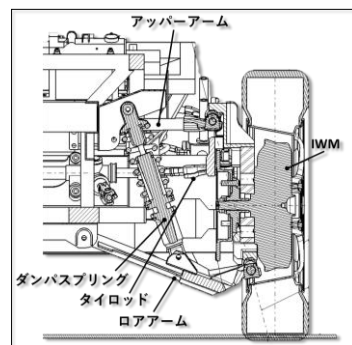


図2 IWM の主要特性とフロントサスペンション構成

3. 横滑り防止制御開発

今回開発した横滑り防止制御は、VCU に実装し『横滑り状態の検出』と横滑り状態を検出した後の『横滑り防止トルク制御』で構成される。これらを含めた全体制御ブロックを図3に示す。

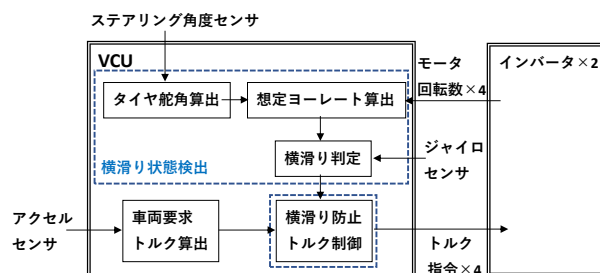


図3 全体制御ブロック

記載されている会社名、商品名、サービス名等は、各社の商標または登録商標です。

3.1 横滑り状態検出

『横滑り状態の検出』は、想定ヨーレートと実ヨーレートを比較し、判定することにした。

想定ヨーレート γ_a (rad/s) は車両の速度 V (m/s) と想定旋回半径 R (m) の比 (V/R) より算出する³⁾。車両の速度は四輪の IWM の回転速度の平均値から算出し、想定旋回半径 R は図 4 に示すように対角線上にある車輪の二輪が描く旋回円半径の中間値とした。計算式を式(1)に示す。タイヤ舵角はステアリング角度センサから導出している。

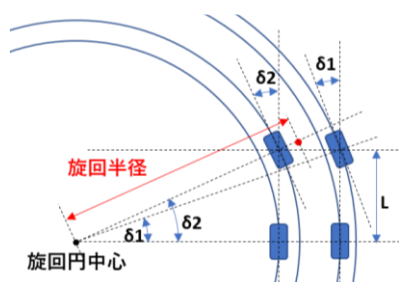


図 4 想定旋回半径

$$R = \left(\frac{1}{\sin \delta_1} + \frac{1}{\tan \delta_2} \right) \frac{L}{2} \quad \cdots \text{式(1)}$$

R : 想定旋回半径(m), L : ホイールベース(m),
 δ_1, δ_2 : タイヤ舵角(rad)

また、実ヨーレートはジャイロセンサで検出し、実ヨーレートが想定ヨーレートより大きいときはオーバーステア状態、小さいときはアンダーステア状態と判断している。

3.2 横滑り防止トルク制御

『横滑り防止トルク制御』は車両の姿勢を本来走行すべき方向に修正できるようにすることで、例えば右旋回時のアンダーステア状態を検出したときは、右旋回モーメントが発生するように（実ヨーレートが大きくなるように＝目標ヨーレートは想定ヨーレート）、右後輪にブレーキトルクを指示し、左前輪に駆動トルクを、そのほかは 0 トルクを指令する。オーバーステア状態を検出したときは、左旋回のモーメントが発生するように（実ヨーレートの符号が切り替わるように＝目標ヨーレートは 0）、左前輪にブレーキトルクを指示し、ブレーキの作用をさせ、右前後輪に駆動トルクを、左後輪は 0 トルクを指令する。オーバーステア時に右前輪にも駆動トルクを指令し

ているのは、後輪が滑り傾向にある状態で、左前輪のブレーキトルクと右後輪の駆動トルクで車両中心を軸とした左旋回のモーメントを発生させることは難しく、滑り量の小さい右前輪に駆動力を発生させて、左旋回モーメントを実現するためである。これらの状態を図 5 に示す。また、トルク算出式は、式(2)から式(5)に示す。

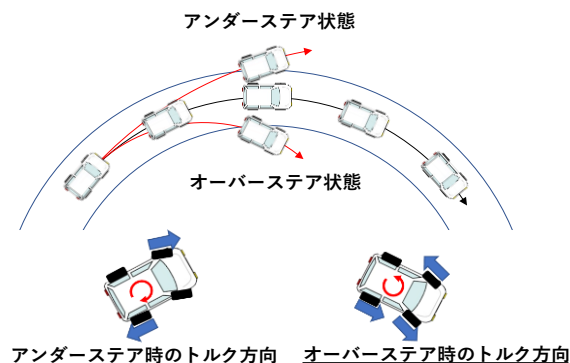


図 5 横滑り時のトルク制御

$$\text{アンダーステア時} \quad \Delta\gamma(t) = \gamma_a(t) - \gamma_r(t) \quad \cdots \text{式(2)}$$

$$\text{オーバーステア時} \quad \Delta\gamma(t) = \gamma_r(t) \quad \cdots \text{式(3)}$$

$$T_{bt} = -(\Delta\gamma(t)G_{pb} + (\Delta\gamma(t) - \Delta\gamma(t-1))G_{db})S_p G_{spb} \frac{G_{stb}}{S_t} \quad \cdots \text{式(4)}$$

$$T_{dt} = (\Delta\gamma(t)G_{pd} + (\Delta\gamma(t) - \Delta\gamma(t-1))G_{dd})S_p G_{spd} \frac{G_{std}}{S_t} \quad \cdots \text{式(5)}$$

t : 現在時間(制御周期: 8ms), $\Delta\gamma$: 目標と実のヨーレート偏差(rad/s),
 γ_a : 想定ヨーレート(rad/s), γ_r : 実ヨーレート(rad/s),
 T_b : ブレーキトルク(Nm), T_d : 駆動トルク(Nm),
 G_{pb}, G_{pd} : Pゲイン, G_{db}, G_{dd} : Dゲイン,
 S_p : 車速(km/h), G_{spb} : 車速によるトルク補正ゲイン,
 S_t : ステアリング角度(rad), G_{stb} : ステアリング角度によるトルク補正ゲイン

3.3 評価 1 (車両挙動)

構築した制御を搭載した評価車両でその効果を検証した。効果検証の最初のゴールを『IWM のトルク制御だけで期待する方向に姿勢を制御できること』に設定した。評価は低μ路試験場の確保が困難であったため、スタッドレスタイヤを装着して、アスファルト路に散水した仮想の低μ路で実施した。図 6 に示す[1]から[3]の操作を順に行い、アンダーステアを発生させた状態を走行パターンとした。このときの横滑り防止制御の有無による車両挙動の違いを記録した。車両挙動の違いは 1 秒ごとの 6 枚の写真で図 7 に示す。

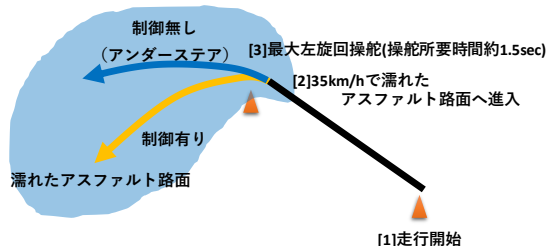


図 6 試験走行パターン

図 7 の左列が横滑り防止制御なし、右列が制御ありで、③の時点で最大舵角状態となっている。④の右列の制御ありのほうのフロント部分が見えるようになってきており、車両姿勢がより早く操舵方向に遷移していることが確認できる。また、⑥において、濡れた路面を出る時の車両通過位置は制御ありのほうがより手前になっていることも確認でき、図 7 のイメージに近い車両挙動を実現できている。

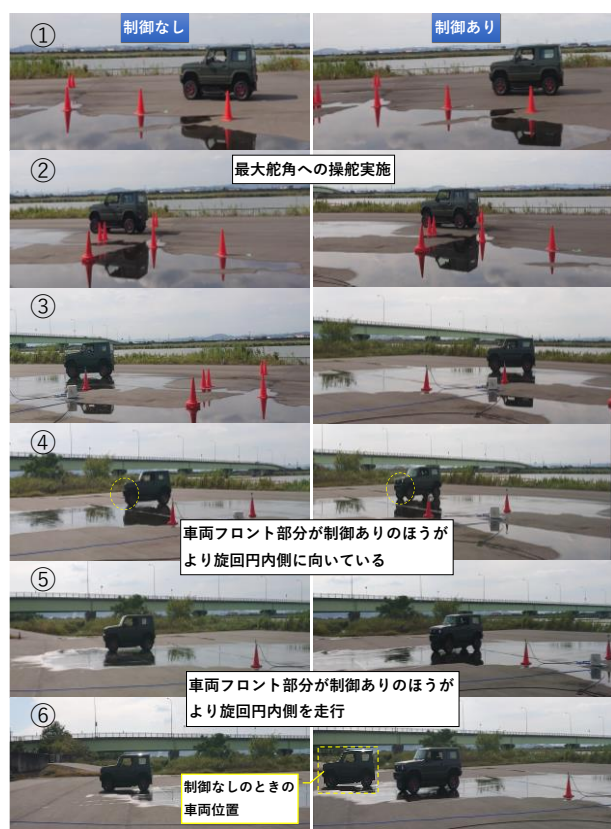


図 7 制御有無による車両挙動 (左/右:制御なし/あり)

3.4 評価 2 (データ解析)

次に、このときの車両状態を示す ECU 内部のパラメータを図 8, 9 に示す。

記載されている会社名、商品名、サービス名等は、各社の商標または登録商標です。

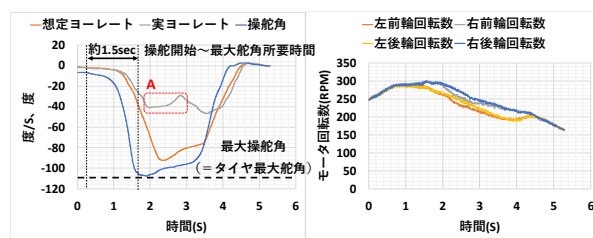


図 8 制御なしのヨーレートと回転数の遷移

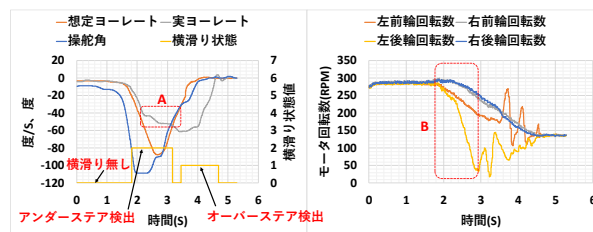


図 9 制御ありのヨーレートと回転数の遷移

操舵角が大きく変化した後想定ヨーレートも大きく変化し、実ヨーレートも同じ方向に遷移している。制御なしは実ヨーレートが -40 度/s の状態を 1 秒近く継続している (図 8 の A) のに対し、制御ありのほうは想定ヨーレートに完全に追従できていないが、アンダーステア状態を検出し、実ヨーレートが想定ヨーレートに近づく方向に遷移している (図 9 の A) ことが分かる。さらに、各輪の回転数は、制御なしでは旋回内輪である左輪の回転数がわずかに右輪より少ない状態で走行しているのに対し、制御ありでは左後輪の回転数の低下が顕著で、ほかの三輪はより速い速度で回転している (図 9 の B) ことから、左後輪を中心に車両が左側に旋回していることが分かる。また、オーバーステア状態を判定しているときに左輪の回転数が大きく変動しているが、これは急激な左旋回をしたことで、左輪が浮き、スリップ状態 (空転状態) になったときに、トルク制御だけによるスリップ抑制制御が機能し、スリップ状態を解消し、再度スリップ状態に遷移する、という現象を繰り返していることを示している。このデータから、制御ありのほうで車両の左旋回のモーメントが大きかったことが分かる。

4. まとめ・今後の展開

今回評価したアンダーステア状態における横滑り防止制御では、IWM のトルク制御だけで姿勢を意図する方向に遷移させることができた。しかし、舵角を戻していく最中にアンダーステア状態が解消し、オーバーステア状

態になっていることから、制動トルクの戻しかたなど、過渡のトルク制御方法の改善が必要であることが分かった。

今後は旋回時のオーバーステア状態や、スラローム走行、ダブルレーンチェンジなどの走行パターンでも評価を進めるとともに、仮想ではない低 μ 路試験路での評価も進めていく。また、横滑り防止制御を含む四輪 IWM 特有の車両姿勢制御を確立することで、より安全性が高い車両を市場に展開できると考え、今後の開発に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 平田淳一ほか:インホイールモータを用いた車両運動制御, Ntn technical review, No.87, pp.44-49[2019]
- 2) C.J.KIM ほか:Performance evaluation of integrated control of direct yaw moment and slip ration control, International journal of automotive technology, Vol.16, No.6, pp.939-946 [2015]
- 3) 酒井英樹:自動車運動力学,森北出版,pp.28[2015]