

# インホイールモータを用いた電気自動車における 自動運転時の操舵フェイルに対するヨーレート制御法

下屋 直人\*, 藤本 博志 (東京大学)

Yaw Rate Control Method for In-Wheel Motored Electric Vehicle on a Failed Steering Motor in Autonomous Driving  
Naoto Shimoya, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)

## Abstract

This paper presents a direct yaw moment control method for in-wheel motored electric vehicles on a failed EPS. In case of EPS failure in autonomous driving, a vehicle has a risk of having unexpected behavior. Therefore, a vehicle needs to generate yaw moment without EPS as a back-up system. Then, the yaw rate control method shown in this paper using in-wheel motor enables a vehicle to run safely to compensate yaw moment using EPS. The effectiveness of the proposed method is verified by turning trajectory following experiment.

キーワード：電気自動車，四輪独立駆動，YMO，モデル予測制御  
(electric vehicle, four-wheel independent driving, yaw moment observer, model predictive control)

## 1. はじめに

近年，運転の安全性や快適性向上などの観点から自動車の自動運転が大きな注目を集めており，世界中で研究が行われている。自動運転に関連する技術の例としてレーンキーピングシステム，アクティブクルージング，自動ブレーキなどが挙げられる。このように，事故の危険が迫った時に制御システムがドライバーの運転操作に介入し，安全運転を支援する運転支援システムは既に実用化されており，現在においても更に高度なレベルの自動運転の達成のために様々な研究開発が行われている<sup>(1)-(3)</sup>。

その一方で，最終目標である完全自動運転は走行環境認知及び危険判断をシステムが行う<sup>(4)</sup>。そのため，自動運転のレベルが高度化すると走行環境確認の最終責任もシステムが負うようになるため，どのような状況でも事故を起こさないシステムを構成しなければならない。そうした背景から完全自動運転は技術面・法令面において実用化が難しいことが知られている。

このように，完全事故防止は自動運転の実用化における最大の障壁の一つである。そのため，これまでにも事故を未然に回避する研究は多く行われてきた<sup>(5)(6)</sup>。しかしながら，これらはシステムが正常に作動している前提のものであり，設計者の予期しない事柄が起こると事故の危険性は飛躍的に高まる。このような事故の要因に挙げられる事柄の一つとして，システムの一つが故障しモータやセンサなどがフェイルすることに起因するものがある。自動運転ではこのような状況に陥るのを防ぐため，システムにバックアップを搭載したり，冗長性を持たせることでフェイルを補完することが求められる<sup>(6)-(8)</sup>。

フェイルに関して，EPSについては車両の走行に直接影響するため特に注意が必要である。そのため，この対策の一つとしてインホイールモータを搭載した電気自動車を用いて駆動力差モーメントを出力することでEPSのフェイルを補完することが考えられる。これまでにインホイールモータ



図1 FPEV2-Kanon

表1 FPEV2-Kanonの各パラメータ

Vehicle Mass ( $m$ )	869 kg
Yaw Moment of Inertia ( $I$ )	617.0 kg · m <sup>2</sup>
Wheelbase ( $l$ )	1.7 m
Distance from CG ( $l_f$ ) to Front/Rear Axle ( $l_r$ )	0.999 m 0.701 m
Tread width ( $d_i$ )	1.3 m
Front Cornering Stiffness ( $C_f$ )	12500 N/rad
Rear Cornering Stiffness ( $C_r$ )	29200 N/rad

を利用した車両の運動性能の向上に関する研究については多く行われてきており<sup>(9)-(11)</sup>，車両重心周りのヨーモーメントを補完することで運動性能が向上することが示されてきた。また，筆者らのグループはヨーモーメントオブザーバ<sup>(9)</sup>を用いることで前後輪アクティブ操舵可能なインホイールモータ車にて片輪がフェイルした場合でも車両のヨーレートを制御することが可能であることを確認したが<sup>(6)</sup>，EPSがフェイルした場合においては検討されていない。

そこで，本稿ではインホイールモータ車の自動運転時にEPSがフェイルし，トルク出力ができなくなった場合でも所望の走行ができるようなヨーレート制御手法を提案する。また，操舵系の補償においては車両重心のヨーレートだけでなく，タイヤのスクラブ半径をポジティブとし，左右輪の駆動力差を用いることでキングピン軸の周りにもモーメントを発生させ，目標方向へ操舵させることができる。自動運転時を想定して一定速度での目標旋回軌道への追従試験を行い，提案法によって車両のヨーレート及び操舵角を制御し，EPSがフェイルした状態でも走行軌道の追従が可能であることを実験にて示す。

## 2. 実験車両と車両モデル

**〈2・1〉 実験車両** 実験車両として著者らの研究グループが製作し、本稿で使用した電気自動車「FPEV2-Kanon」を図1に示す。本車両は4輪すべてに東洋電機製造製アウトロータ型インホイールモータが搭載されており、前輪は±500 Nm、後輪は±530 Nmまで出力可能である。また、EPSにより前後輪のアクティブ操舵が可能となっている。本車両の各パラメータの値を表1に示す。

**〈2・2〉 車両モデル** 四輪独立駆動が可能な自動車についてのモデル化を行う。前輪操舵角  $\delta_f$  が十分小さい場合の車両の重心点の前後方向、横方向、ヨー軸周りの回転方向の運動方程式を式(1)-(5)に示す。ただし、 $F_{xall}$  は車両重心点の前後力、 $F_{yall}$  は車両重心点の横力、 $N_z$  は制駆動力差モーメント、 $N_t$  は横力モーメント、 $M_z$  は車両重心点周りのヨーモーメントとし、 $F_{xij}$  は各輪の制駆動力、 $F_{yij}$  は各輪の横力、 $d_i$  は前後輪トレッド幅、 $l_i$  は前後軸重心間距離である。ここで、添え字  $i$  は前後 ( $f, r$ ) のいずれか、 $j$  は左右 ( $l, r$ ) のいずれかを表す。

$$F_{xall} = F_{xfl} + F_{xfr} + F_{xrl} + F_{xrr} \dots\dots\dots (1)$$

$$F_{yall} = F_{yfl} + F_{yfr} + F_{yrl} + F_{yrr} \dots\dots\dots (2)$$

$$N_z = -\frac{d_f}{2}(F_{xfl} - F_{xfr}) - \frac{d_r}{2}(F_{xrl} - F_{xrr}) \dots\dots\dots (3)$$

$$N_t = l_f(F_{yfl} + F_{yfr}) - l_r(F_{yrl} + F_{yrr}) \dots\dots\dots (4)$$

$$M_z = N_z + N_t \dots\dots\dots (5)$$

また、車輪の回転方向の運動方程式は次のように表される。

$$J_i \dot{\omega}_{ij} = T_{ij} - rF_{xij} \dots\dots\dots (6)$$

ここで  $J_i$  は車輪回転部のイナーシャ、 $\omega_{ij}$  は車輪角速度、 $T_{ij}$  はモータトルク、 $r$  は車輪半径である。

車両モデルは車輪横滑り角が十分小さいとき、車体のローリングを無視し速度を一定と仮定すると図2で示すような線形二輪モデルとして近似することができる<sup>(16)</sup>。この二輪モデルから車両の2つの運動方程式が求まる。

$$\begin{aligned} mV \left( \frac{d\beta}{dt} + \gamma \right) &= 2Y_f + 2Y_r \\ &= -2C_f \left( \beta + \frac{l_f}{V} \gamma - \delta_f \right) - 2C_r \left( \beta - \frac{l_r}{V} \gamma \right) \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I \frac{d\gamma}{dt} &= 2l_f Y_f - 2l_r Y_r + N_z \\ &= -2C_f \left( \beta + \frac{l_f}{V} \gamma - \delta_f \right) l_f + 2C_r \left( \beta - \frac{l_r}{V} \gamma \right) l_r + N_z \dots\dots (8) \end{aligned}$$

ここで、 $C_f, C_r$  はコーナリングステイフネス、 $\beta$  は車両横滑り角、 $\gamma$  は車両重心点におけるヨーレート、 $\alpha_f, \alpha_r$  は前後輪の車輪横滑り角、 $\delta_f$  は前輪舵角、 $m$  は車両重量、 $V$  は車両速度、 $I$  は車両慣性である。

車両重心点の地面に固定された座標系に対する位置の軌道  $(X, Y)$  は車両横滑り角  $\beta$ 、ヨー角  $\theta$  を用いて次のように表される。

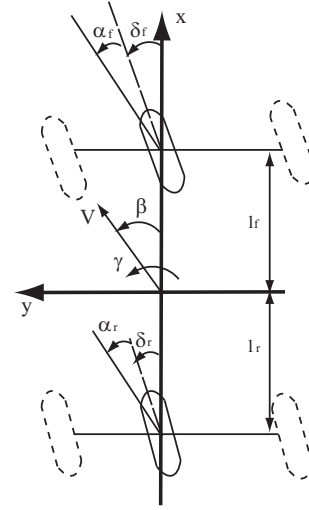


図2 線形二輪車両モデル

$$X = X_0 + V \int_0^t \cos(\beta + \theta) dt \dots\dots\dots (9)$$

$$Y = Y_0 + V \int_0^t \sin(\beta + \theta) dt \dots\dots\dots (10)$$

$$\theta = \theta_0 + \int_0^t \gamma dt \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 $X_0, Y_0, \theta_0$  は  $t=0$  での  $X, Y, \theta$  の値である。

## 3. モデル予測制御による自動運転

**〈3・1〉 モデル予測制御** 自動運転を模擬した目標軌道への追従のために、本稿ではモデル予測制御 (Model Predictive Control) を用いる。モデル予測制御とはリシーディングホライズン制御 (Receding Horizon Control) と呼ばれる制御手法の一種であり、各時刻において有限区間内の制約付き最適制御問題を解きながら制御入力を決定する手法である。この制御手法は拘束条件を陽に扱えることやパラメータチューニングのし易さから、自動運転の研究にも用いられる手法である<sup>(12)(13)</sup>。以下にその概要について説明する。

制御対象の状態ベクトルを  $\mathbf{x}(\tau)$ 、制御入力ベクトルを  $\mathbf{u}(\tau)$  とおき、状態方程式と状態や入力に関する拘束条件がそれぞれ次式で表されるとする。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(\tau), \mathbf{u}(\tau)) \dots\dots\dots (12)$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}(\tau), \mathbf{u}(\tau)) \leq 0 \dots\dots\dots (13)$$

モデル予測制御では各時刻  $t$  において次の最適制御問題を解く。初期条件を  $\mathbf{x}(t)$  として、次の評価関数

$$J = \phi(\mathbf{x}(t+T)) + \int_t^{t+T} L(\mathbf{x}(\tau), \mathbf{u}(\tau)) d\tau \dots\dots\dots (14)$$

を最小化する入力  $\mathbf{u}^*(\tau)$  を求める制御である。ただし、 $\tau$  は予測区間上の時間を表している。評価区間は現時刻  $t$  から  $T$  だけ未来の区間  $[t, t+T]$  とする。そして、得られた最適制御入力  $\mathbf{u}^*(\tau)$  のうち一番目の入力  $\mathbf{u}^*(0)$  のみを時刻  $t$  における入力として用いる。

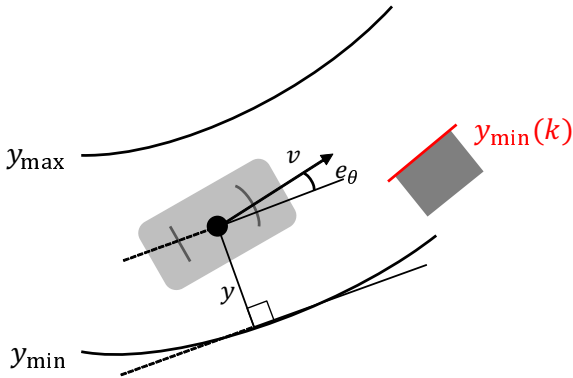


図3 自動運転時の走行条件

また、この最適制御問題の解法として様々な手法が提案されているが、本稿では状態方程式 (12) と、制御入力  $u(\tau)$  及び状態変数  $x(\tau)$  の拘束条件 (13) を線形な条件とすることで評価関数 (14) を凸関数にし、二次計画法で高速に最適解を求める手法を用いる<sup>(14)</sup>。そして、車両の状態方程式 (7), (8) をこの二次計画問題に適用することで、目標軌道に追従させるための操舵角  $\delta_f^*$  を逐次求める。

車両の状態方程式は式 (7), (8) より以下のように表される。

$$\begin{bmatrix} \beta[k+1] \\ \gamma[k+1] \\ y[k+1] \\ \theta[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - 2\frac{C_f + C_r}{mV}\Delta t & (-1 - 2\frac{C_{fl}l_f - C_{rl}l_r}{mV^2})\Delta t & 0 & 0 \\ -2\frac{C_{fl}l_f - C_{rl}l_r}{l}\Delta t & 1 - 2\frac{C_{fl}l_f^2 + C_{rl}l_r^2}{lV}\Delta t & 0 & 0 \\ V\Delta t & 0 & 1 & V\Delta t \\ 0 & \Delta t & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta[k] \\ \gamma[k] \\ y[k] \\ \theta[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2C_f}{mV}\Delta t \\ \frac{2C_{fl}l_f}{l}\Delta t \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_f[k] \quad \dots\dots (15)$$

ここで、 $\Delta t$  は離散化した際のサンプリング時間を表す。また、拘束条件は制御入力である操舵角  $\delta_f(\tau)$  と、車両の状態量  $x(\tau)$  の制約とし、次のように表す。

$$\delta_{fmin} < \delta_f[k] < \delta_{fmax} \quad \dots\dots (16)$$

$$\mathbf{x}_{min}[k] < \mathbf{x}[k] < \mathbf{x}_{max}[k] \quad \dots\dots (17)$$

これらの制約の元、次の最適制御問題を解く。

$$J = \sum_{k=1}^{H_p} \left( \|\hat{\mathbf{x}}[k] - \mathbf{x}_{ref}[k]\|_{\mathbf{Q}[k]}^2 + \|\Delta\hat{\mathbf{u}}[k]\|_{\mathbf{R}[k]}^2 \right) \quad \dots\dots (18)$$

$$\mathbf{Q} = \text{diag}[Q_\beta \quad Q_\gamma \quad Q_y \quad Q_\theta], \quad \mathbf{R} = R_{\delta_f} \quad \dots\dots (19)$$

$$\mathbf{x}_{ref} = [\beta_{ref}[k] \quad \gamma_{ref}[k] \quad y_{ref}[k] \quad \theta_{ref}[k]] \quad \dots\dots (20)$$

評価関数 (18) について、第一項は目標軌道への追従性を表しており、第二項は操舵角指令値のなめらかさ表している。この2つの項はトレードオフの関係となっており、重み  $\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{R}$  によって調整する。

**〈3・2〉 自動運転のための走行条件** ここで、MPC で自動運転を模擬することを考える。評価関数 (14) を最小化する最適化計算には一般的に反復解法を用い、かつレーザやカメラなどのサンプリング周期と同期する必要があるため、予測ステップ数や入力の次元にも依存するが計算には数十 ms 程度の時間を要する。そのため、MPC を用いて制御すべき状態量は  $y$  や  $\theta$  など距離や角度の次元であるこ

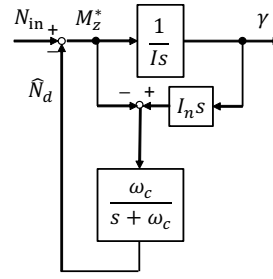


図4 YMO

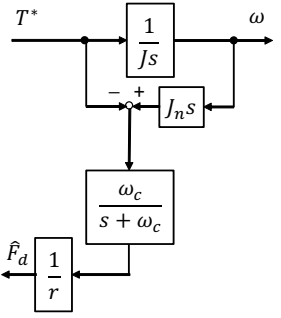


図5 DFO

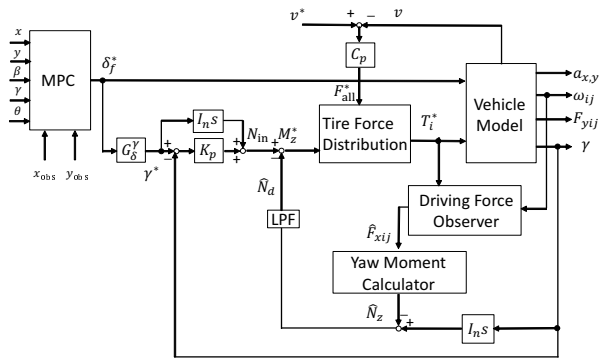


図6 制御手法のブロック線図

とが望ましく、速度や加速度の次元の状態量はより広い帯域のインナーループによって補償することが望ましい<sup>(15)</sup>。このようにして、図3に示すように、道路境界と車両のヨー角の差  $e_\theta$  及び左右の位置  $y$  を MPC により逐次最適化し、その他の状態量は  $y_{ref}$  や  $\theta_{ref}$  に追従するようにインナーループにて高速に補償することで、単一レーン上では自動運転を達成することができる。

以上より、本稿では (19) の状態量の重み  $\mathbf{Q}$  は次のように左右の距離  $y$  とヨー角  $\theta$  に限定する。

$$\mathbf{Q} = [0 \quad 0 \quad Q_y \quad Q_\theta] \quad \dots\dots (21)$$

#### 4. 外乱を補償するヨーレート制御系

車両のヨー方向の運動方程式 (8) の右辺において、タイヤに発生するコーナリングフォースによるヨーモーメントを  $N_t = 2l_f Y_f - 2l_r Y_r$  とし、さらに外乱ヨーモーメント  $N_d$  を考慮して、これらを  $N_{dt} = N_t + N_d$  とまとめると、式 (8) は以下のように簡単に表せる。

$$I \frac{d\gamma}{dt} = N_z + N_{dt} \quad \dots\dots (22)$$

$N_{dt}$  を外乱オブザーバで推定し、推定値  $\hat{N}_{dt}$  を一括補償するのが YMO である。ローパスフィルタのカットオフ周波数以下の領域では

$$\gamma = \frac{1}{I_n s} N_{in} \quad \dots\dots (23)$$

とノミナル化される。このブロック図を図4に示す。このとき、 $N_{in}$  はノミナル化されたプラントに対する、駆動力差モーメントによる制御入力である。また、ヨーモーメント

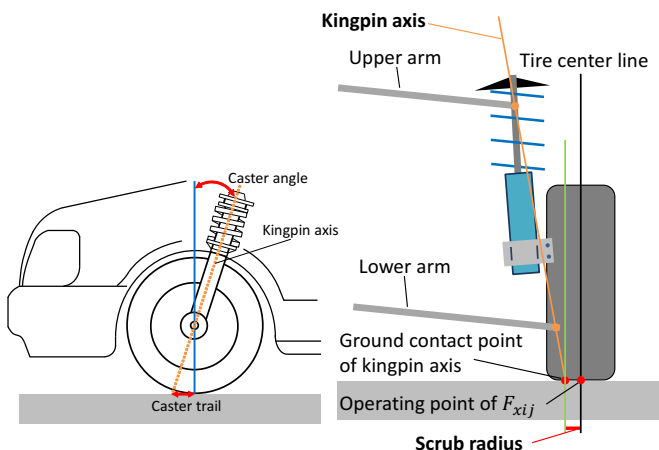


図7 キャスター角

図8 スクラブ半径

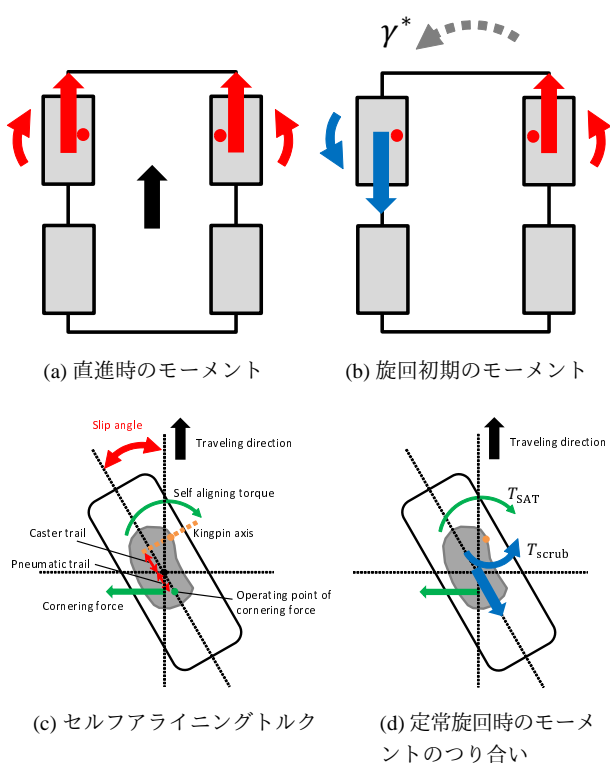


図9 キングピン軸周りに働くモーメント

オブザーバで用いる  $N_z$  には図5に示す駆動力オブザーバ (Driving Force Observer: DFO)<sup>(10)</sup> を用いて推定した駆動力より算出した値を用いる。駆動力オブザーバを用いることによりアンチワインドアップ効果が得られ、推定ヨーモーメント  $N_{di}$  の発散を防ぐことができる。

この YMO をヨーレート制御系に適用することで、EPS がフェイルし操舵によるモーメントが発生できなくなっても、これを外乱として直接ヨーモーメントにて高速に補償することによって、目標方向への車両重心周りのモーメントを出力することができる。

### 5. EPS フェイル時における操舵

EPS フェイル時の旋回方法として、タイヤの摩擦円の関係から駆動力差を用いるだけではスリップの危険が高まる

ため、操舵による横力も用いることが望ましい。ところで、先に述べたヨーレート制御は所望のヨーレートを出力するために車両重心周りのヨーモーメントを出力するものであるが、タイヤのアライメントを調整することで、キングピン軸周りにもモーメントを発生させ、インホイールモータの出力のみで所望の方向に操舵を切ることも可能である。本章ではこの駆動力差を利用した操舵方法について説明する。まず、本手法に関連するタイヤのアライメントについて紹介した後、このアライメントを利用することでヨーレート制御によって任意の方向に操舵する手法について説明する。

#### 〈5・1〉 安定性向上のためのタイヤのアライメント

まず、説明を円滑にするためにキャスター角について説明する。キャスター角とは図7のような操舵の回転軸と垂直線との傾き角である。一般的な車両は車両安定性を向上させるためにこのキャスター角をつける。このようなアライメントにより、車両に外乱が働き操舵が取られた場合でも、図7に示すキャスタートレールとタイヤに働くコーナリングフォースによって操舵軸であるキングピン軸の周りに次式に示す復元モーメント  $T_{SAT}$  が働き、直進安定性が向上する。

$$T_{SAT} = (\zeta_c + \zeta_p)F_{yij} \dots \dots \dots (24)$$

ただし  $\zeta_c$  はキャスタートレール、 $\zeta_p$  はニューマチックトレールである。また、 $T_{SAT}$  は一般的に操舵をしたときに直進方向へ戻るように作用するモーメントである。

次に、EPS なしで操舵を行うためのアライメントとして、スクラブ半径 (キングピンオフセット) について述べる。スクラブ半径とは図8のようなキングピン軸の接地点とタイヤの接地中心点までの間の距離のことである。このオフセットが車体側にあるときをスクラブ半径をポジティブ、外側にあるときをネガティブであるという。スクラブ半径もまた車両の直進安定性を調整するアライメントであり、キャスター角とは違い制駆動力でキングピン軸周りにモーメントを発生させる。このスクラブ半径をポジティブにすることで直進安定性を向上させることができるが、昨今のタイヤの保持力の向上や燃費の観点から、現在ではできるだけゼロスクラブとなるように調整するのが主流となっている。

#### 〈5・2〉 EPS を用いないアライメントを利用した操舵

ここまで述べたように、タイヤのアライメントは車両の安定性を調整するためのものであるが、先に述べたスクラブ半径をポジティブにすることで、EPS を用いずに任意の方向に操舵することも可能である。

以下にその概要について説明する。本稿では簡単化のため、定速旋回を仮定して考える。まず直進状態では図9(a)のようにキングピン軸周りのモーメントは左右輪で相殺するため、操舵力は発生しない。ここで、EPS がフェイルしトルクが零になった状態で旋回に差し掛かると、ヨーレート制御によって図9(b)のように外輪には駆動力、内輪には制動力が働くためキングピン周りには次のモーメント  $T_{scrub}$  が発生し、目標方向に操舵を行う。

$$T_{scrub} = \zeta_{scrub}F_{xij} \dots \dots \dots (25)$$

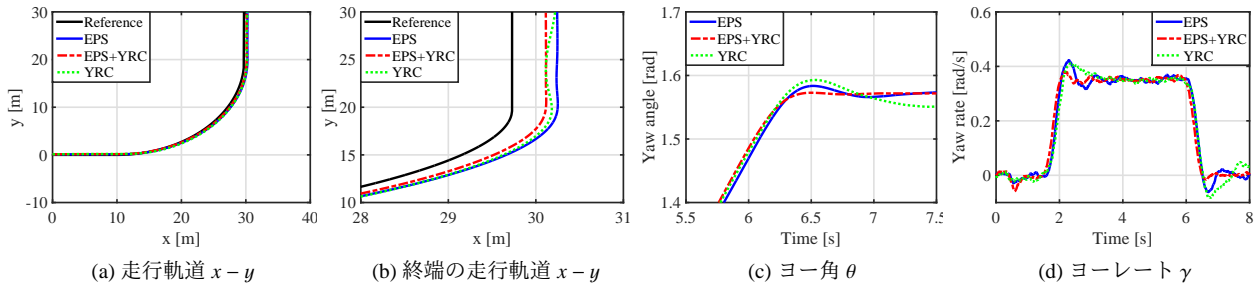


図 11 各条件の比較

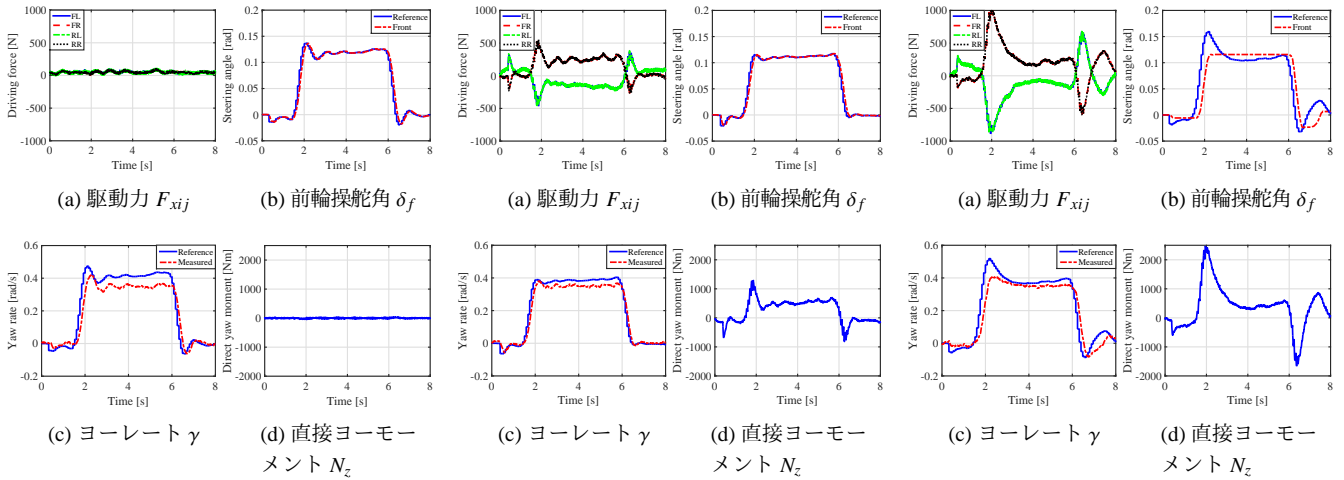


図 12 EPS による操舵

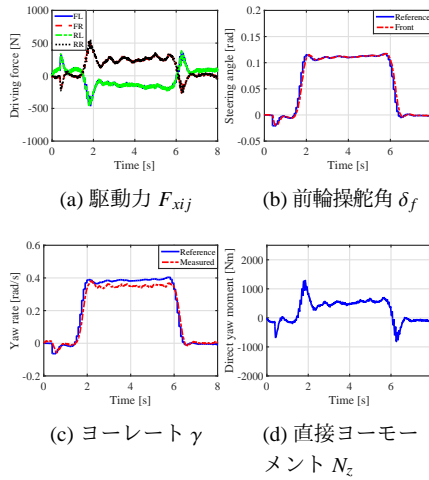


図 13 EPS+ヨーレート制御

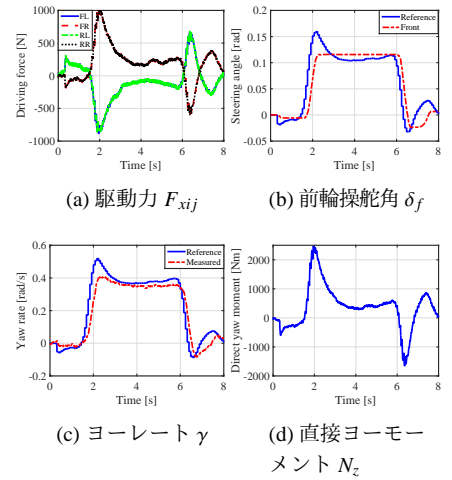


図 14 ユーレート制御のみ

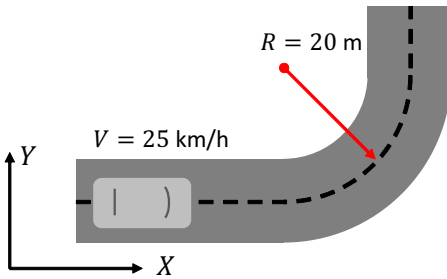


図 10 旋回軌道追従試験

表 2 MPC のパラメータ

Predictive horizon $H_p$	40
Sampling time $dt$	0.08 [s]
Input weight $R$	10
Weight of $y$ $Q_y$	0
Weight of $\theta$ $Q_\theta$	10

ただし、 $\zeta_{\text{scrub}}$  はスクラブ半径である。これにより、駆動力差モーメントと操舵によりタイヤには図 9(c) のような横滑りが発生する。ただし、図 9(c) は左前輪を示している。その結果コーナリングフォースが働き、トレールによりキングピン周りに操舵に対する復元モーメントが働く。その後、図 9(d) のように目標ヨーレートにてキングピン軸周りに働く 2 つのモーメント  $T_{\text{SAT}}$ ,  $T_{\text{scrub}}$  はつり合い、目標方向に向

かって操舵が固定され、定常円旋回を行う。

このように、制駆動力による操舵は EPS による操舵と同様の働きをしており、このことは操舵のためのアクチュエータが EPS の他に 2 つ存在していることと等価であるといえる。このように左右輪独立駆動とタイヤのアライメントを積極的に利用することで EPS に対するフェイルセーフシステムとして構成することができる。

## 6. 旋回軌道追従試験

図 6 に示すヨーレート制御を用いた制御系において、前輪がフェイルした状態でも所望の走行軌道を取ることができるとを実験にて示す。

図 10 に示すような  $R = 20 \text{ m}$  の旋回路において、車速  $25 \text{ km/h}$  で走行中に EPS がフェイルした状態でもこの軌道に追従できるかを検討する。このときのモデル予測制御のパラメータを表 2 に示す。また、 $\theta_{\text{ref}}$  の値は GPS や道路情報から事前に取得できているものとし、その中でもカメラやレーダによって左右の拘束条件が取得できない場合を想定し  $Q_y = 0$  とした。ヨーレート制御のゲイン  $K_p$  はヨーモーメント指令値  $N_{\text{in}}$  からヨーレート  $\gamma$  までの伝達関数を  $\frac{1}{T_{\text{in}}s}$  としたときに、閉ループ極が  $-5 \text{ rad/s}$  となるように極配置法により求め、ヨーモーメントオブザーバのカットオフ周波数は  $10 \text{ rad/s}$  とした。この条件において、EPS による操舵のみの場合 (EPS), EPS とヨーレート制御を用いた場合 (EPS+YRC), ユーレート制御のみの場合 (YRC) について比

較を行った。ただし、本実験車両「FPEV2-Kanon」のスクラブ半径は 54 mm である。

図 11-14 に実験結果を示す。走行軌道に関して、図 11(a), 11(b) より EPS がフェイルした状態でも旋回ができており、 $y$  の参照軌道に対する誤差が EPS で操舵した場合と比較しても同様のものとなっていることが確認できる。これにより、もし自動運転時に EPS がフェイルしても、インホイールモータによって EPS を補償することが十分可能であるといえる。また、図 11(c), 11(d) から EPS がフェイルした状態ではヨーモーメントが大きく必要になる場面において EPS による操舵の場合と比較して応答の遅れが見られるが、ヨーレートが定常状態の場合は EPS で旋回している場合と同等の挙動となっていることが確認できる。

次に各条件において、より詳細な考察を行う。EPS のみでは図 12(b), 12(c) よりヨーレート指令値が急激に変化すると、操舵に対する横力の応答の遅れのために、MPC により大きな操舵角指令値が入力されオーバーシュートが生じている。しかしこれにヨーレート制御を加えることで図 13(a), 13(d) のように、このヨーレートの遅れを補償するように直接ヨーモーメントを出力するため、図 13(b), 13(c) のように過渡特性が向上していることが確認できる。EPS がフェイルした状態では、ヨーレートを補償するために図 14(a), 14(d) のような大きな直接ヨーモーメントを出力している。その結果、キングピン軸周りにモーメントが発生し、図 13(b) のように目標方向に向けて操舵を行っている。また、定常状態では車両重心及びキングピン周りのモーメントが釣り合い、図 14(c) のように EPS で操舵を行った場合と同様のヨーレートを出力していることが確認できる。ただし、操舵に関しては EPS は操舵角の制御を行っているのに対し、駆動力差による操舵はヨーレート制御により操舵を行っているため、応答に遅れが生じている。

## 7. まとめ

本稿では、自動運転時に EPS がフェイルした際におけるインホイールモータ車を用いたヨーレート制御法について、旋回による軌道追従試験によりその効果を検証した。その結果、EPS がフェイルした場合でもヨーレート制御によって目標軌道に追従することを確認し、通常時の走行でも制御なしと比較して車両の運動性能が向上することを確認した。このように、スクラブ半径をポジティブにし、ヨーレート制御を用いて駆動力差を出力することによってインホイールモータを操舵のアクチュエータとして使用することが可能である。本稿では主スクラブ半径に注目した議論を行ったが、インホイールモータを更に他のアライメントと協調させることにより、今までにない自由度の高い車両設計ができると考えられる。

## 8. 謝辞

最後に本研究の一部は NEDO 産業技術研究助成（プロジェクト ID:05A48701d）及び、文部科学省科学研究費補助金（課題番号:22246057 及び 26249061）によって行われたことを付記する。

## 参考文献

- (1) M. Wang, W. Daamen, S. Hoogendoorn and B. Arem: "Cooperative Car-Following Control: Distributed Algorithm and Impact on Moving Jam Features", IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, Vol. 17, No. 5, pp. 1459-1471 (2016)
- (2) H. C. Hsu and A. Liu: "Kinematic design for platoon-lane-changemaneuvers", IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 185-190 (2008)
- (3) D. Lima and A. Victorino: "A Hybrid Controller for Vision-Based Navigation of Autonomous Vehicles in Urban Environments", IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, Vol. 17, No. 8, pp. 2310-2323 (2016)
- (4) National Highway Traffic Safety Administration: "Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles", Washington, DC, pp. 1-14 (2013)
- (5) J. Levinson, J. Askeland, J. Becker, J. Dolson, D. Held, S. Kammel, J. Z. Kolter, D. Langer, O. Pink, and V. Pratt: "Towards fully autonomous driving: Systems and algorithms", IEEE 2011 Intelligent Vehicles Symposium, pp. 163-168 (2011)
- (6) 安藤直樹, 藤本博志: "後輪独立駆動電気自動車の片輪モータフェイルに対するヨーレート制御のロバスト性検討", TRANSLOG2009, Vol. 2009, No.09-65 pp. 177-180 (2009)
- (7) R. Wang and J. Wang: "Fault-Tolerant Control With Active Fault Diagnosis for Four-Wheel Independently Driven Electric Ground Vehicles", IEEE Trans on Vehicular Technology, Vol. 60, No. 9 pp. 4276-4287 (2011)
- (8) S. Anwar and L. Chen: "An analytical redundancy-based fault detection and isolation algorithm for a road-wheel control subsystem in a steer-bywire system", IEEE Trans on Vehicular Technology, Vol. 56, No. 5, pp. 2859-2869 (2007)
- (9) H.Fujimoto, T.Saito, and T.Noguchi: "Motion stabilization control of electric vehicle under snowy conditions based on yaw-moment observer", The8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control 2004, pp.35-40 (2004)
- (10) 吉村雅貴, 藤本博志: "インホイールモータを搭載した電気自動車の駆動トルク制御法", 電気学会論文誌 D, Vol. 131, No. 5, pp. 721-728 (2011)
- (11) 勝山悦生: "インホイールモータを用いたばね下逆スカイフックダンパ制御による乗り心地の研究", 自動車技術会 2016 年春季大会, S127, pp. 674-679, (2016)
- (12) P. Falcone, F. Borrelli, J. Asgari, H. E. Tseng and D. Hrovat, "Predictive Active Steering Control for Autonomous Vehicle Systems", IEEE Trans on Control Systems Technology, Vol. 15, No. 3, pp. 566-580 (2007)
- (13) M. Nanao and T. Ohtsuka, "Nonlinear Model Predictive Control for Vehicle Collision Avoidance Using C/GMRES Algorithm", 2010 IEEE International Conference on Control Applications, pp. 1630-1635 (2010)
- (14) J. Mattingley and S. Boyd: "CVXGEN: A code generator for embedded convex optimization", Optimization and Engineering, Vol. 13, No. 1, pp. 1-27 (2012)
- (15) P. Falcone, F. Borrelli, J. Asgari, H. E. Tseng and D. Hrovat: "Predictive Active Steering Control for Autonomous Vehicle Systems", IEEE Trans on Control Systems Technology, Vol. 15, No. 3, pp. 566-580 (2007)
- (16) 安部正人: "自動車の運動と制御", 東京電機大学出版局